

Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti



Roma, 19-20-21 novembre 2025
Aula Magna “Adalberto Libera”, Facoltà di Architettura
Università degli Studi Roma Tre
Largo Giovanni Battista Marzi, 10 (ex Mattatoio)

19 novembre 2025

**La diagnostica per le valutazioni di sicurezza e il
monitoraggio delle infrastrutture**

Prove in laboratorio e attività sperimentali in situ

Antonio Bilotta

Inquadramento del task e dei subtask

WP3: Analisi, revisione e aggiornamento delle Linee Guida

Task 3.1 - Aggiornamento della classificazione e delle schede di difettosità

Task 3.2 - Indagini, diagnostica, identificazione e monitoraggio

Task 3.3 - Valutazione formale della sicurezza

Subtask 3.2.1 - Rilievi, indagini, prove distruttive e non distruttive, diagnostica

Subtask 3.2.2 - Identificazione e aggiornamento del modello strutturale

Subtask 3.2.3 - Monitoraggio

Subtask 3.2.1	Subtask 3.2.2	Subtask 3.2.3
UniNA	UniNA	UniNA
IUSS-UniPV	IUSS	Eucentre-UniPV
UniSA	UniBO	UniTN
UniTN	PoliBA	UniBO
UniBO	UniCH	UniMOL
PoliBA	CNR-ITC	PoliMI
UniMOL	UniPD	CNR-ITC
UniCA	UniFI	UniBG
PoliMI		UniRC
		UniSannio
		UniGE



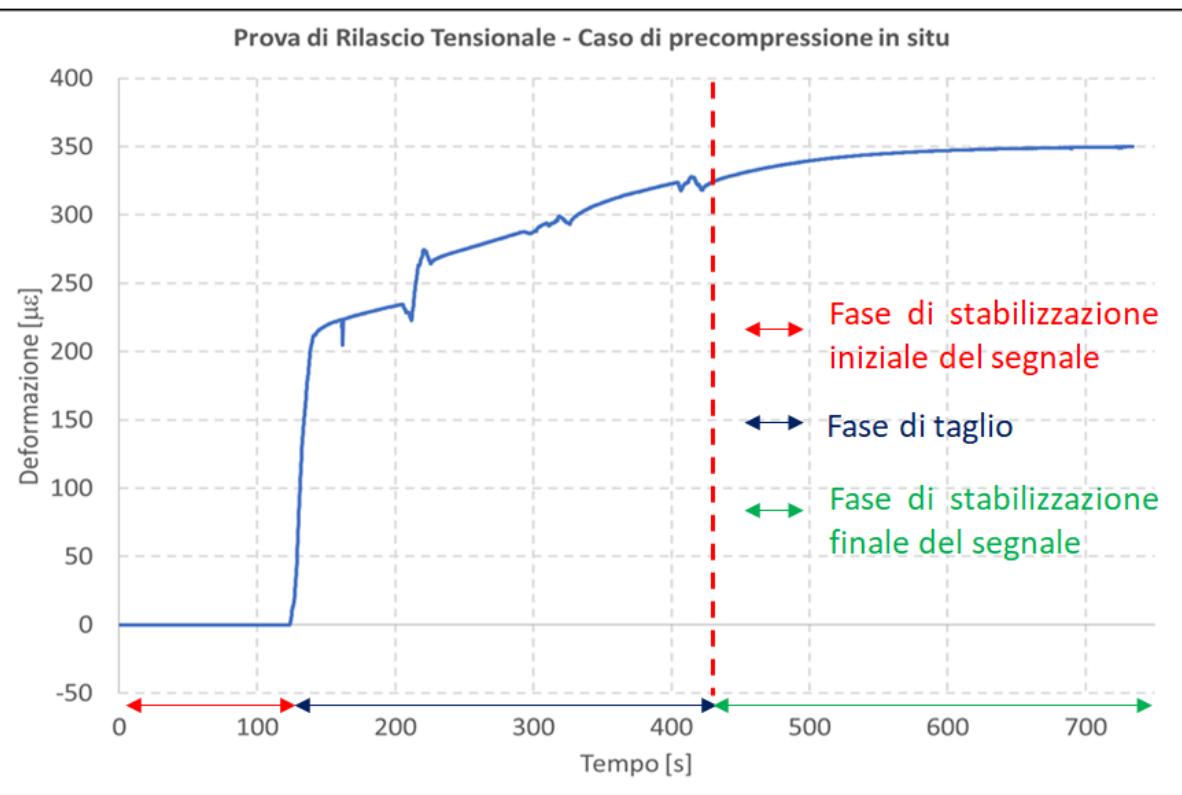
Documento con descrizione delle applicazioni sperimentali e potenzialità della tecnica

La tecnica del rilascio tensionale

Prova semi-distruttiva che prevede l'estrazione e l'isolamento di un campione di cls, preventivamente strumentato con estensimetri, da un elemento in c.a.p.

Principio: il campione estratto subisce una deformazione di uguale entità, ma di segno opposto, rispetto allo stato deformativo a cui era sottoposto all'interno del volume di calcestruzzo indagato

Stima della precompressione agente: $\sigma = \varepsilon \cdot E$



Estrazione di un provino di forma troncopiramidale



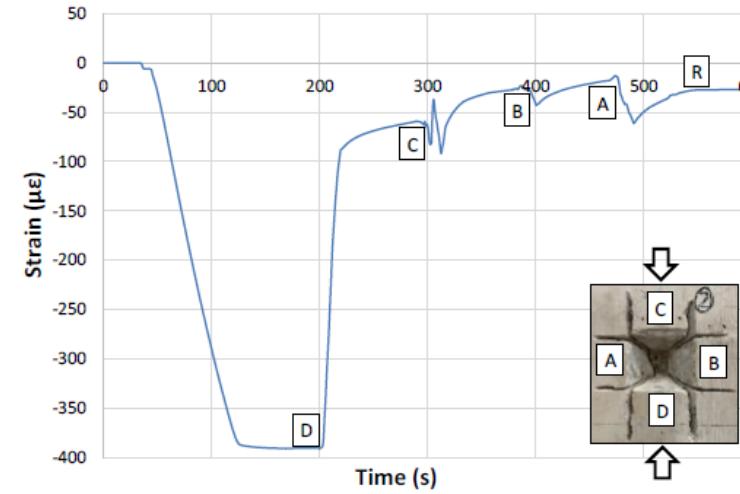
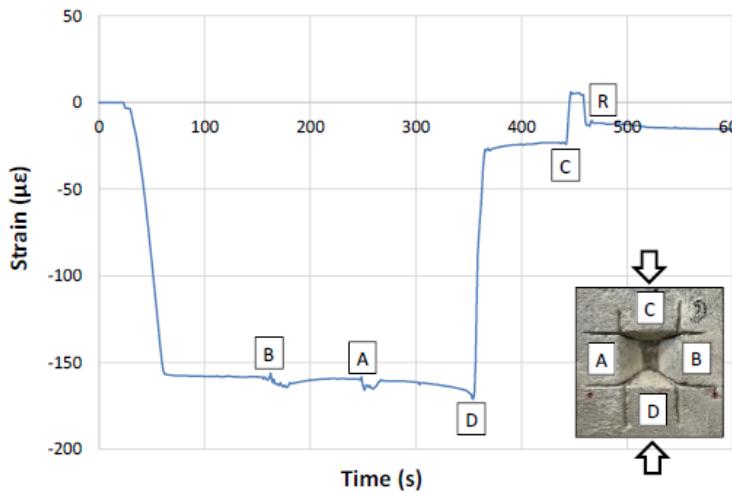
Carotaggio



Coppie di tagli paralleli nell'anima

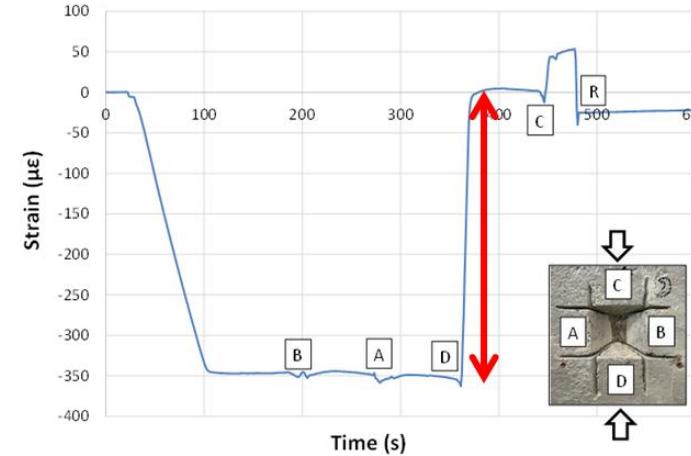
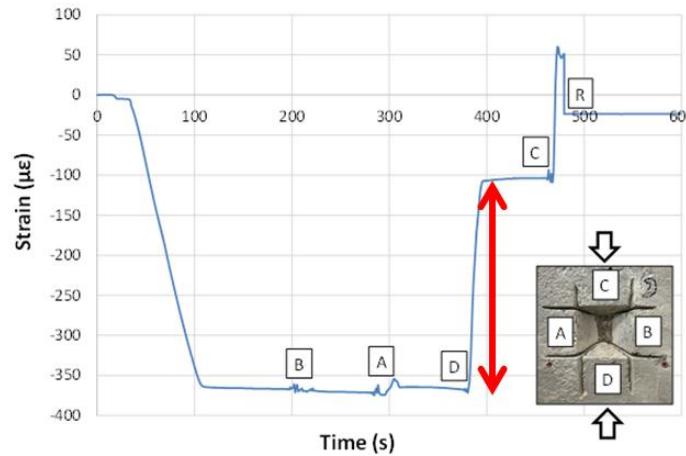


➤ Effetto della direzione dei tagli (paralleli od ortogonali alla direzione di sollecitazione)



- Direzione dei tagli: modifica locale della forma della curva di rilascio
- Contributo dei tagli paralleli al flusso tensionale: pressoché trascutabile → isolamento del campione dal clc circostante
- Contributo dei tagli ortogonali: assolutamente predominante → interruzione del flusso tensionale che intercetta il campione
- Primo taglio ortogonale: contributo maggiore

➤ Effetto della profondità di taglio



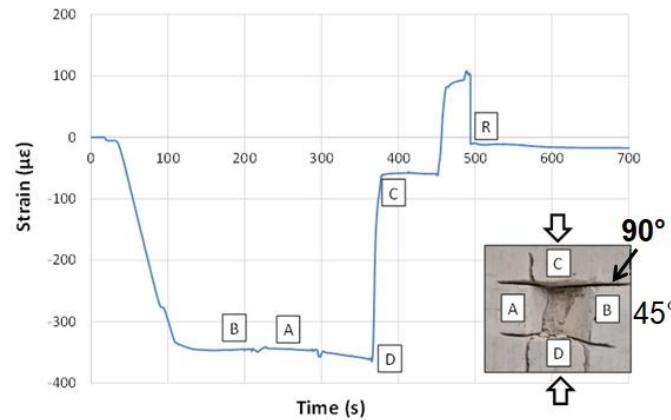
- Profondità ridotta → rilascio solo parziale
- Profondità aumentata → rilascio maggiore
- Effetto solo locale sulla curva di rilascio, non influenza risultato finale se si procede con il distacco del campione

2 Caso A: profondità di taglio ridotta (< 30 mm)

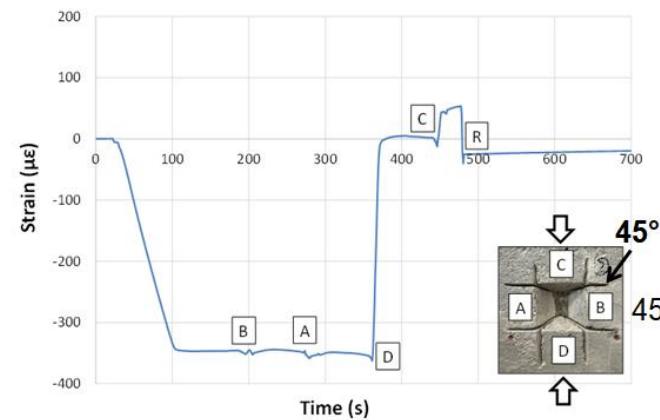
Caso B: profondità di taglio maggiorata (>40 mm) Attività sperimentali in situ

➤ Effetto dell'inclinazione dei tagli

Tagli prima paralleli (45°), poi ortogonali (90°)



Tagli prima paralleli (45°), poi ortogonali (45°)



- Effetto secondario sulla forma della curva di rilascio
- Importante sulla geometria del campione e sulla facilità di distacco finale



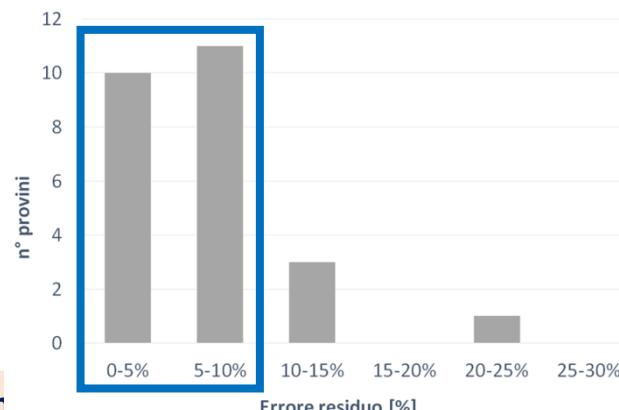
➤ Effetto dell'intensità della precompressione

Tipologia campione	σ (MPa)	Errore (%)
P5	5	6.1
P10	10	6.9
P15	15	6.6

Errore % dello stesso ordine di grandezza → metodo indipendente dal livello di precompressione applicata

➤ Distribuzione errore residuo

- Valutazione in condizioni ottimali (ambiente di laboratorio controllato)
- Errore generalmente contenuto entro il 10%, con pochi casi isolati oltre tale valore



Sensibilità
 $35 \mu\epsilon \rightarrow \approx 1 \text{ MPa}$

Prova di rilascio Tensionale – Tagli paralleli nell'anima



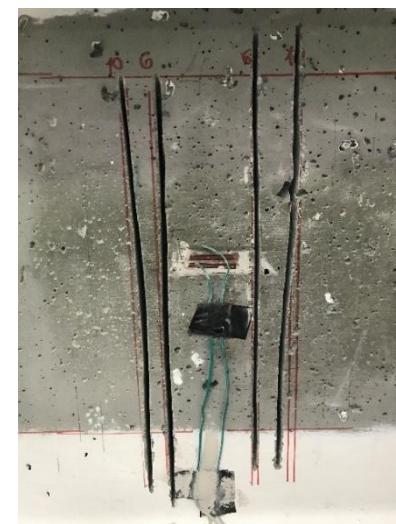
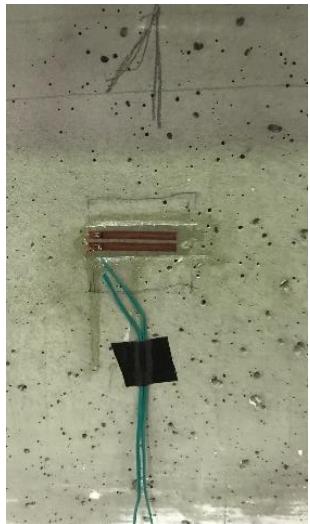
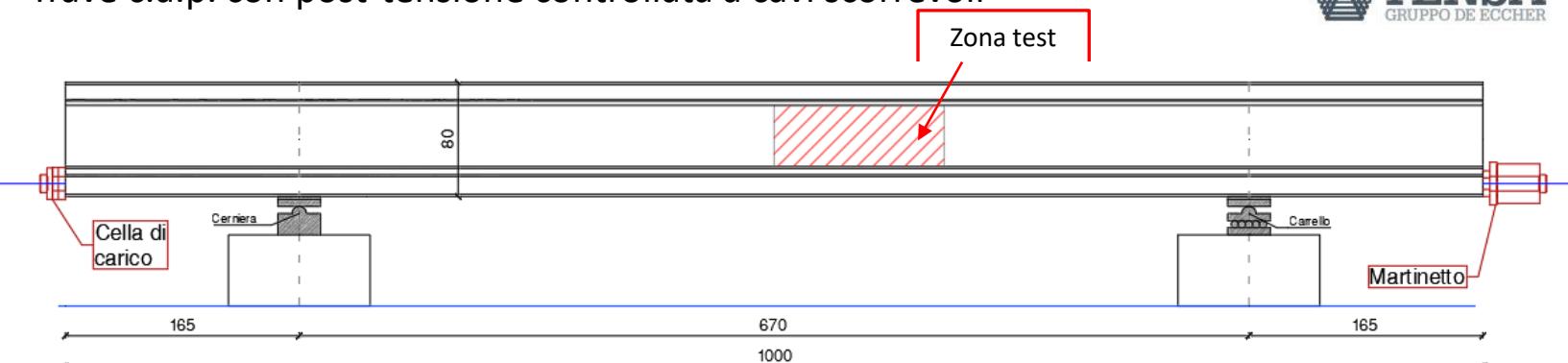
Campagna sperimentale

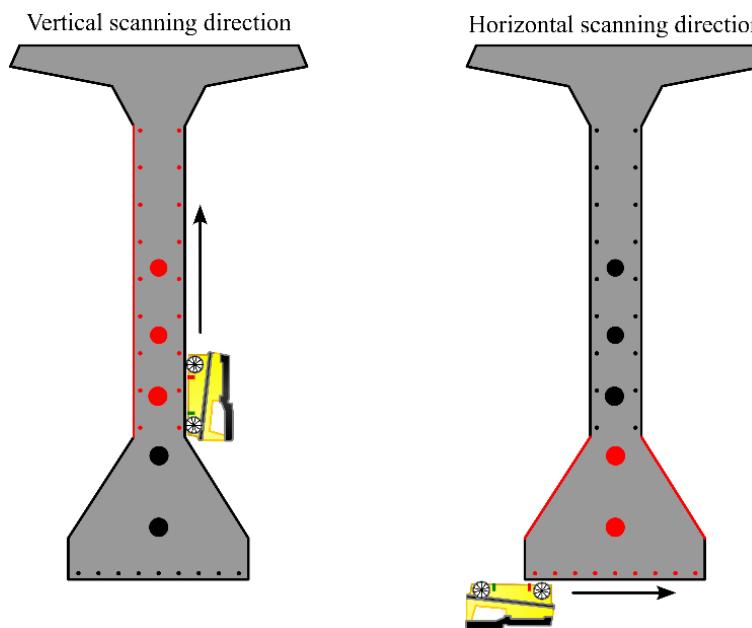
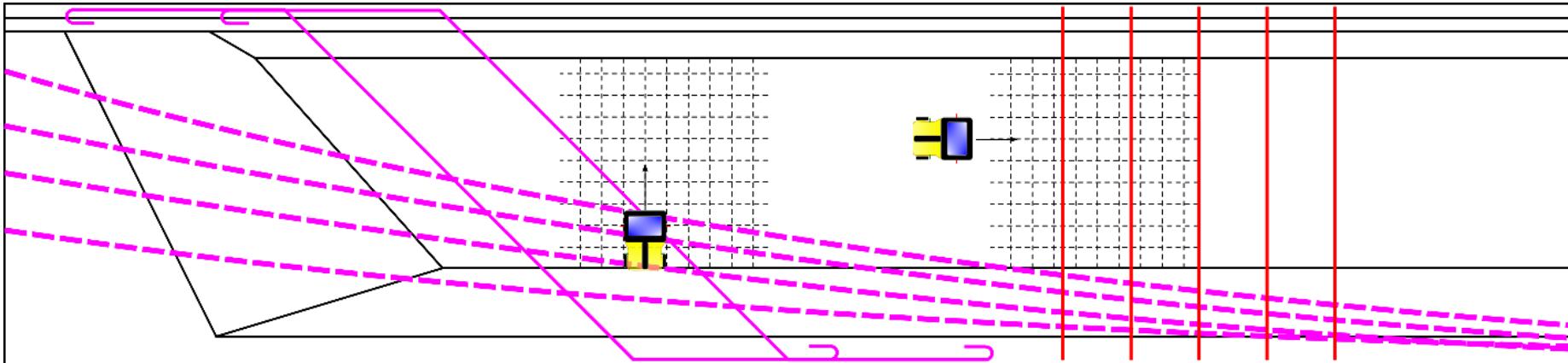
Ref: S. G. MANTELLI; "Influence and on-site assessment of long-term prestressing losses on shear strength of bridge girders"; PhD Thesis; University of Brescia; 26 June 2023.

