



Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale

## Convegno



# La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

**Accordo tra il CSLP ed il Consorzio ReLUIS  
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022**

**Roma  
24 e 25 ottobre 2023**

**Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture**  
**Antonio Bilotta**





## Indagini e diagnostica

### 6.2.2 INDAGINI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEI DETTAGLI COSTRUTTIVI E DEI MATERIALI

Le campagne conoscitive sono finalizzate alla ricostruzione dei dettagli costruttivi ed alla caratterizzazione meccanica sperimentale dei materiali e delle strutture sulla base dei risultati dell'analisi storico-critica e dei rilievi geometrico e strutturale.

Anche in presenza di documentazione originaria di progetto possono essere opportune indagini per verificare ed integrare le informazioni possedute. In particolare, si individuano:

- saggi in situ sugli elementi costruttivi;
- prove sperimentali per la determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali e delle strutture;
- rilievi in situ e carotaggi per la determinazione dello stato di durabilità dei materiali calcestruzzo, acciaio per c.a., acciaio per c.a.p., acciaio da carpenteria.

La valutazione critica dei risultati ottenuti da ciascun livello di approfondimento di conoscenza/indagine effettuato, in riferimento alla tipologia di materiale ed alle relative caratteristiche meccaniche ipotizzate per l'elemento considerato, permette l'aggiornamento e l'integrazione delle campagne sperimentali.

I saggi in-situ finalizzati alla definizione dei dettagli costruttivi e dei materiali, sia in termini di caratterizzazione meccanica sia di durabilità, si eseguono su una congrua percentuale di elementi strutturali, privilegiando quelli che rivestono un ruolo di primaria importanza nella struttura.

Si sottolinea l'estrema importanza della valutazione di durabilità dei cavi da precompressione nel sistema post-teso, tramite indagine di integrità delle guaine e dello stato di corrosione in sezioni critiche per flessione o taglio e nelle zone di ancoraggio e della valutazione dell'integrità dell'opera nei casi di particolare fragilità strutturale, come, ad esempio, nel caso di appoggi tipo Gerber nei ponti di calcestruzzo armato.



## Indagini e diagnostica

### 7.4.2. ISPEZIONI STRAORDINARIE

Le ispezioni straordinarie, che vanno eseguite a contatto diretto con le strutture, devono essere accompagnate da prove non distruttive fra cui, ad esempio e non esaustivamente, le seguenti:

- prelievo di campioni per prove meccaniche e chimico-fisiche,
- prove sclerometriche, sonreb (con carotaggi di calibrazione, come da documenti di riferimento) o equivalenti,
- prove di pull-out,
- prove ultrasoniche o georadar per rilevamento di vuoti e discontinuità,
- mappature di potenziale elettrico,
- sondaggi e ispezioni con endoscopio,
- prove magnetiche e/o georadar sui cavi di precompressione
- misure diffuse di umidità e pH,
- Determinazione dello stato di tensione.

Inoltre, per le strutture metalliche:

- misure dello spessore residuo delle vernici protettive,
- prove di serraggio dei bulloni,
- controllo delle saldature con ultrasuoni e/o liquidi penetranti.

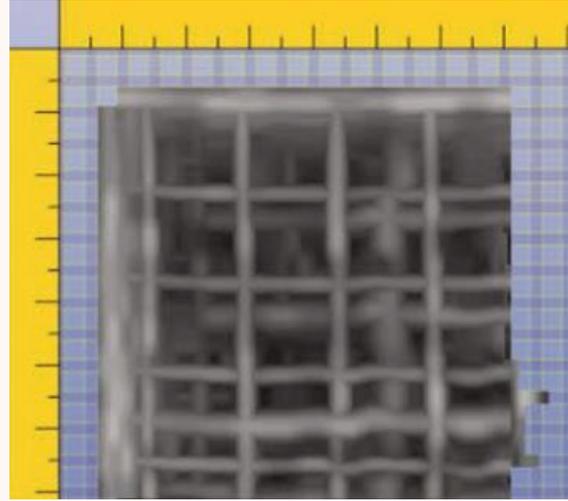