Trave c.a.p. con post-tensione controllata a cavi scorrevoli

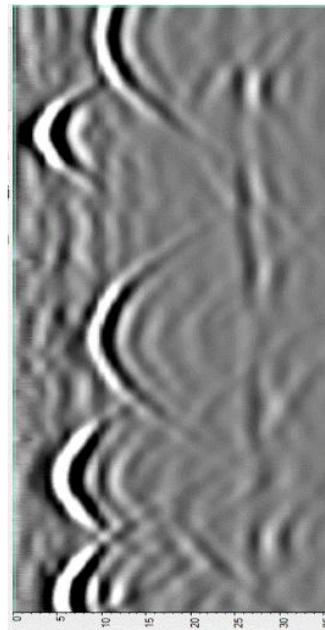
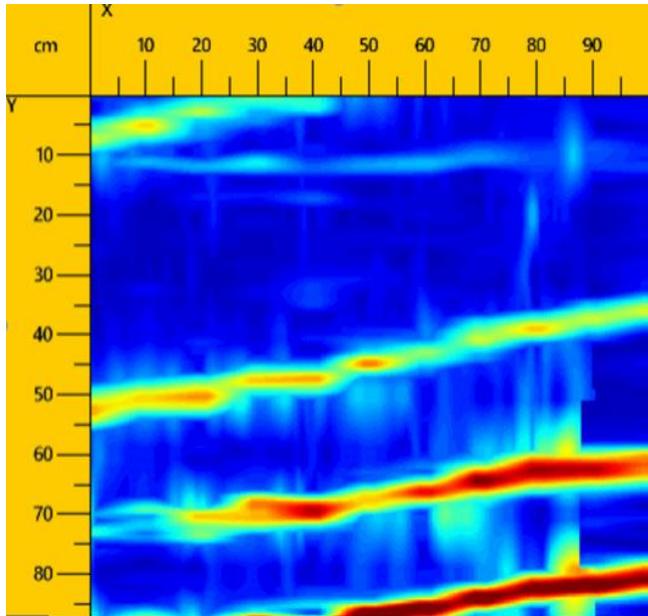


TENSA
GRUPPO ECCHER





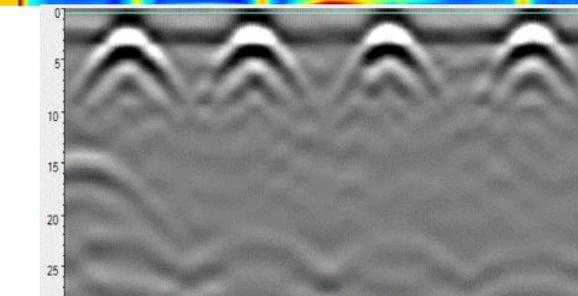
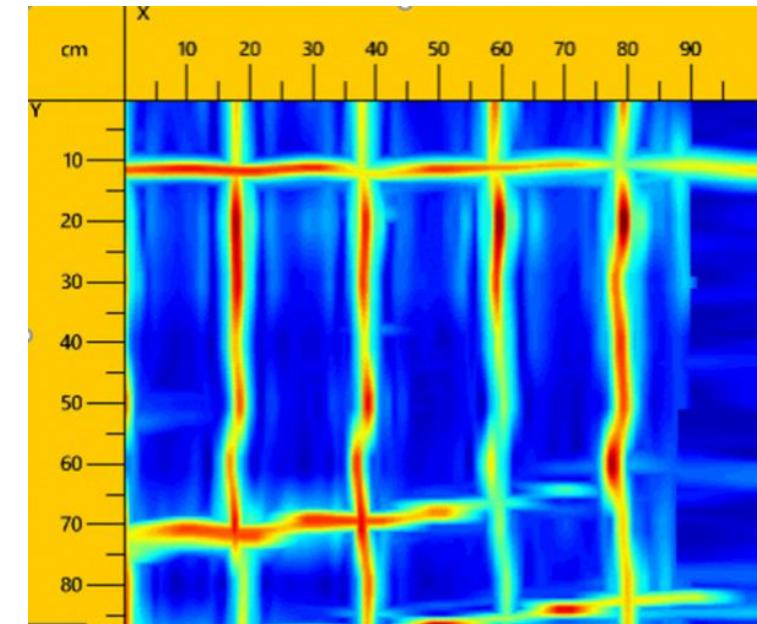
cavi e barra longitudinale



scan C

// alla superficie scansita

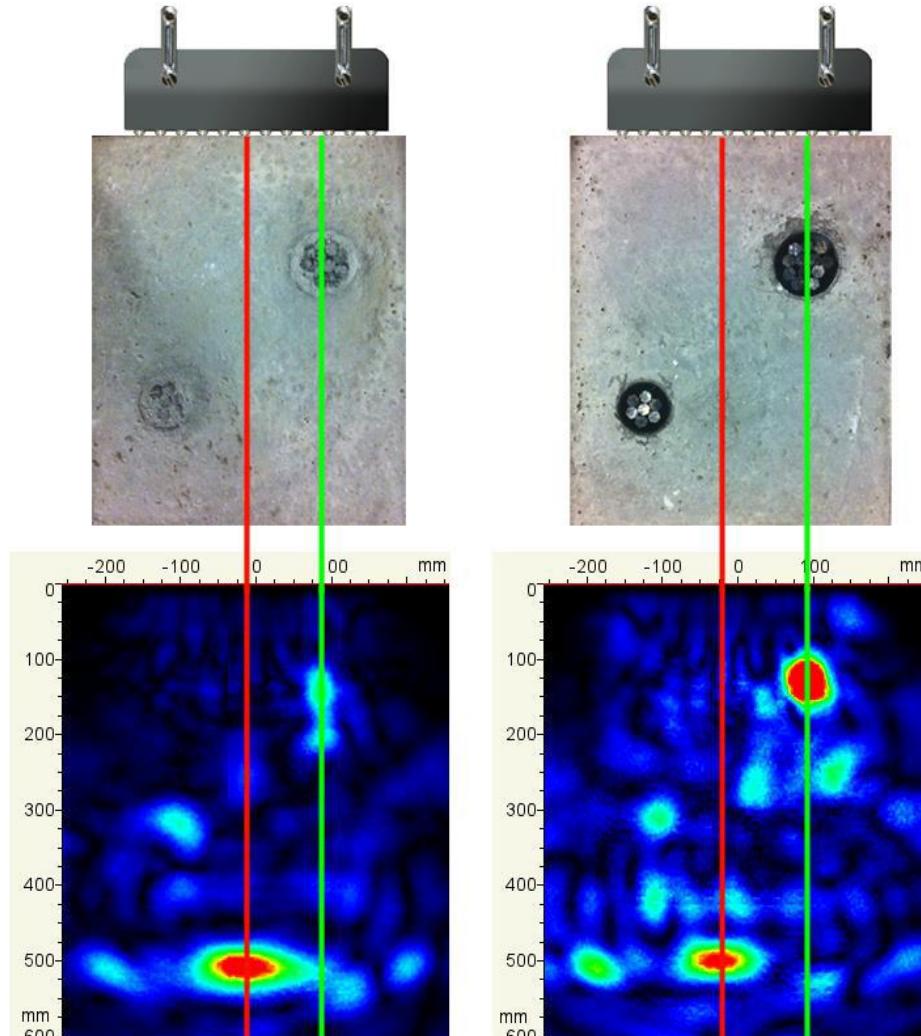
staffe



scan B

⊥ alla superficie scansita

tomografia ultrasonica pulse-echo



condizioni della malta all'interno delle guaine

- **intensità della riflessione**

vuoto → -100%

acciaio → +60%

metodo più diffuso

- **fase della riflessione**

vuoto → negativa

pieno → positiva

molto specialistico, risultati incerti

- **presenza di riflessioni secondarie**

vuoto → no

pieno → sì

spesso non visibili

- **analisi inversa delle forme d'onda**

modellazione elastodinamica

Modifica scheda ispezione speciale (in corso)

Schede di ispezione speciale - Ponti in c.a.p. a cavi post-tesi

Codice IOP _____ Nome Ponte/Viadotto _____

Strada di appartenenza: _____ Progressiva km iniziale: _____ Progressiva km finale: _____

Tracciato dei cavi e localizzazione dei difetti

Tracciato dei cavi reperibile da documenti di progetto originale SI NO

Allegato n° _____ (se SI, indicare i documenti di riferimento da allegare alla presente scheda)

Schema da progetto del tracciato dei cavi
(tracciare uno schema per ogni tipologia di elemento strutturale)

Indagini non distruttive/semi-distruttive	Elementi indagati (tipologia e numero)	N° totale di indagini eseguite
Tipologie di indagini (indagine pacometrichie, georadar, tomografie ultrasoniche, Impact-Echo, metodi MFL, misure di piontezzale di corrosione)	1) _____ 2) _____ 3) _____ 4) _____ ...) _____	_____

Risultati delle indagini (compilare una tabella per ogni elemento indagato e tipologia di indagine)

pag. 1

Modifiche e integrazioni alle attuali schede di ispezione speciale per i ponti in c.a.p. a cavi post-tesi

Raccolta maggiori informazioni per uniformare metodologie o comprendere diversità delle prove eseguite

Interazione con il task 4.3

Prova vacuometrica

Vacuometria: origine del metodo tradizionale

tecnica di iniezione
di guaine di post-tensione
in strutture esistenti

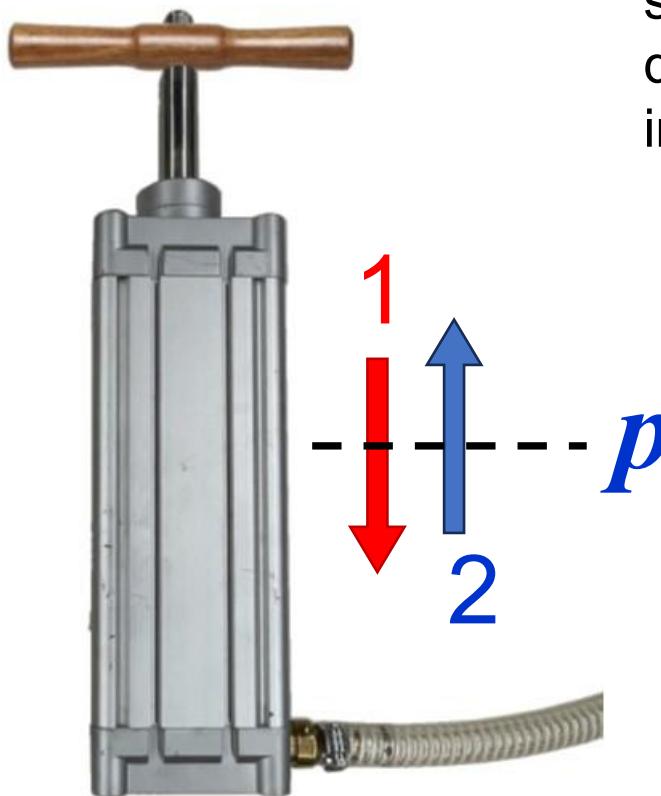
- il cavo con grouting difettoso deve essere sigillato
- una pompa per vuoto a due stadi crea un vuoto spinto
- una valvola a 3 vie collega il contenitore col materiale da iniettare che viene risucchiato nella cavità



Prova vacuometrica

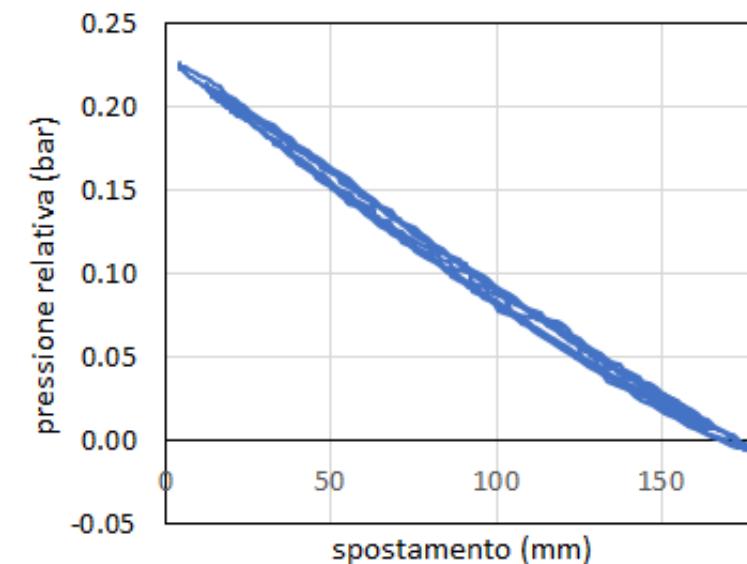
sviluppi di un approccio alternativo

- basato su una pompa volumetrica manuale (senza alimentazione AC)
- senza coinvolgere il vuoto spinto (vaporizzazione acqua)
- meno sensibile ad eventuali perdite



$$p \cdot V^n = \text{const}$$

si è osservato che i cicli pressione-volume descrivono una trasformazione politropica ($n=1.2$) in condizioni intermedie tra ciclo isotermo ($n=1$) e adiabatico ($n=1.4$)



$$V = p \frac{\frac{dV_2}{dt} - \frac{dV_1}{dt}}{\frac{dp_1}{dt} - \frac{dp_2}{dt}}$$

Acciaio



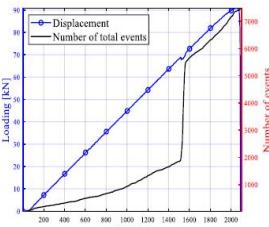
Experimental campaign

Classification problem

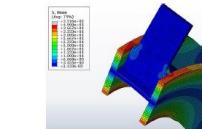


- 4 dogbone steel specimens were subjected to tensile tests until rupture.
- 2 welded
- 2 non-welded

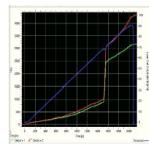
Background



Application to bridge structures



1) FEM study of the most vulnerable components



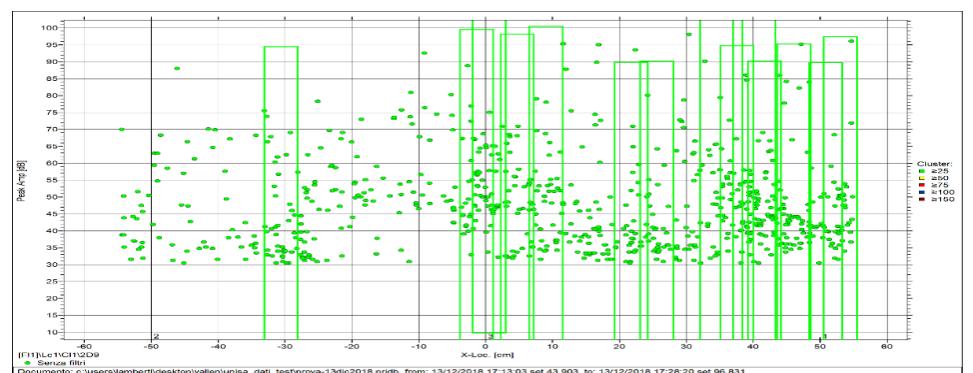
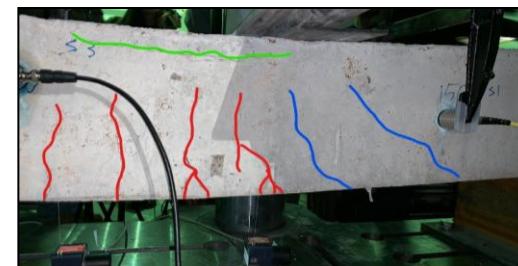
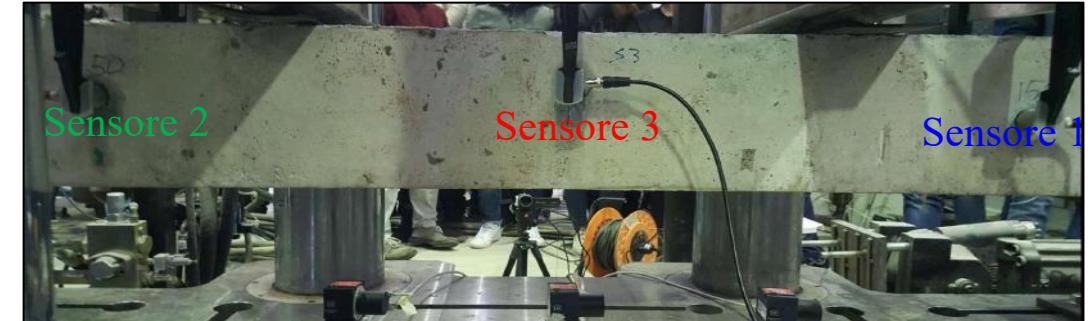
2) Experimental tests with AE sensors

3) Training of classification algorithms

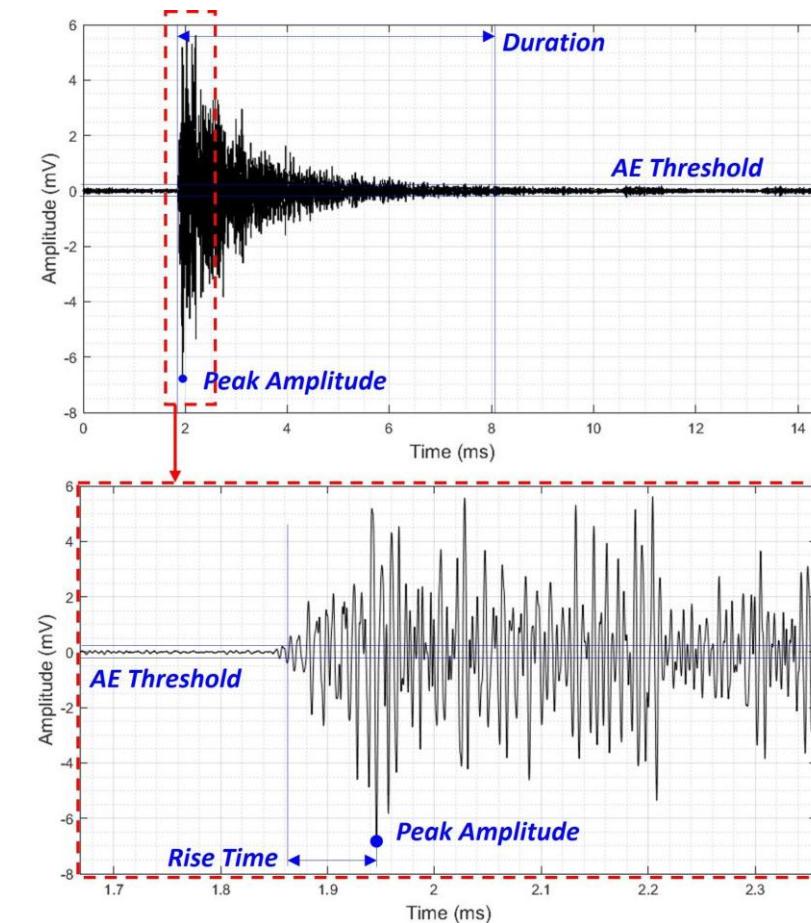


Planned Activities

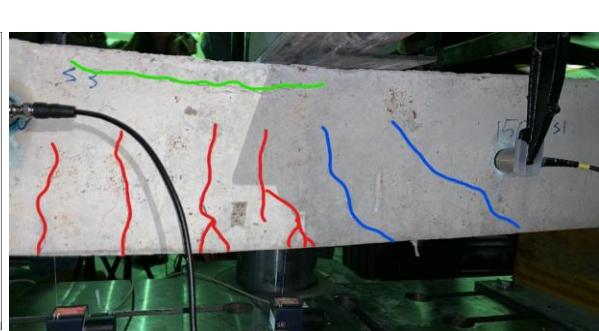
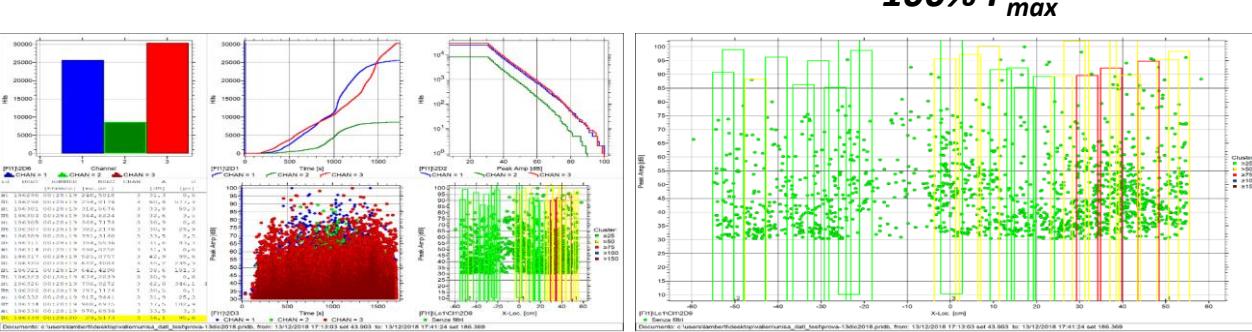
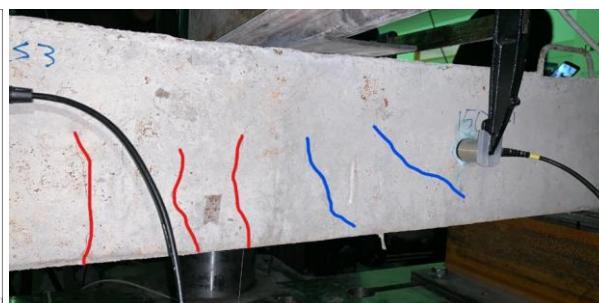
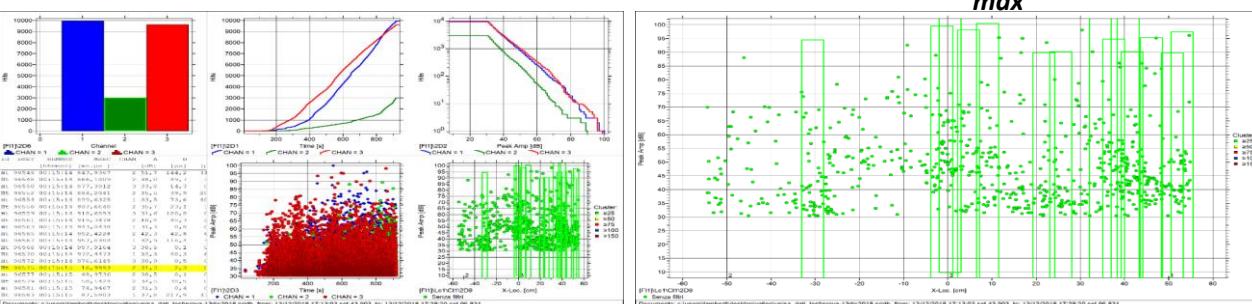
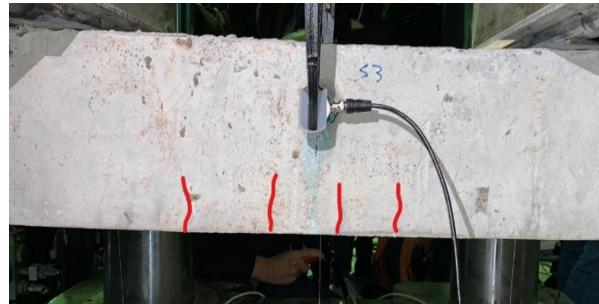
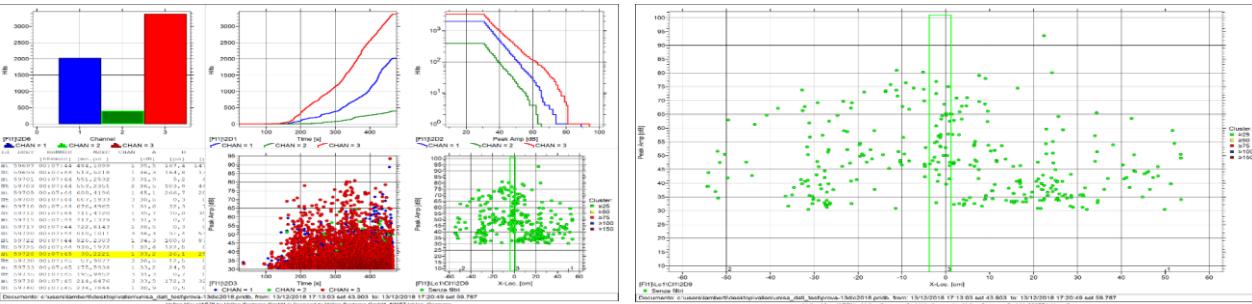
4) AE emissions analyses could help detect abnormal and/or dangerous stress/strain levels in the selected components



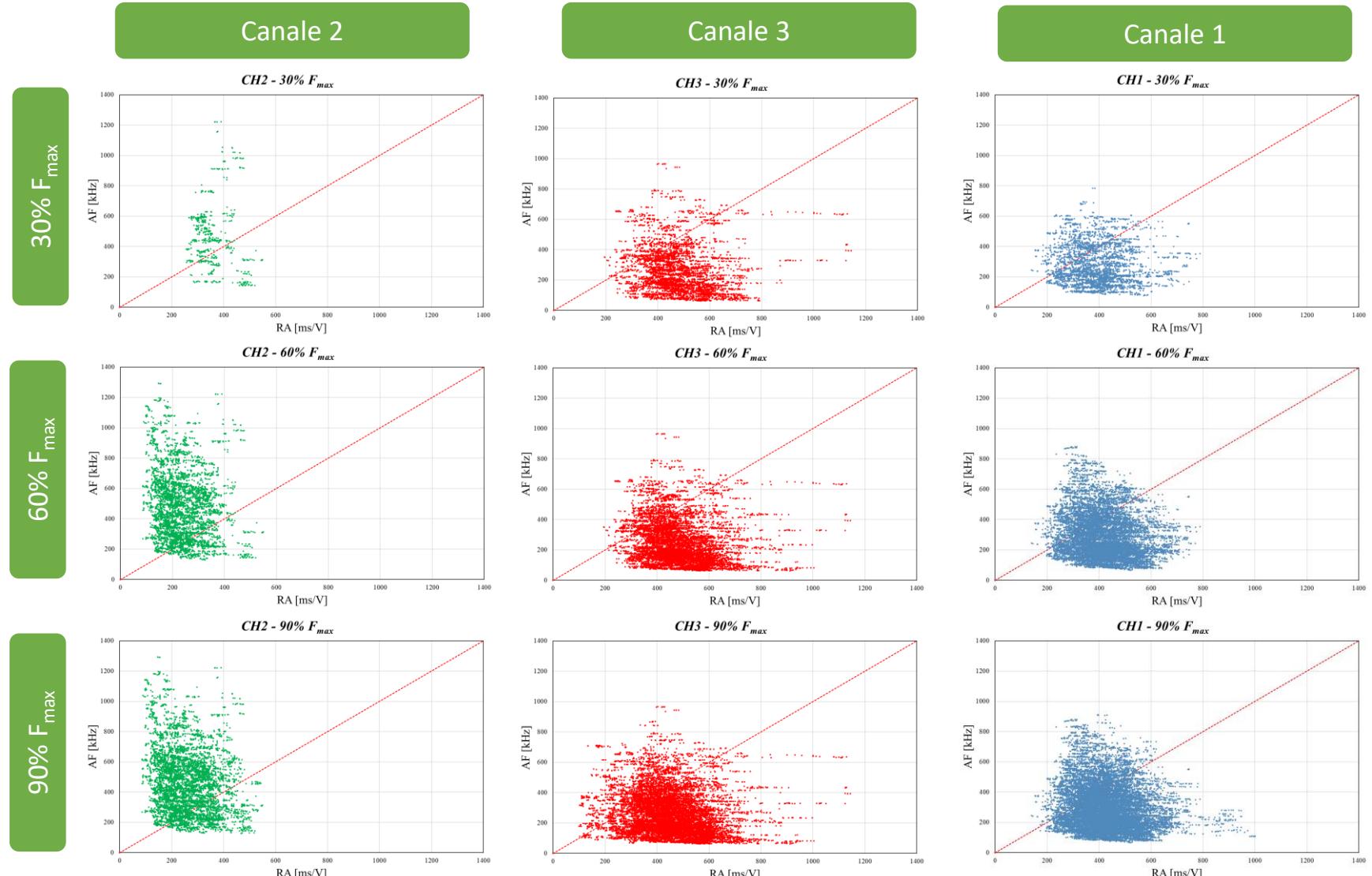
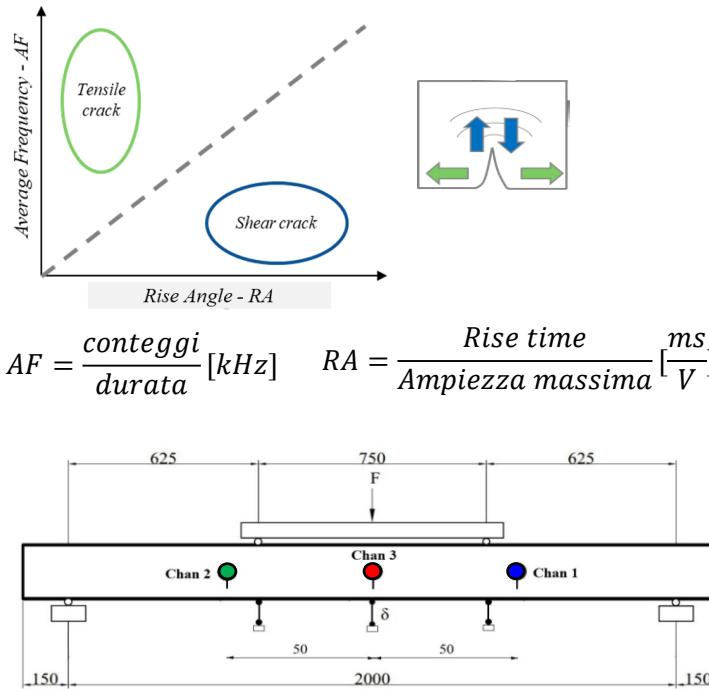
- Dettagli critici di ponti da monitorare con sensori AE possono venire identificati tramite modelli FE o l'esperienza dell'operatore.
- I segnali acustici vengono identificati tramite alcune caratteristiche principali impiegate nel monitoraggio continuo localizzato per individuare fratture o situazioni di crisi:
 - *Peak Amplitude*
 - *Duration*
 - *Rise Time*
 - *Counts*
 - *Energy*
 - *Signal Strength*



LOCALIZZAZIONE DEL DANNO



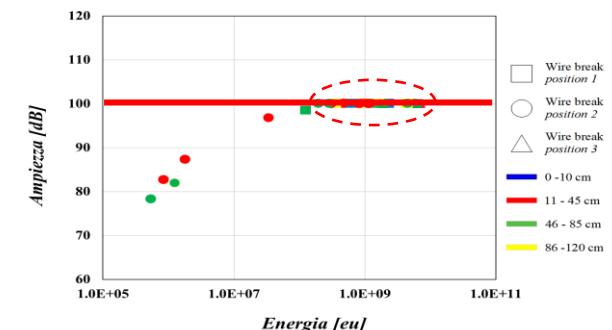
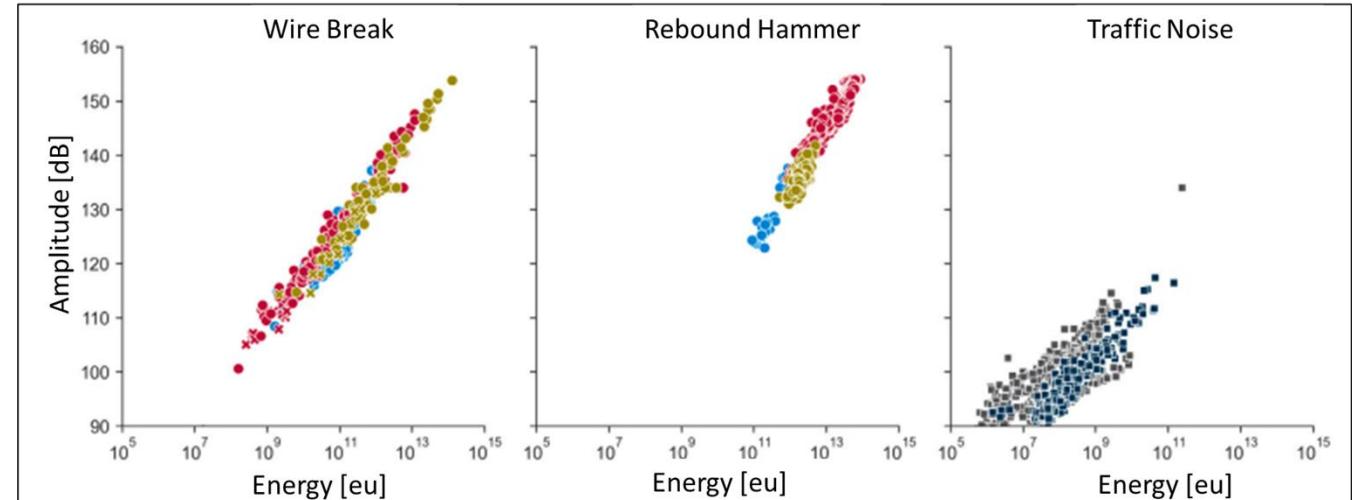
CLASSIFICAZIONE DELLA LESIONE



PARAMETRI RELATIVI ALLA ROTTURA DEL TREFOLO



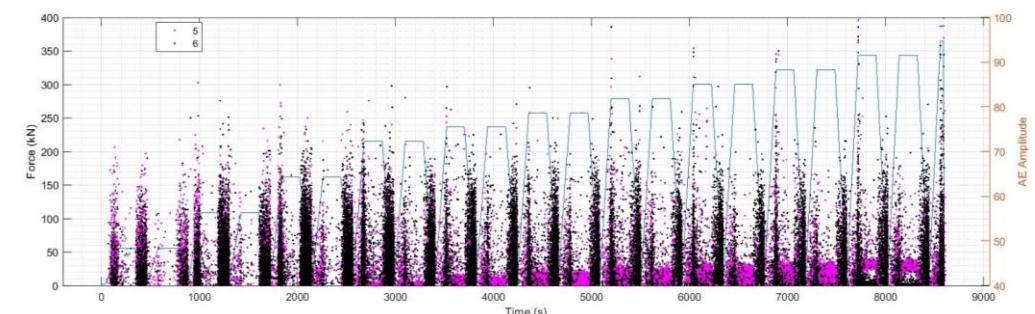
AMPIEZZA - ENERGIA



Metodo delle emissioni acustiche (EA) per il monitoraggio di dettagli critici in ponti in acciaio

- Individuazione di criteri di rottura [1] per identificare fratture nei ponti metallici tramite monitoraggio continuo localizzato.
- Diverse metodologie (metodi di classificazione, clustering, pattern recognition, modelli a elementi finiti) possono essere impieghiati per:
 - ricavare informazioni sui possibili stati di danno (snervamento e fatica ad alto numero di cicli)
 - separare segnali secondari (rumore) da segnali primari (apertura di microcricche, formazione delle fessure).
- Prove sperimentali possono essere impiegate come ausilio per la caratterizzazione del danno.

Criterio	Descrizione
1	$\text{PeakAmp} > 90 \text{ dB}$
2	$\text{Duration} > 30 \text{ ms} \div 60 \text{ ms}$ (Per i segnali con $\text{PeakAmp} > 90 \text{ dB}$)
3	$\text{Hit rate} > \sim 10^2 \text{ hit/min}$



1. Schultz, A. E., Morton, D. L., Tillmann, A. S., Campos, J. E., Thompson, D. J., Lee-Norris, A. J., (2014). Acoustic Emission Monitoring of a Fracture-Critical Bridge. St. Paul: Minnesota Department of Transportation

Metodo delle emissioni acustiche (EA) per il monitoraggio di ponti in acciaio

Vantaggi del metodo:

- Capacità di individuare e localizzare la formazione di cricche, grazie alla rilevazione e registrazione continua delle onde elastiche all'interno della struttura
- Non invasività: monitoraggio su una struttura senza interferire sulle relative attività

Svantaggi del metodo:

- Grande sensibilità: sensori captano qualsiasi onda nel campo degli ultrasuoni (es.: attrito tra componenti, passaggio di veicoli sui giunti di dilatazione, la pioggia sulle componenti strutturali).
- Grandi volumi di dati: necessità di distinguere i segnali significativi dovuti al rumore.

Metodo delle emissioni acustiche (EA) per il monitoraggio di ponti in cap

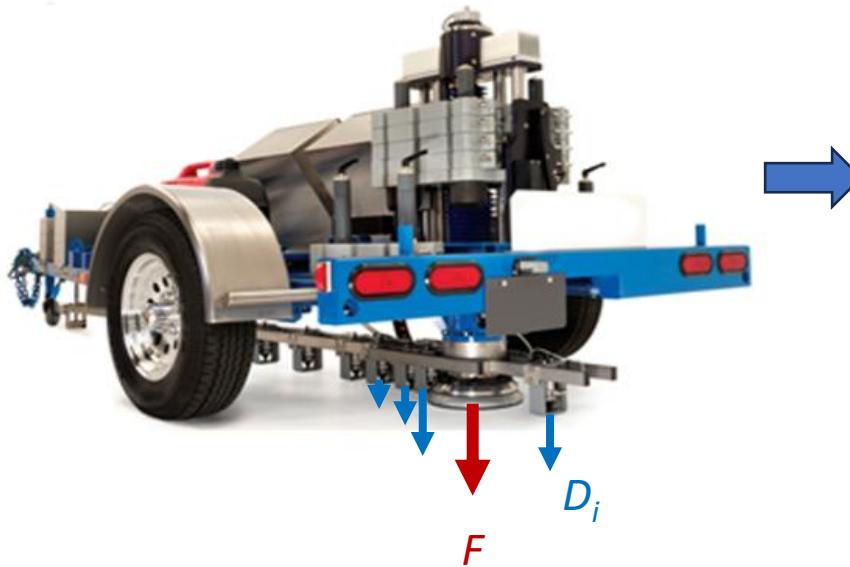
Punti di forza del metodo:

- Permette di localizzare i danni, anche con sensori posizionati a distanza.
- Rileva la rottura di un trefolo grazie a specifici parametri EA.
- Consente di monitorare l'avanzamento del processo di corrosione.
- Fornisce un'analisi dell'intensità del danno per valutarne il grado.

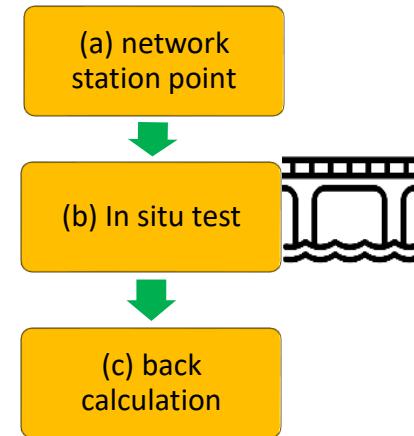
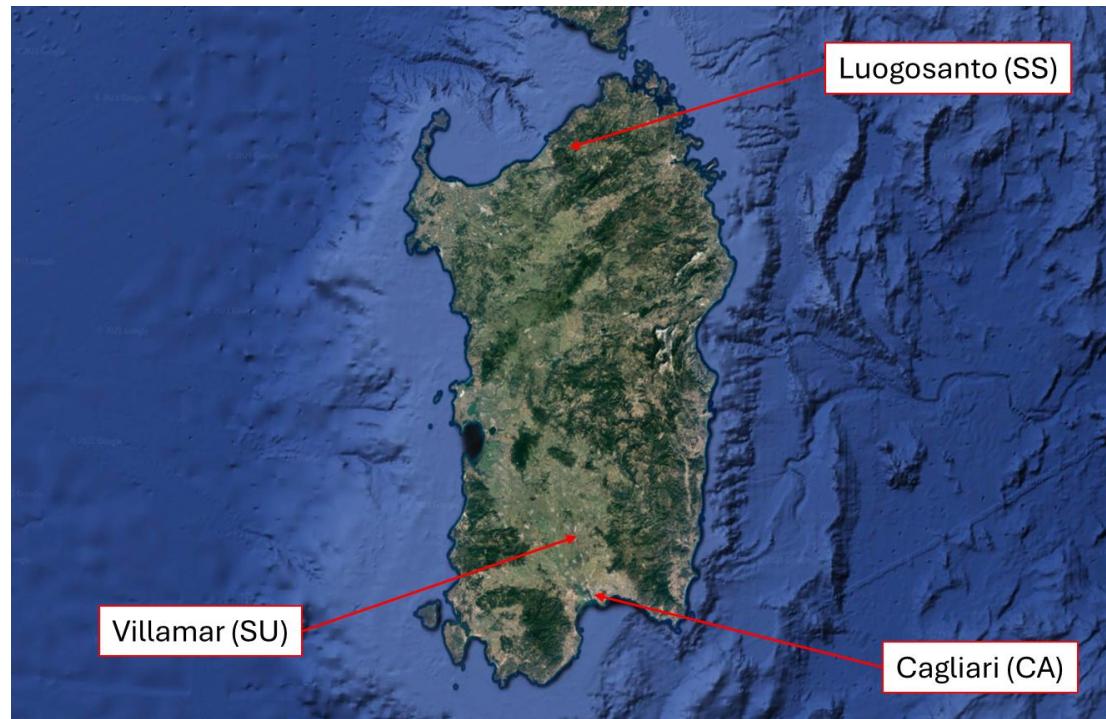
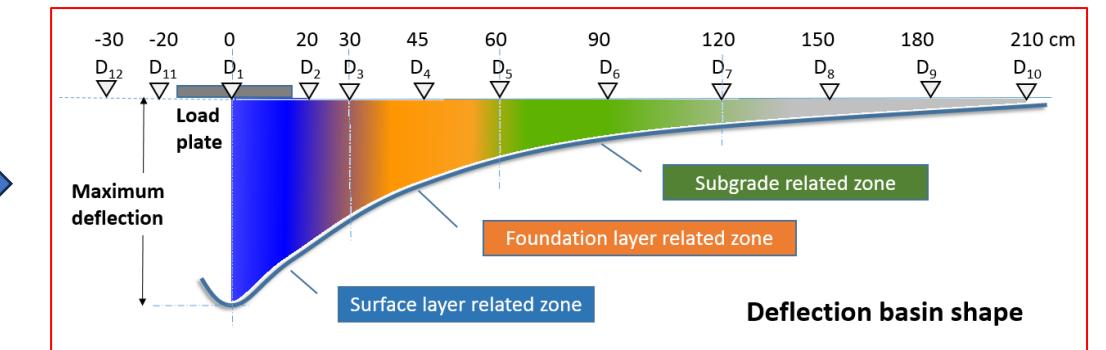
Debolezze del metodo:

- Richiede un'installazione a medio-lungo termine.
- Non è in grado di rilevare corrosioni/danni preesistenti.
- La gestione dei dati è complessa e necessita di analisi avanzate.

FFWD – Fast Falling Weight Deflectometer



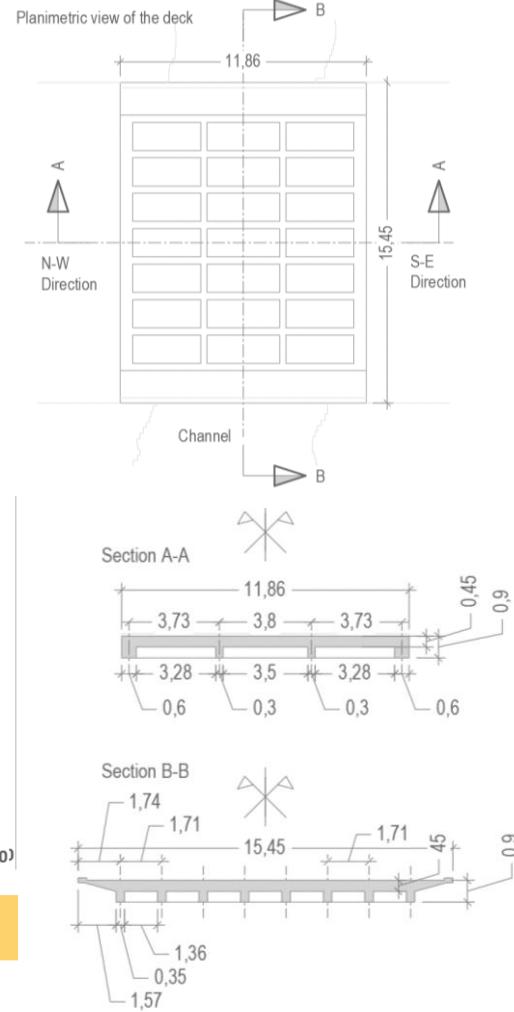
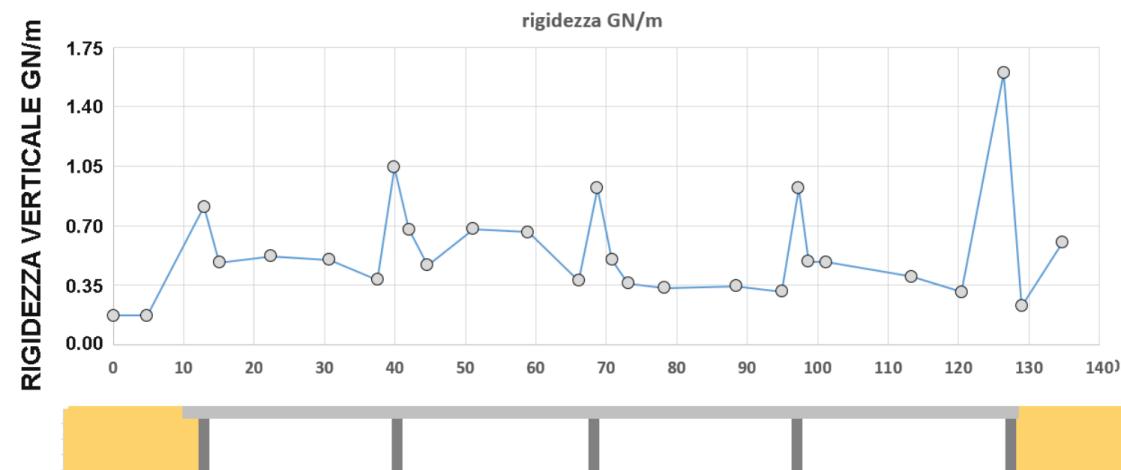
- typical application: pavement airport;
- falling mass (from 50 to 350 kg);
- load impulse (40-120 kN);
- application of the impulse: circular steel plate, $\Phi = 300$ mm;
- Record of the deflection: 11 geophones



The analysis of the deflection basin for each drop furnish information about the inferior layer condition.

FFWD - Fast Falling Weight Deflectometer

The bridge of Quartu (CA): r.c. grid plate



Le linee guida su...

Identificazione dinamica e prove statiche



6.3.3.5 Riduzione delle incertezze di modellazione

Relativamente ai coefficienti di sicurezza dei carichi permanenti, nel caso di strutture esistenti, in funzione del livello di approfondimento delle indagini condotte in termini di misure geometriche, caratteristiche dei materiali, modellazione strutturale, eventuali analisi di identificazione dinamica, riscontro con prove di carico di progetto, si può ottenere una riduzione significativa delle incertezze di modello e, quindi, un'ulteriore riduzione del fattore parziale, che dunque assume il seguente valore:

$$\gamma_G = 1.10$$

Data la rilevanza delle strutture da ponte e la necessità di conoscenza del comportamento reale della struttura in vista del monitoraggio della stessa, è consigliata la scelta e l'aggiornamento del modello complessivo strutturale anche mediante confronti con prove statiche ed eventualmente con analisi di identificazione dinamica. È suggerito, specialmente nel caso di strutture da ponte dal comportamento complesso, la riduzione dell'incertezza di modello strutturale.

In altri termini, l'identificazione dinamica, in unione alla riproduzione delle prove di collaudo dell'epoca, ove disponibili, o con prove di carico progettate ad hoc, consentono di calibrare opportunamente i modelli numerici alla base delle calcolazioni, ridurre le incertezze di modello nella definizione di coefficienti di sicurezza parziali e permettere un monitoraggio affidabile (si veda per un'estensiva descrizione delle prove statiche e dinamiche e dei sistemi di monitoraggio i § 7.5 e § 7.6). Le prove di collaudo statico e prove eventualmente progettate ad hoc hanno il vantaggio di riprodurre stati tensionali, per quanto in regime di elasticità, più elevati rispetto alle condizioni ordinarie della struttura, riconducibili ad una combinazione rara dei carichi variabili. L'analisi modale sperimentale basata sull'applicazione di un input noto alla struttura risulta particolarmente onerosa nel caso di grosse strutture quali i ponti. In alternativa, prove di identificazione dinamica in condizioni di input incognito (Analisi Modale Operativa - OMA) quale il rumore ambientale, consentono spesso di ottenere informazioni significative sul comportamento strutturale del ponte in esame.

Aggiornamento del modello numerico

Manuale per i professionisti
PRONTO ALL'USO!



Redazione

UNIPD: Prof.ssa da Porto

UNINA: Prof.ssa Pecce

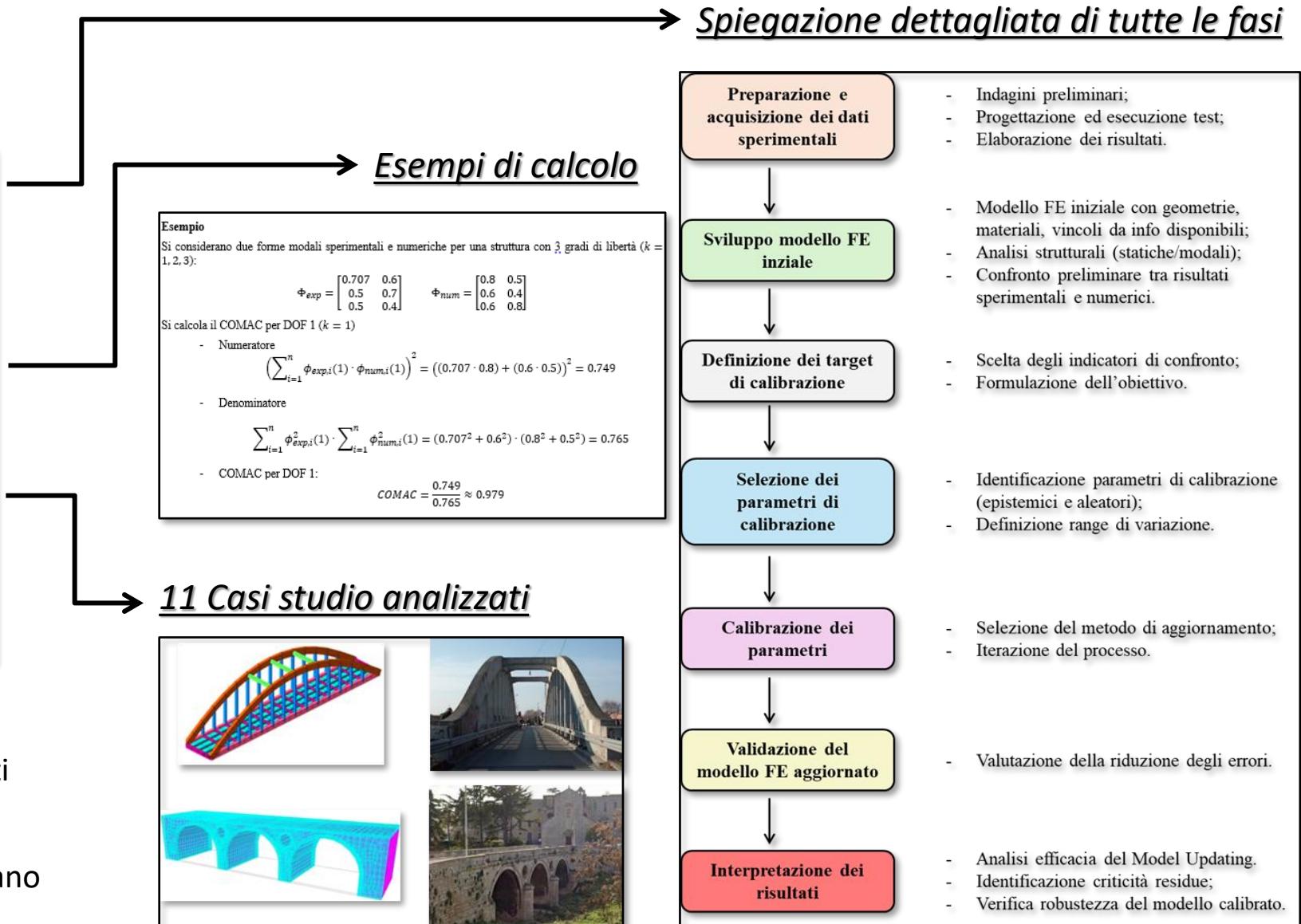
Contributi

POLIBA: Prof.ssa Foti

UNIBG: Prof. Riva

UNIFI: Prof. De Stefano

UNINA: Bilotta



Omogeneizzazione dei casi studio

11 Casi studio analizzati (calibrazione modello FE da prove di identificazione dinamica)

Ponte a travata mista in curva

Foto caso studio



Ponti ad arco in muratura



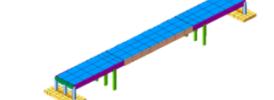
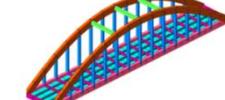
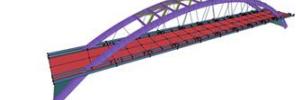
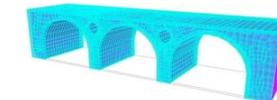
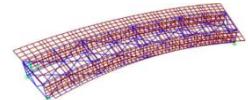
Ponti ad arco a via inferiore in CA



Cavalcavia sella Gerber



Modello FE



Metodologia di calibrazione

Automatica

Manuale

Manuale

Automatica

Automatica

Automatica e Manuale

Automatica

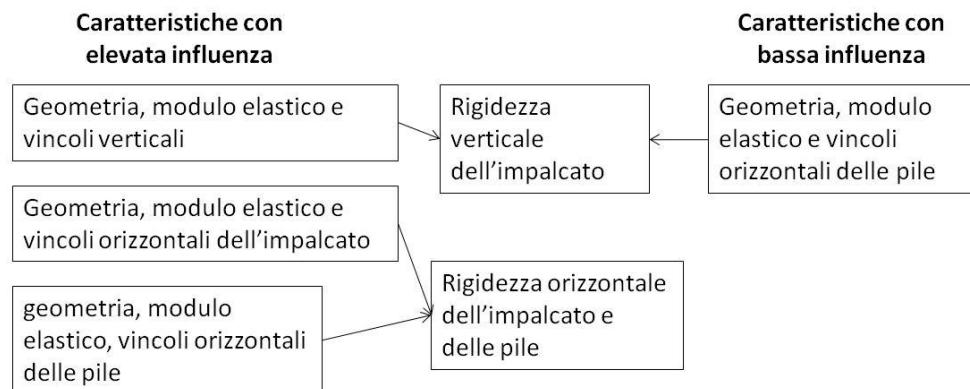
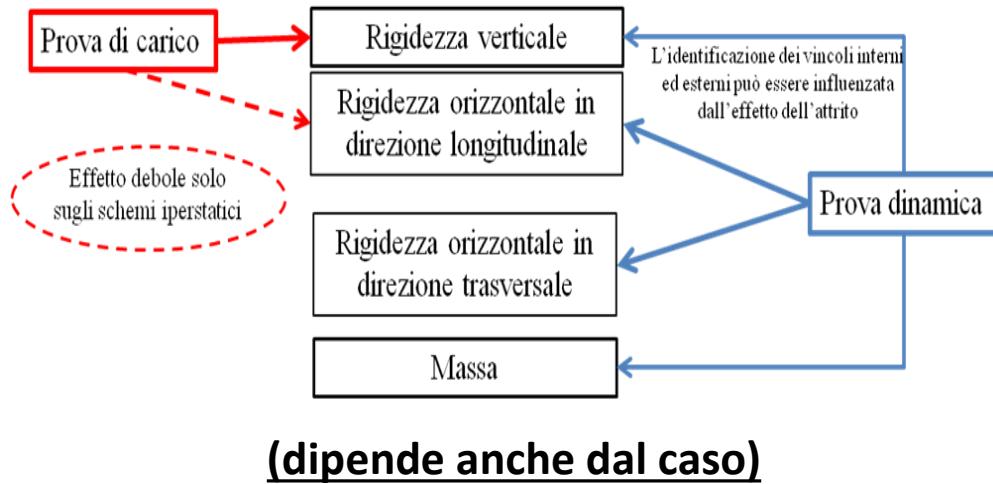


accelerometri piezoelettrici



triaxiali MEMS

Dati eterogenei da prove diverse con strumenti differenti aumentano l'affidabilità dell'identificazione



Aspetti specifici del processo di identificazione

➤ Scelta delle misure (spostamenti, rotazioni, deformazioni) che possono fornire informazioni sulla risposta globale e locale

➤ Scelta del processo di calibrazione:

- dati statici e dinamici separatamente
- dati statici e dinamici contemporaneamente
- prima un tipo e poi l'altro

➤ Scelta indicatori di calibrazione

(ad es. DAC Displacement Assurance Criterium per statica analogo al MAC Modal Assurance Criterium per dinamica)

➤ Scelta delle funzioni obiettivo : semplici o multi-risposta

$$J_{6,k} = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} |z_{k,nj} - z_{k,ej}|}{\sum_{j=1}^{n_k} |z_{k,ej}|}$$

numerico "n"
sperimentale "e"

può essere pesato (w)

$$J_6 = \sum_{i=1}^k w_i J_{6,k}$$

Schlune H., Plos M., Gylltoft K. (2009) Improved bridge evaluation through finite element model updating using static and dynamic measurements, Eng. Struct., 31, 1477-1485.
 doi:10.1016/j.engstruct.2009.02.011

Manuale per applicazione LLGG

Strumento per sensibilizzare gli operatori sull'importanza del corretto progetto del sistema di monitoraggio



Combinare aspetti teorici e pratici per la progettazione dei sistemi di monitoraggio

- supportare i **professionisti del settore**
- fornire linee guida per la **gestione e l'analisi** dei dati nel corso della vita del sistema di monitoraggio
- fornire strumenti per il **supporto alle decisioni** al gestore dell'infrastruttura
- Progetto dei sistemi di monitoraggio per i ponti
 - specifiche tecniche, fenomeni misurabili, tecniche di monitoraggio statico e dinamico
- Analisi e gestione dei dati
 - rimozione degli effetti ambientali, identificazione delle anomalie, trasmissione e salvataggio dei dati
- Supporto alle decisioni
 - utilizzo dei dati per la gestione della struttura e dell'infrastruttura
- Casi studio
 - volti a fornire un supporto pratico all'operatore



Criteri e metodologie per la progettazione dei sistemi di monitoraggio dei ponti

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	Progetto dei sistemi di monitoraggio per i ponti	6
2.1	Fenomeni misurabili tramite monitoraggio	7
2.2	Descrizione di un sistema di monitoraggio	9
2.2.1	Architettura del sistema di monitoraggio	9
2.2.2	Specifiche metrologiche	10
2.2.3	Strumenti per monitoraggio statico	11
2.2.4	Strumenti per monitoraggio dinamico	13
2.3	Le tecniche per il monitoraggio periodico e continuo	15
2.3.1	Analisi delle vibrazioni	15
2.3.2	Analisi delle anomalie nelle misure statiche	16
2.4	Monitoraggio sismico	16
3	Analisi e gestione dei dati	18
3.1	Ottimizzazione del posizionamento dei sensori	18
3.1.1	Algoritmi di ottimizzazione per il posizionamento dei sensori	19
3.1.2	Metodi di valutazione della configurazione ottimale	20
3.1.3	Esempio numerico di applicazione di algoritmi di sensor placement	26
3.2	Depurazione degli effetti ambientali	27
3.2.1	Comportamento vibrazionale	28
3.3	Identificazione delle anomalie	39
3.3.1	Metodi data-driven	39
3.3.2	Metodi basati sull'aggiornamento di modelli	45
3.4	Trasmissione e salvataggio dei dati	48
3.4.1	Analisi delle criticità attuali	48
3.4.2	Prospettive future	51
4	Supporto alle decisioni	52
4.1	Modello probabilistico di affidabilità	53
4.2	Modello di Esposizione	55
4.3	Scenari decisionali	60
5	Casi studio	64
5.1	Descrizione delle strutture	64
5.1.1	Breve inquadramento strutturale delle opere	64
5.2	Analisi dei sistemi di monitoraggio	64
5.2.1	Fenomeni monitorati	64
5.2.2	Correlazione con il degrado	64
5.3	Analisi dei dati	65
5.3.1	Metodologie di analisi usate	65
5.3.2	Discussione dei risultati più significativi	65
6	Appendice	66
7	Riferimenti bibliografici	134

a cura di Bilotta, Limongelli, Rainieri, Savoia, Zonta

con il contributo di De Angelis, De Stefano, Foti, Maddaloni, Manna, Pagnini, ...

Introduzione al progetto dei sistemi di monitoraggio per i ponti

La **UNI/TR 11634:2016** definisce le **diverse fasi della progettazione** di un sistema di monitoraggio :

1. **Definizione** degli **obiettivi generali** del monitoraggio;
2. **Analisi** della **struttura** e **definizione** degli **obiettivi specifici** per il Sistema;
3. **Strategia di misura** e definizione della **rete di sensori**;
4. Definizione della **modalità di acquisizione**;
5. Definizione degli **algoritmi di trattamento** dei **dati**;
6. Scelta dei **modelli interpretativi**;
7. Eventuale definizione delle **procedure decisionali**;
8. Verifica dei **requisiti di accuratezza** del sistema.

Obiettivo: fornire **indicazioni pratiche**: (i) **grandezze misurabili**, (ii) **loro utilità** e (iii) **sensoristica adatta** alla loro misurazione.

Procedura di ottimizzazione del posizionamento dei sensori (OSP)

UNIRC

Input:

- a) Modello numerico
- b) Configurazione iniziale di S sensori
- c) Modi target

Tecniche di OSP:

- Modal kinetic energy¹
- Effective independence²
- Information entropy³

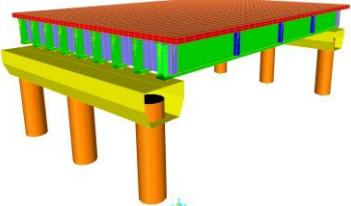
Output tecniche OSP:
 - Graduatorie posizioni degli S sensori

Approccio iterativo:
 Configurazioni definite variando numero di sensori considerati rispettando graduatorie tecniche OSP

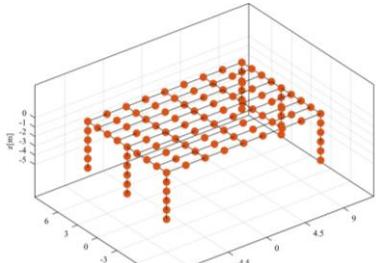
Simulazione prova di identificazione dinamica (eccitazione modello numerico con rumore bianco)

Per ognuna delle configurazioni definite:

a)



b)

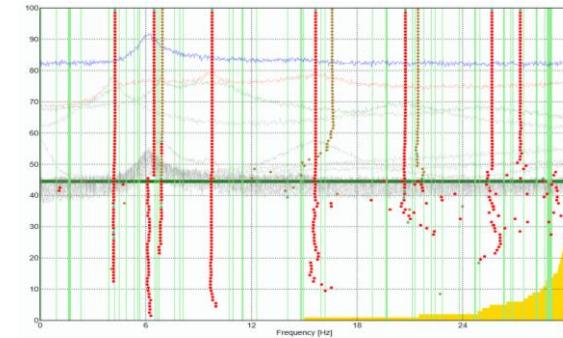


c)

N.	f (Hz)	M_x (%)	M_y (%)	M_z (%)
1	4.18	9.83E+01	7.17E-15	4.22E-13
2	6.15	1.61E-12	9.71E-05	5.08E+01
3	6.90	2.40E-12	3.17E+00	2.44E-03
4	9.79	3.56E-14	9.52E+01	2.28E-06
5	15.92	4.06E-13	6.83E-06	1.00E-02
6	21.57	5.61E-01	7.37E-12	1.73E-10
7	21.85	2.69E-03	2.62E-11	4.30E-10
8	26.74	2.66E-12	1.17E+00	4.06E-07
9	27.98	1.41E-05	4.04E-10	3.78E-10

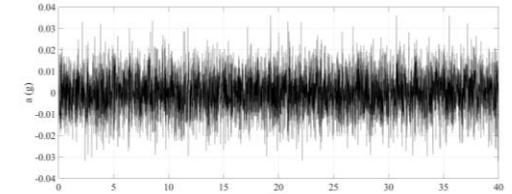
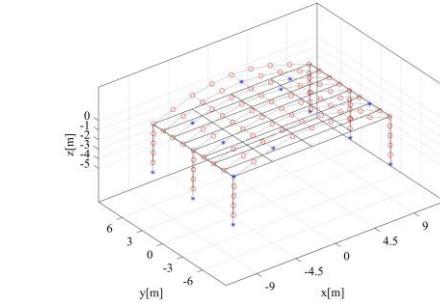
1) Cumulative frequency error⁴:

Errore tra frequenze identifyate con accelerazioni simulate e frequenze target (modello numerico)



2) Modal assurance criterion⁵:

Confronto tra forme modali interpolate e forme modali target (modello numerico)



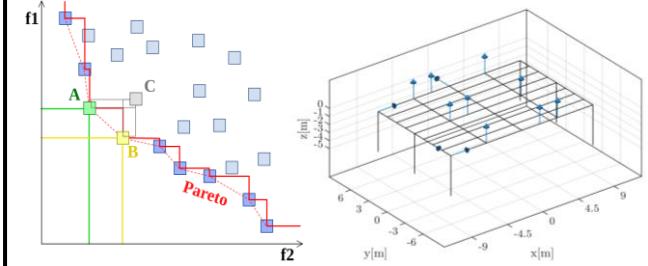
3) Relative dispersion index⁶:

Confronto tra energia catturata dalla configurazione considerata ed energia totale (modello numerico)

Output:

Configurazione ottimale (approccio Pareto⁷) - configurazione che minimizza il numero di sensori e ottimizza le tre metriche considerate

Configurazione ottimale



1. Heo et al. (1997); DOI: 10.1016/S0267-7261(97)00010-9

2. Kammer (1991); DOI: 10.2514/3.20635

3. Papadimitrou (2004); DOI: 10.1016/j.jsv.2003.10.063

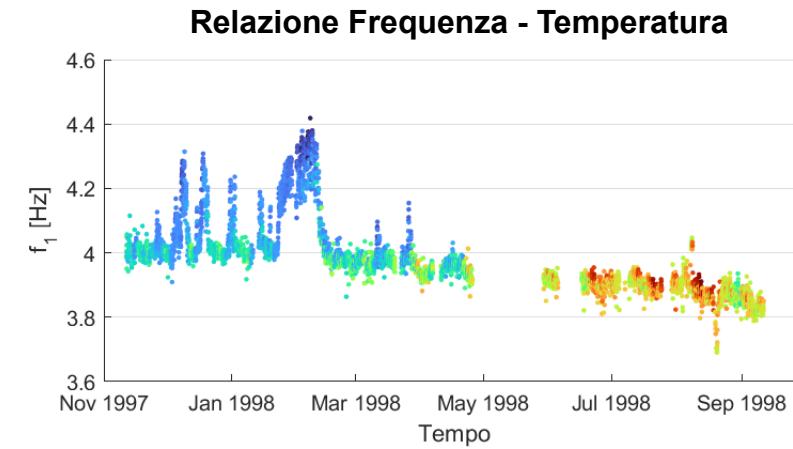
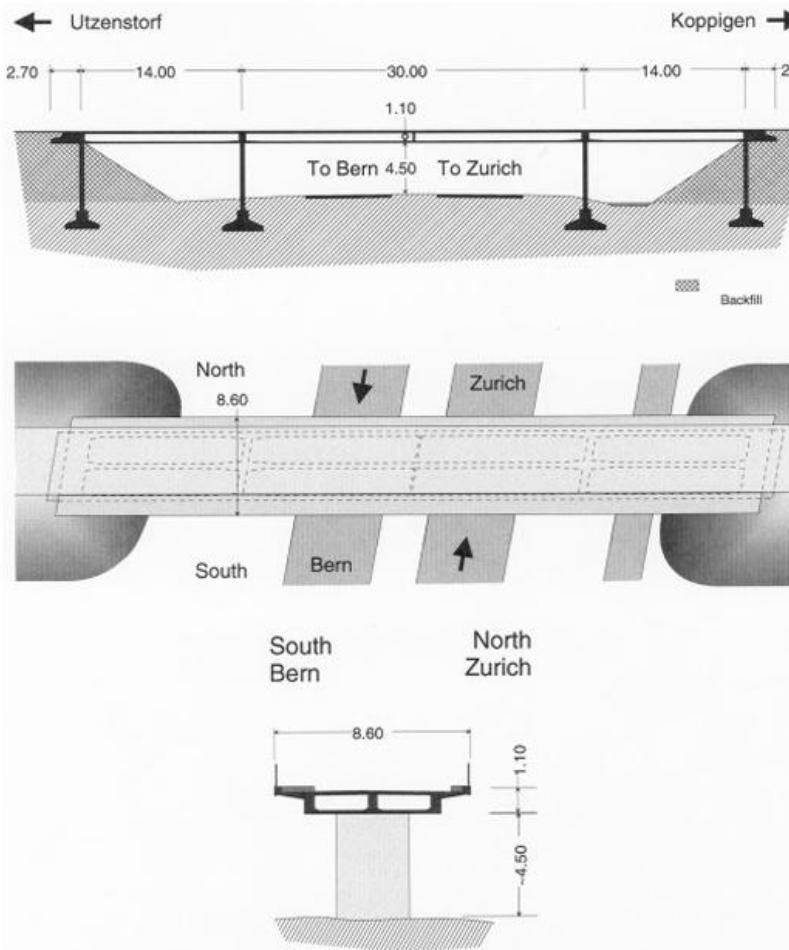
4. Chioccarelli et al. (2024); DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118000

5. Pastor et al. (2012); DOI: 10.1016/j.proeng.2012.09.551

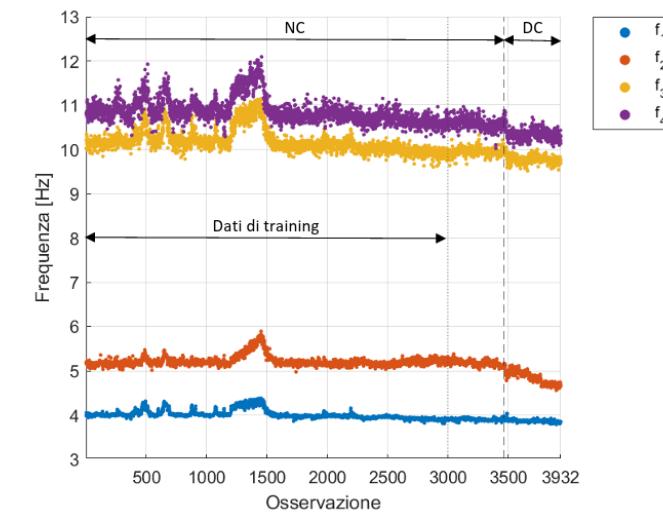
6. Dertimanis (2013); DOI: 10.1177/1077546313501536

7. Coello et al. (2009); DOI: 10.1080/10651240802683660

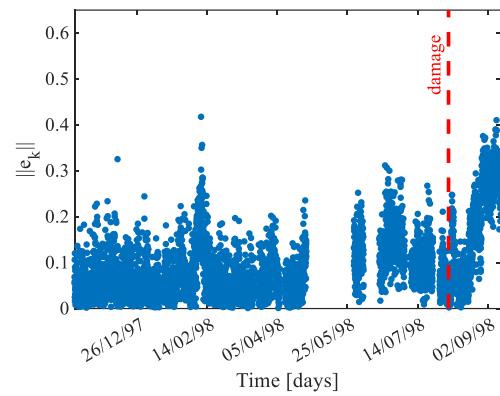
Depurazione degli effetti ambientali



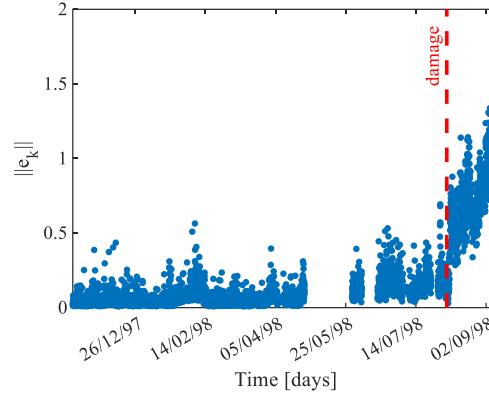
Descrizione del dataset



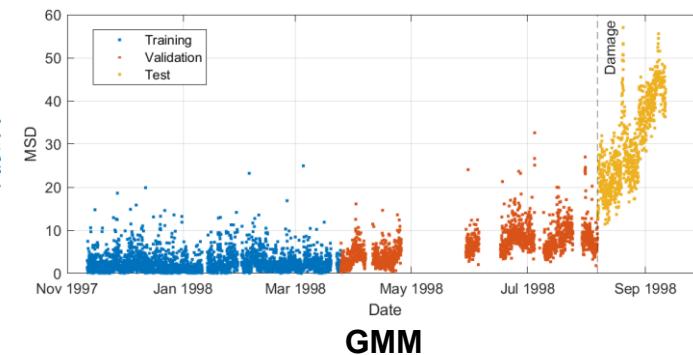
Depurazione degli effetti ambientali



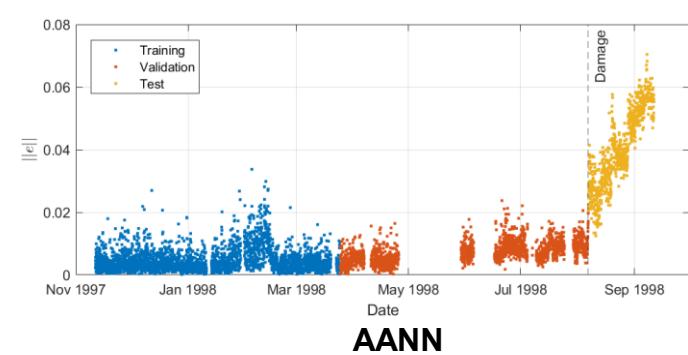
PCA



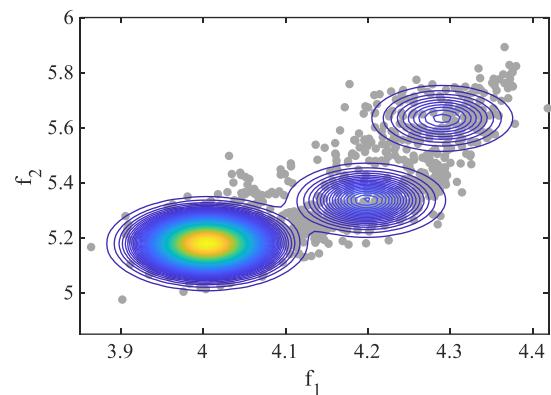
kPCA



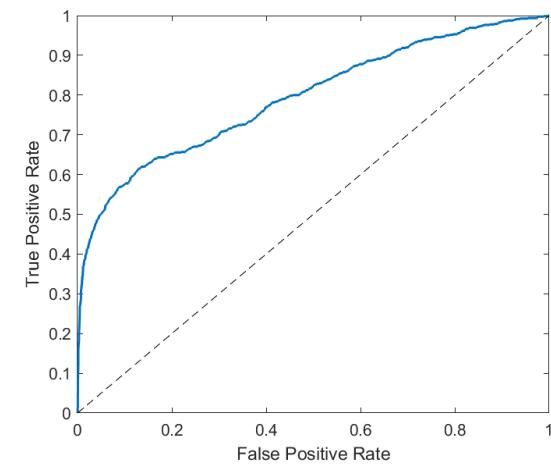
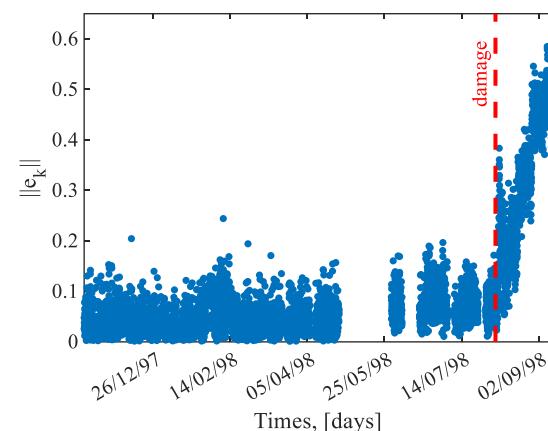
GMM



AANN

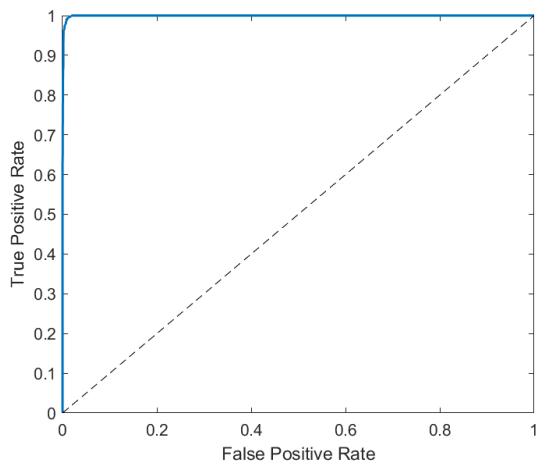


GMM seguito da local PCA

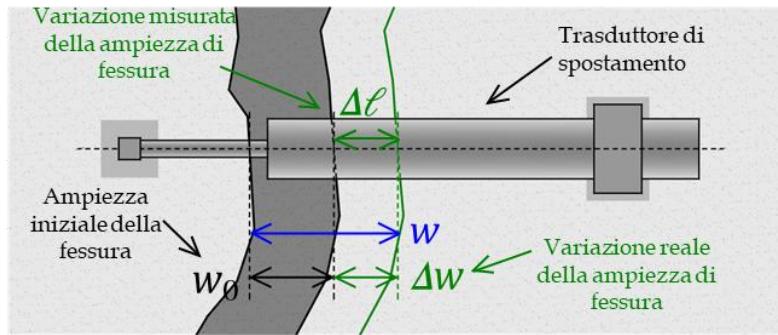


ROC lineare vs. non-lineare

Compensazione effetti ambientali richiede opportune selezione della metodologia di analisi, in grado di tener conto di eventuali non linearità del dataset



Supporto alle decisioni - Esempio scenario decisionale



Dati di input: $w_u = 200 \mu\text{m}$ $w_0 = 40 \mu\text{m}$

Funzione di stato limite: $z = x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_n + x(\theta)$
 $z = w_u - w = (w_u - w_0) - \Delta w$

Dove:

- $\boxed{\Delta l_{lim}} = -\frac{x_0}{k} = -\frac{w_u - w_0}{-1} = w_u - w_0 = 160 \mu\text{m};$
- $k = dz/d\theta = -1;$
- $\boxed{\sigma_\alpha} = 0$, un'unica variabile in funzione dell'osservazione;
- $\boxed{\bar{\beta}} \rightarrow$

\bar{P}_F	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.50	$2.56 \cdot 10^{-3}$	$1.07 \cdot 10^{-2}$
$\bar{\beta}$	4.26	3.72	3.09	2.33	1.28	0	2.8	2.3

Calcolo di Media e Dev. Std. delle variabili:

	Simbolo	Descrizione	Media	Dev. Std.
y	Δl	Misura della variazione di apertura di fessura	Δl	$\sigma_{\Delta l} = 10-20-50 \mu\text{m}$
θ	Δw	Variazione di apertura di fessura	-	-
x_0	$w_u - w_0$	Scarto fra limite di apertura e apertura iniziale	-	-
$x(\theta)$	$w(\Delta w)$	Variazione di apertura di fessura	-	-

$$\bar{y} = y_{lim} - \bar{\beta} \cdot \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_\alpha^2}$$

$$\bar{\Delta l} = \Delta l_{lim} - \bar{\beta} \cdot \sqrt{\sigma_{\Delta l}^2 + \sigma_\alpha^2} = 160 \mu\text{m} - \bar{\beta} \cdot \sigma_{\Delta l}$$

La **soglia $\bar{\Delta l}$** in funzione di $\bar{\beta}$ e $\sigma_{\Delta l}$:

$\bar{\Delta l}$ [μm]	\bar{P}_F								<i>FiB CC3</i>	<i>FiB CC2</i>
		10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.50	$2.56 \cdot 10^{-4}$	$1.07 \cdot 10^{-3}$
$\sigma_{\Delta l} = 50 \mu\text{m}$	$\bar{\beta}$	4.75	4.26	3.72	3.09	2.33	1.28	0.00	2.80	2.30
$\sigma_{\Delta l} = 20 \mu\text{m}$		-	-	-	5	44	96	160	20	45
$\sigma_{\Delta l} = 10 \mu\text{m}$		65	75	86	98	113	134	160	104	114
		112	117	123	129	137	147	160	132	137

- Se $\Delta l \geq \bar{\Delta l}$, conviene intervenire riparando il ponte;
- Se $\Delta l < \bar{\Delta l}$, conviene non intervenire sul ponte.

Schedatura dei sistemi di monitoraggio

Descrizione generale			
Tipologia Strutturale	Rappresentazione schematica		
e.g. travata, numero di campate, dimensioni campata/e monitorata, schema isostatico/iperstatico oppure ponte ad arco, via superiore/inferiore, luce	Immagine	Schema	
Descrizione del contesto	Potenziale rischio frane	Potenziale rischio idraulico	Pericolosità sismica
			(e.g. PGA/topografia)
Descrizione generale del potenziale difetto/malfunzionamento e/o degrado	Inserire descrizione generale		
Obiettivo del monitoraggio	Descrizione eventuale obiettivo già raggiunto o potenziale obiettivo e.g. aggiornamento del modello/gemello digitale (indicare tipo modello); identificazione di anomalia (indicare quale); fenomeno di corrosione incipiente; valutazione post sisma; potenziale scalzamento della pila; fenomeno di frana in corso; vibrazioni eccessive; deformazioni eccessive; transiti eccezionali;		
Stato di conoscenza dell'opera	Documentazione di progetto e/o intervento	Rilievo/Saggi	Prove distruttive e/o non distruttive
<input type="checkbox"/> Relazione	<input type="checkbox"/> Ispezione	<input type="checkbox"/> Carotaggi	
<input type="checkbox"/> Tavole	<input type="checkbox"/> Geometria	<input type="checkbox"/> Martinetti piatti	
<input type="checkbox"/> As built	<input type="checkbox"/> Dettagli costruttivi	<input type="checkbox"/> Ultrasuoni	
<input type="checkbox"/> ...	<input type="checkbox"/> ...	<input type="checkbox"/> Sclerometro	
<input type="checkbox"/> ...	<input type="checkbox"/> ...	<input type="checkbox"/> Identificazione dinamica	
Descrizione sensori	Tipologia	Numerosità	Posizione
Carico	cella piezoelettrica	n	arco
Spostamento	LVDT, laser, fibra ottica, camera	n	trave
Deformazione	strain gauge, fibra ottica	n	trave
Accelerazione	piezoelettrico, capacitivo , MEMS	n	trave, pila
Ambientale	termocopie, sensori umidità, anemometro	n	impalcato
Traffico	pesa dinamica	n	impalcato

Caratteristiche tecniche sensori				
Sensore	Range di funzionamento	Accuratezza	Frequenza di misura	...
1				
2				
3				
4				
...				
Descrizione specifica fenomeno monitorato				
Tipologia Fenomeno	Fonte	Stato di avanzamento	Condizione di allerta	
	e.g. scheda difetti, relazione tecnica	Incipiente, <u> </u> avanzato	e.g. abbassamento spostamento eccessivo, movimento impendito ...	
Descrizione sistema analisi dati				
Approccio	data driven	parametro	soglia	
	ibrido	parametro	conseguenza in modello	
Descrizione sistema gestione dati				
Trasmissione dati	Stoccaggio dati	Gestione del dato	...	
Cablato, satellitare, GMS...	Cloud, fisico, sala operativa	Block <u>chain</u>	...	

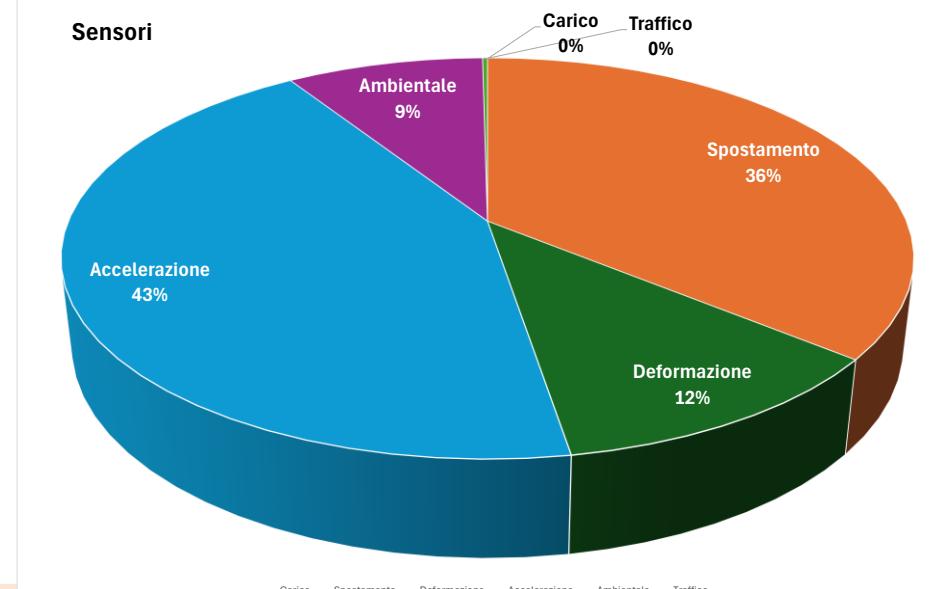
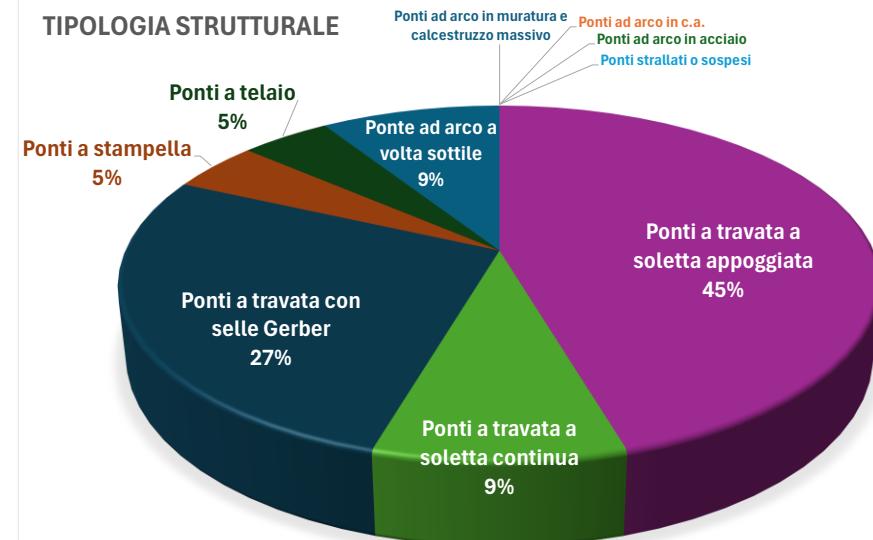
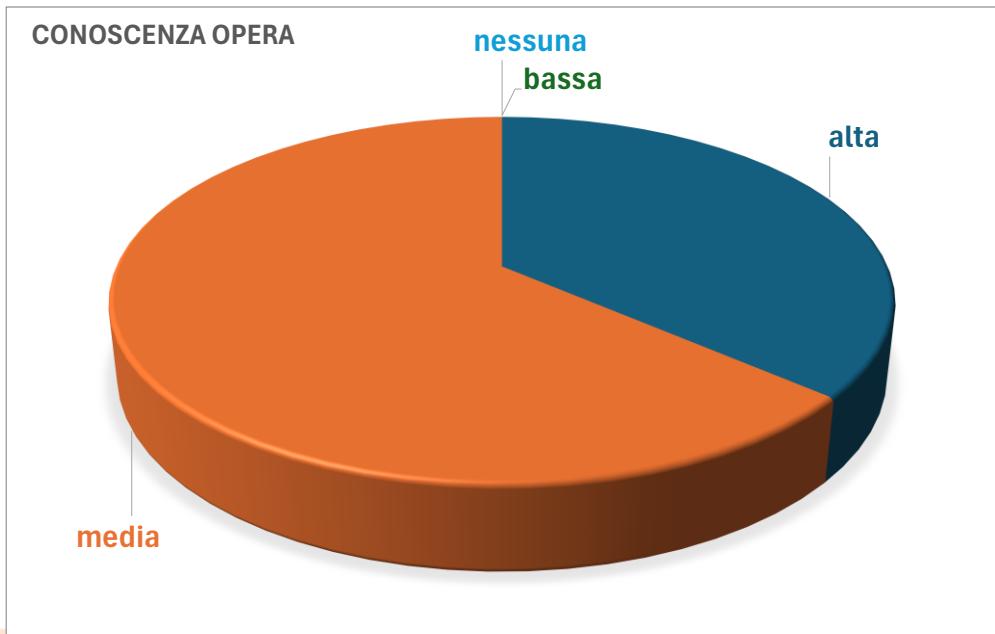
Attività di monitoraggio pregresse o in corso

<input type="radio"/> Presenti	<input type="radio"/> Assenti	<input type="radio"/> Non note
Tipo rilevamento _____		
Metodologia monitoraggio _____		
Data inizio _____		
Data ultimo aggiornamento _____		
Data fine _____		
Tipologia strumentazione _____		
Grandezze misurate _____		
Risultati significativi _____		
Livello Allerta _____		
Documentazione relativa _____		
Allegato n. _____		

Form in Excel
(o similari)
per omogeneizzare
le informazioni e
analizzare i dati

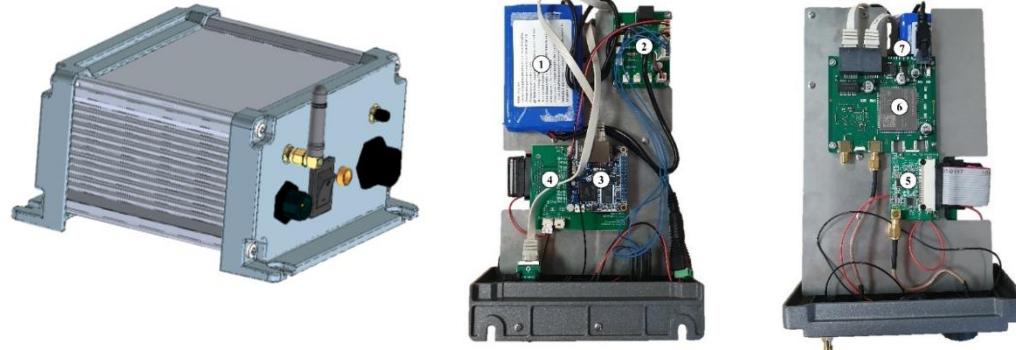
Schedatura dei sistemi di monitoraggio

Tipologia strutturale	Potenziale rischio frane	Potenziale rischio idraulico	Pericolosità sismica (%)	Difetto/maluso zonamento e/o degrado	Stato di conoscenza opera	Carico	Spostamento	Deformazione	Accelerazione	Ambientale	Traffico	Totale	Analisi dati	Gestione dati	Stato avanzamento fenomeno monitorato
Ponti a travata con selle Gerber	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	8	0	13	2	0	23	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	10	2	8	2	0	22	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	14	2	8	2	0	26	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	14	2	8	2	0	26	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	8	2	8	2	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	15	-	10	2	0	27	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	8	2	8	2	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	8	2	8	2	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata con selle Gerber	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	10	2	8	2	0	22	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta continua	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	6	2	11	2	0	21	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta continua	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	7	10	8	2	0	27	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta continua	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	6	4	8	2	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	4	5	7	2	0	18	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata con selle Gerber	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	6	2	9	3	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponte ad arco a volta sottile	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	10	2	15	3	0	30	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponte ad arco a volta sottile	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	10	2	15	3	0	30	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a telaio	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	8	4	13	2	0	27	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata con selle Gerber	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	6	2	10	2	0	20	ibrido	GMS	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	no	alta	0	3	0	4	1	1	9	data driven	GMS	Stabile – Il fenomeno è presente, ma non mostra variazioni significative.
Ponti a travata a soletta appoggiata	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	alta	0	0	2	16	0	0	18	data driven	cablatato	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.
Ponti a stampella	no	si	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	337	80	165	312	0	894	data driven	cablatato	-
Ponti a travata con selle Gerber	no	no	0.10g<ag<0.20g	si	media	0	146	124	95	120	0	485	data driven	cablatato	Iniziale – Il fenomeno è appena stato rilevato e i dati sono limitati.



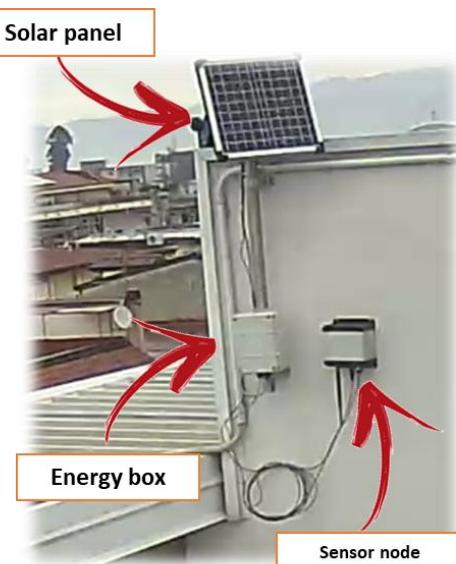
Sistemi a basso costo

- Sviluppo sensore wireless a basso costo



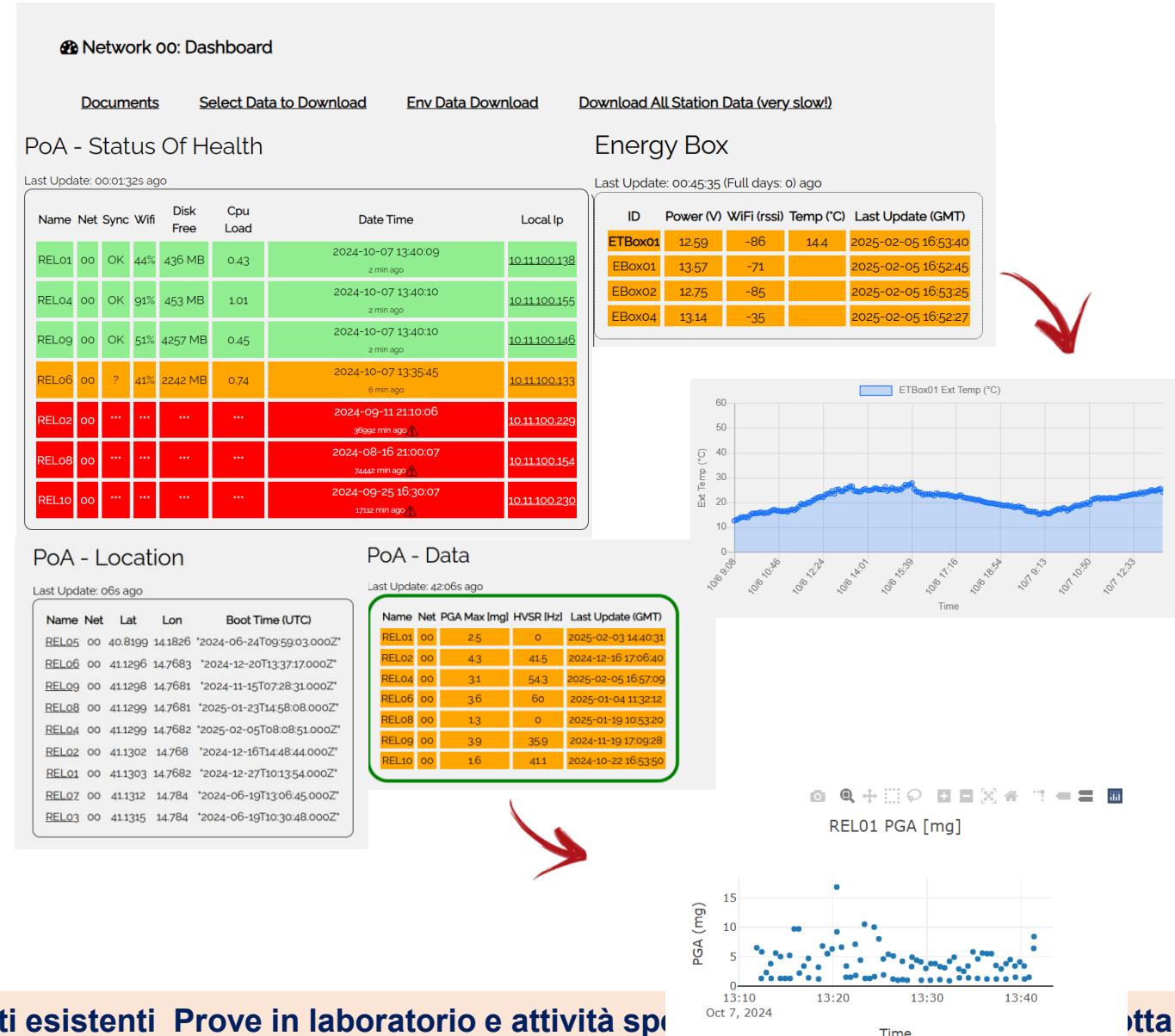
Punti di forza del nodo-sensore prototipale:

- Wireless;
- Facile da installare;
- Portabilità;
- Low-cost;
- Affidabilità di misura;
- Sostenibilità tramite utilizzo di energia solare.



U.R. UNISANNIO

- Sviluppo piattaforma gestione dei dati

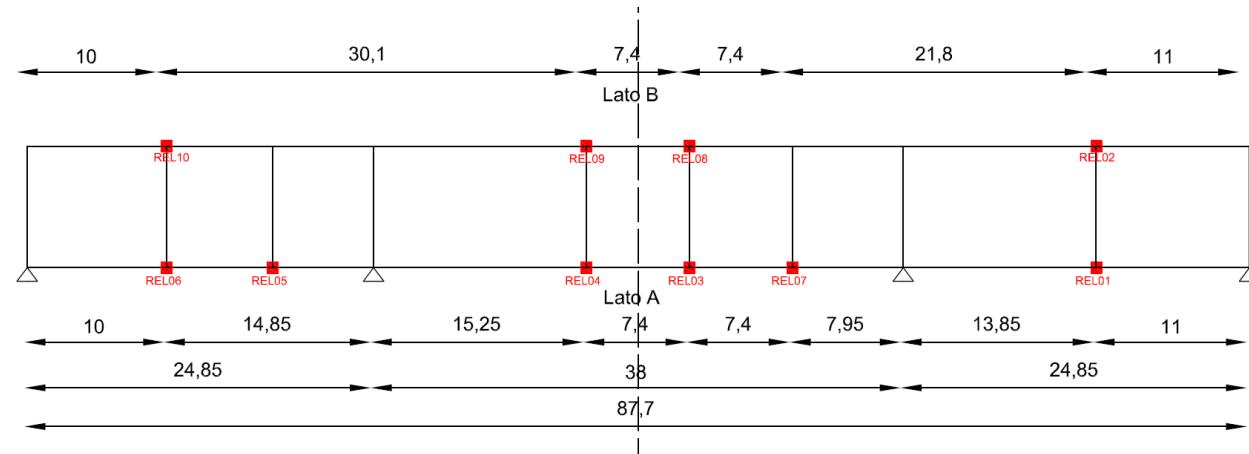
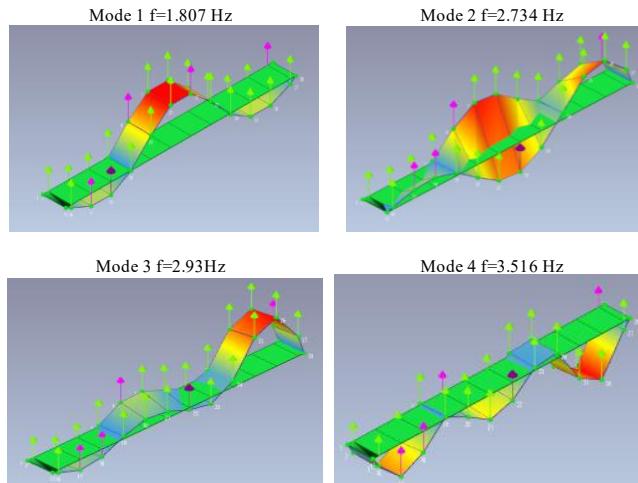


CASO STUDIO: PONTE TIBALDI

Il 25 settembre 2023 sono stati installati i primi sensori sul ponte oggetto di studio.



Applicazione tecniche OSP per la definizione del layout ottimale



Corretta identificazione dei primi 4 modi.

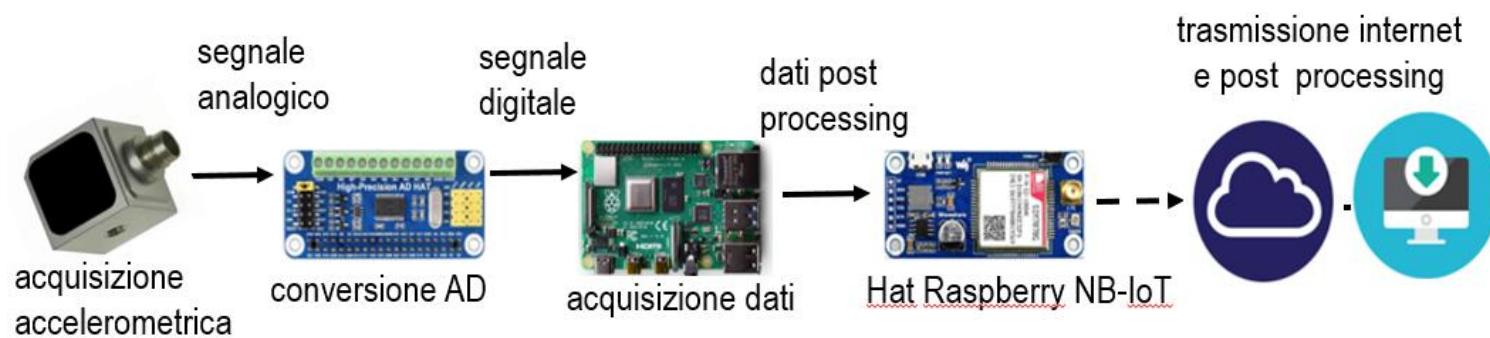
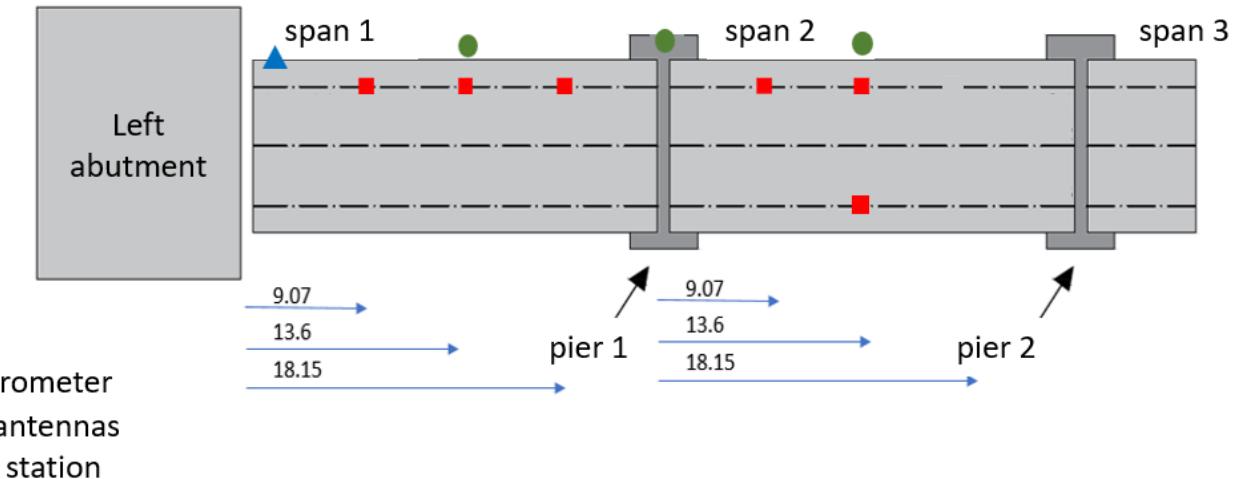
UNIGE



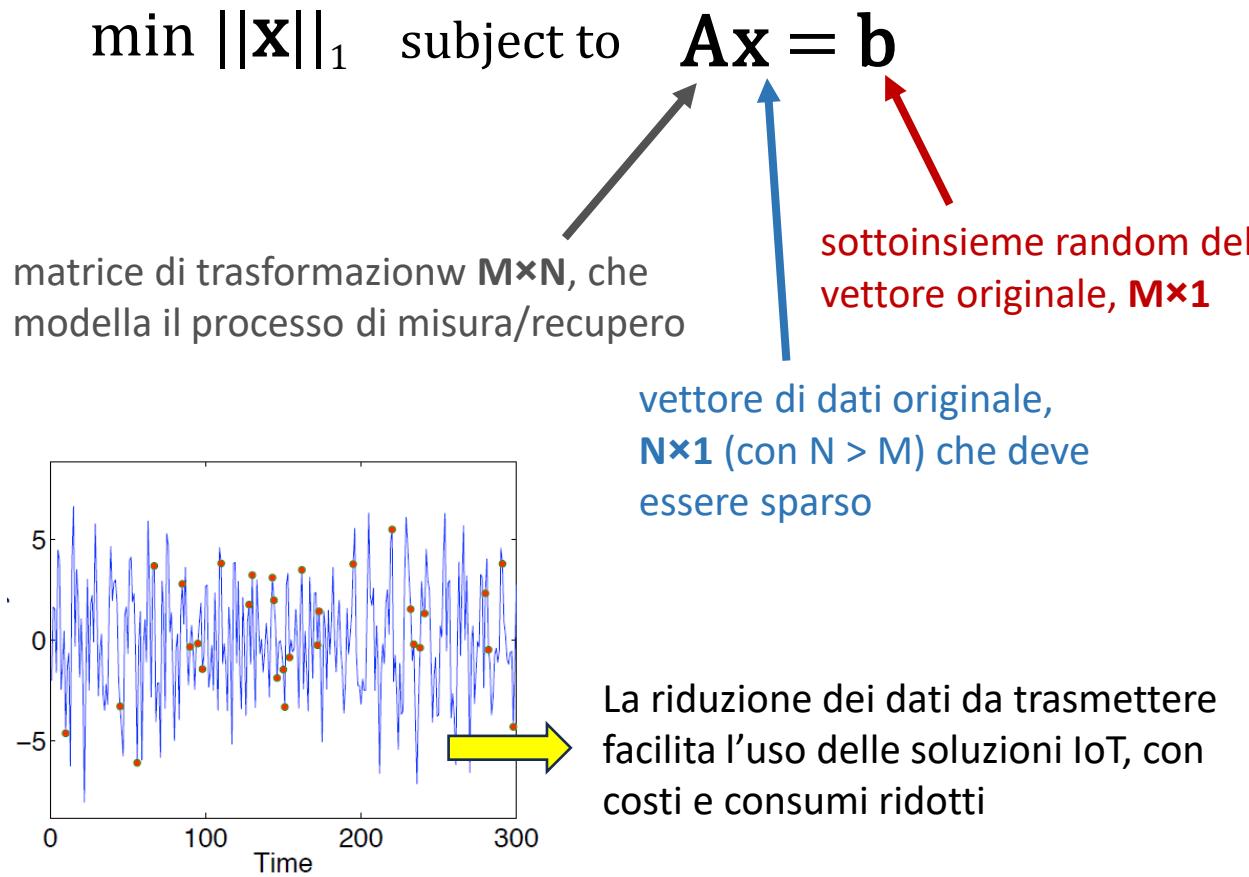
Ponte Paleggiani, Busalla (GE)

- ponte in c.a.p. a cavi pre-tesi
 - lunghezza totale: 165 m, larghezza: 11 m
 - 6 campate di 27.6 m, travi appoggiate
 - monitoraggio continuo con accelerometri IoT, sensori GNSS e una stazione meteo

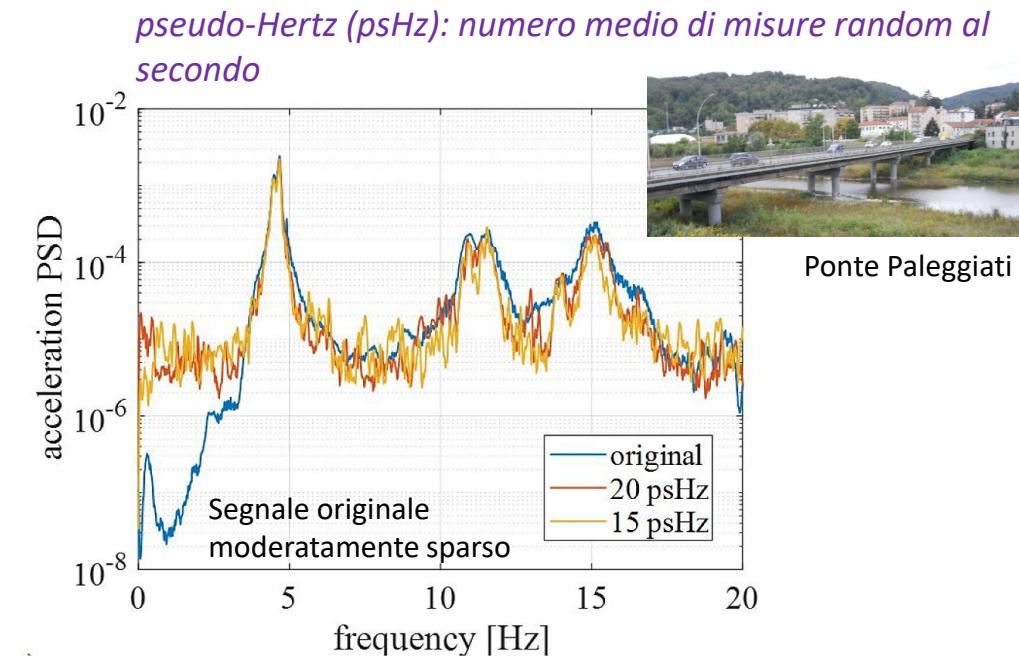
**A partire da «5GSMARTG»
finanziato dal Ministero Italiano
dello Sviluppo Economico
(2020-2022)**



CS permette di recuperare un vettore di dati partendo da un sottoinsieme del vettore, a patto che il vettore originale sia sparso



Studio sulla affidabilità dei parametri modali stimati a partire da data record ridotti



ξ_1	100 Hz	20 psHz	15 psHz
EFDD	0.028	0.024	0.022
SSI	0.024	0.018	0.018

Errori sugli smorzamenti in linea con incertezze intrinseche

Piattaforma di gestione



La piattaforma MODISAT è stata sviluppata con l'obiettivo di integrare diverse tecnologie di misura all'interno di un unico ambiente GIS che rende disponibile una visualizzazione 3D sia dell'infrastruttura monitorata che della sensoristica dando all'utente la possibilità di un'interpretazione rapida del significato delle misure

- Monitoraggio GNSS: rilevamento degli spostamenti assoluti con precisione millimetrica tramite antenne GNSS
- Analisi PSInSAR: valutazione della subsidenza su larga scala grazie ai dati satellitari
- Operational Modal Analysis (OMA) automatica: identificazione delle caratteristiche dinamiche del manufatto per rilevare variazioni strutturali
- Modellazione numerica avanzata: simulazioni ingegneristiche con diversi scenari di carico statico e dinamico per valutazioni predittive e definizione di curve di fragilità
- Integrazione GIS: gestione e visualizzazione intuitiva dei dati su mappa interattiva per un'interpretazione semplice e tempestiva dei dati di monitoraggio

PIATTAFORMA MODISAT

Probabilità superamento

Live di danno

Modelli

Visualizzatore dati

Visualizzatore

Visualizzatore

Configuratore

Visualizzatore 2D

Confronto

Sensori statici

Accelerometri

GNSS

Frequenze

Smorzamenti

Forme modali

PGA

Curve di

Fragilità

Frequenze

Forme modali

Deformata

statica

Spostamenti

ricevitori GNSS

Spostamenti

ricevitori

GNSS

Sp

St

St

Misur

GNSS

Misur

GNSS

DB

Generatore

Mappe di

spostamento

Proces

GNSS

Proces

PSInSAR

GW

Process

PSInSAR

Acquis

Sensi

ri

ri

dDAS

Analisi

FE

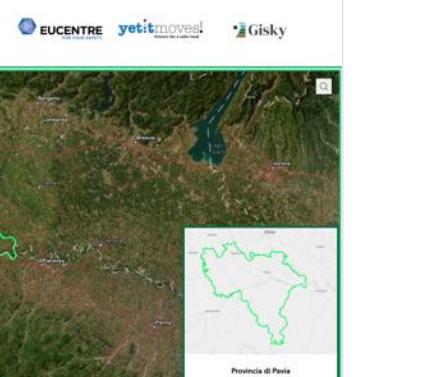
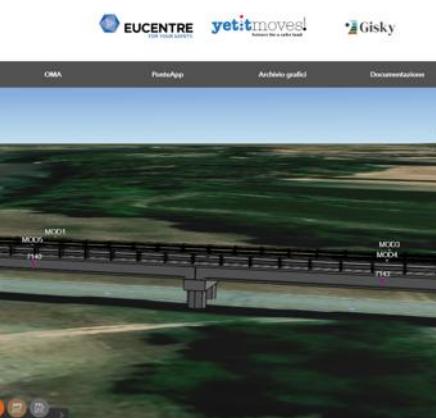
FE

Modulo

Ponte

AP

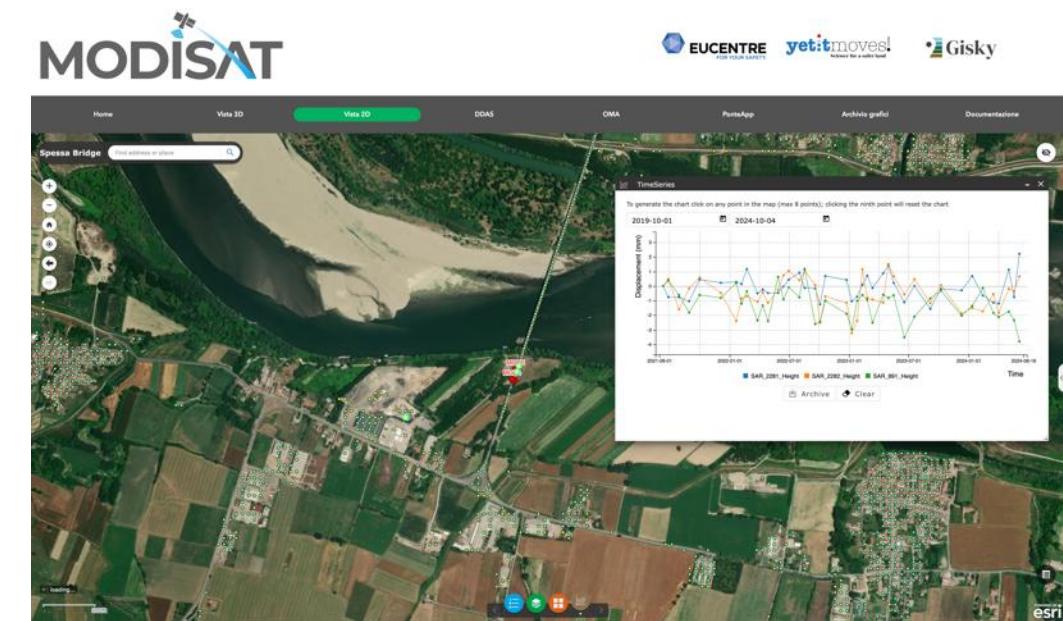
AP



INTEGRAZIONE TECNOLOGIE SATELLITARI

Radar Satellitare

È una sezione dedicata ai risultati delle analisi interferometriche PSinSAR che include oltre ai punti PS rilevati dall'analisi anche i punti corrispondenti ai sensori GNSS. All'interno della mappa ESRI integrata sono disponibili di dati storici su un lasso temporale di tre anni

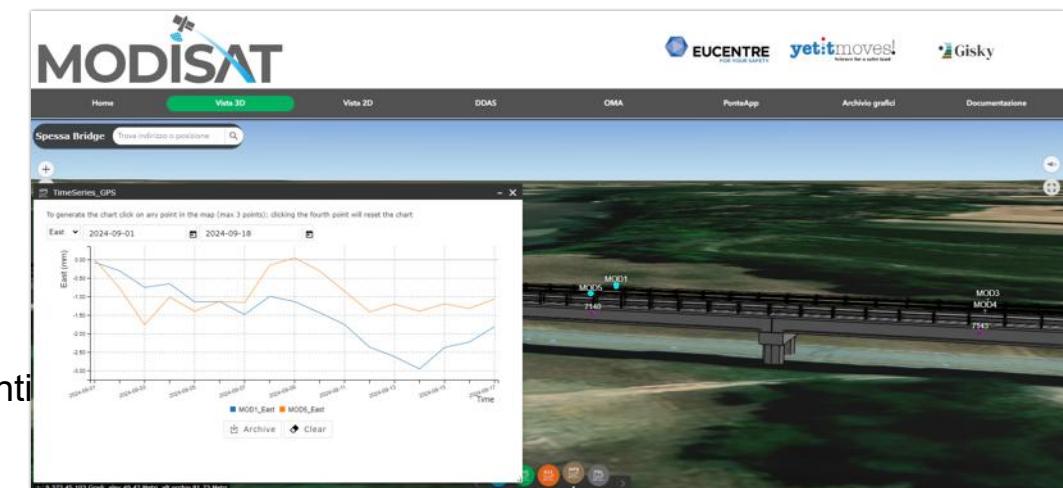


GNSS

Nella visualizzazione 3D, uno specifico widget è dedicato alle misure di telemetria prodotte dai ricevitori GNSS. In particolare:

- memoria libera;
- tensione di batteria;
- tensione di pannello solare.

Un secondo widget permette di visualizzare le storie temporali degli spostamenti calcolate da un algoritmo dedicato sulla base delle misure grezze prodotte dai ricevitori GNSS



Piattaforma di gestione

Il modulo OMA integrato nella piattaforma realizza analisi periodiche (con intervallo configurabile) dei dati di acquisizione dei sensori accelerometrici. I risultati delle analisi vengono riassunti in rapporti disponibili in piattaforma.

MODISAT

Home Vista 3D Vista 2D DDAS OMA PonteApp Archivio grafici Documentazione

☰ OMA

Lista analisi effettuate

ID	Data	Ora	Stato	Freq. primo modo	Dati di input	Report	Elimina
3255	01/10/24	15:38:00	Completata	3.125 Hz			
3246	29/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3242	27/09/24	12:17:00	Completata	3.125 Hz			
3238	27/09/24	09:37:00	Completata	3.125 Hz			
3217	25/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3212	22/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3207	18/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3202	15/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3197	14/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			
3192	13/09/24	03:00:00	Completata	3.125 Hz			

Records per page: 10 ▾ 1-10 of 36 | < > >>

AVVIA ACQUISIZIONE DATI

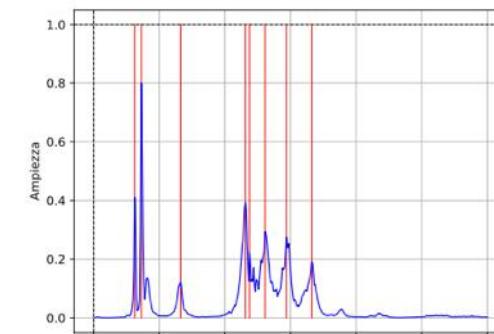
EUCENTRE yetitmoves! **Gisky**

STRUTTURA: Ponte di Spessa DATA: 01/10/2024

CURVA VALORI SINGOLARI (SVD)

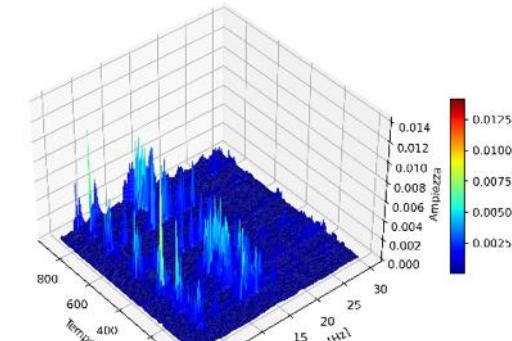
In figura si riporta il risultato della "singular value decomposition" (SVD); le barre verticali intercettano le frequenze proprie identificate dalla procedura di calcolo.

SVD



STRUTTURA: Ponte di Spessa DATA: 01/10/2024

Spettrogramma 3D



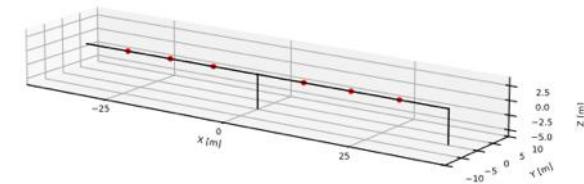
STRUTTURA: Ponte di Spessa

DATA: 01/10/2024

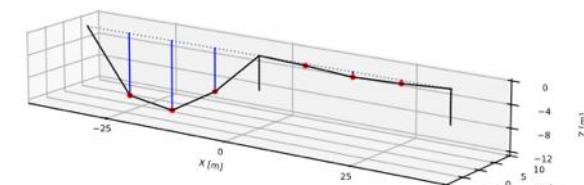
CONFIGURAZIONE DEFORMATA

Nei grafici a seguire si visualizzano la configurazione non deformata e le deformate modali della struttura.

configurazione non deformata



Modo 1, frequenza: 3.12 Hz, periodo: 0.32 s



MODISAT MONitoraggio Dinamico di ponti mediante misure di spostamento derivate da tecnologie SATellitari

Piattaforma di gestione

La piattaforma MODISAT è stata validata attraverso un'installazione su due campate del ponte di Spessa Po, con il patrocinio della Provincia di Pavia



WP4: Sperimentazione su componenti strutturali e/o speciali



Task 4.8 – Casi studio di competenza degli Enti Locali

□ Focus su ponti gestiti da Enti Locali

- Tipologie più tipiche delle strade di viabilità secondaria
(e.g. ponti in muratura, c.a. a graticcio)
- Ente che è responsabile dell'attività di indagine e valutazione
(approccio diverso rispetto al concessionario)

□ Applicazione di tecniche diagnostiche e criteri di modellazione

messi a punto nei task:

- 3.2 - Indagini, diagnostica, identificazione e monitoraggio
- 4.1 - Problemi di durabilità dei ponti
- 4.3 - Sistemi in c.a.p.
- 4.4 - Selle Gerber
- 4.7 - Procedure di prova di carico a supporto delle verifiche di sicurezza

Tecniche diagnostiche: passaggio dallo sviluppo in laboratorio alla validazione sul ponte reale

Criteri di modellazione: analisi della rilevanza del livello di conoscenza dell'opera per l'accuratezza del modello analitico e/o numerico

Casi studio – ubicazione e unità

Ponte in c.a.p.

Città Metropolitana di Catania

M.R. Pecce e L. La Mendola



Ponte in c.a.

Comune di Padova

F. da Porto



Ponte in muratura

Città Metropolitana di Roma

S. Lagomarsino e A. Meda



UniNA - Bilotta, Losanno, Pecce

PoliMI - Di Prisco, Felicetti

UniBS - Plizzari

UniRoma - Meda

UniPD - da Porto

UniGE - Lagomarsino

UniBO - Mazzotti

UniPR - Belletti

UniPA - La Mendola

UniCT - Rossi

UniME - Recupero

UniSA - Rizzano

Documento tecnico metodologico, esemplificativo per tecnici e professionisti, condiviso da una Rete di UR (dicembre 2025)

■ Attività di rilievo e diagnostica

- Documentazione originaria di progetto, documenti da interventi di manutenzione o da opere limitrofe, analisi storica e progetto simulato ([mostrate insieme in maniera comparativa](#))
- Iteratività del processo di indagine ([evoluzione dei piani di indagine per ciascuna opera](#))
- Maggiore o minore efficacia delle prove nei vari casi ([insieme in maniera comparativa](#))
- Motivazione prove: esempio di schema ([mostrate in modo uniforme per ciascun caso](#))

■ Attività di modellazione

- Esame costi/benefici delle indagini ([correlare l'accuratezza del modello e la stima della capacità resistente stimata alla conoscenza del ponte](#))
- Stima dell'impatto del modello sulle sollecitazioni
- Aggiornamento di modello con prove statiche e/o dinamiche

Casi studio – Tecniche diagnostiche

Tutti - Prove standard → evidenziare in ogni caso aspetti importanti (schema organico e uniforme)

Ponte in c.a.p.

Detensionamento

Georadar

Potenziale corrosione e cloruri

Prova di carico + identificazione dinamica

DIC



Ponte in c.a.

Georadar

Potenziale corrosione e cloruri

Identificazione dinamica



Ponte in muratura

Rilievo e indagini geometrico

Prova di carico +

identificazione dinamica e emissioni acustiche



UniNA - Bilotta, Losanno, Pecce

PoliMI - Di Prisco, Felicetti

UniBS - Plizzari

UniRoma - Meda

UniPD - da Porto

UniGE - Lagomarsino

UniBO - Mazzotti

UniPR - Belletti

UniPA - La Mendola

UniCT - Rossi

UniME - Recupero

UniSA - Rizzano

Ponte in c.a.p.

Progetto simulato

Esempi di valutazione vita residua

Aggiornamento di modello

su dinamica e statica



Ponte in c.a.

Selle Gerber

Esempi di valutazione vita residua

Aggiornamento di modello su dinamica



Ponte in muratura

Modelli FEM

Aggiornamento di modello

su dinamica e statica



UniNA - Bilotta, Losanno, Pecce

PoliMI - Di Prisco, Felicetti

UniBS - Plizzari

UniRoma - Meda

UniPD - da Porto

UniGE - Lagomarsino

UniBO - Mazzotti

UniPR - Belletti

UniPA - La Mendola

UniCT - Rossi

UniME - Recupero

UniSA - Rizzano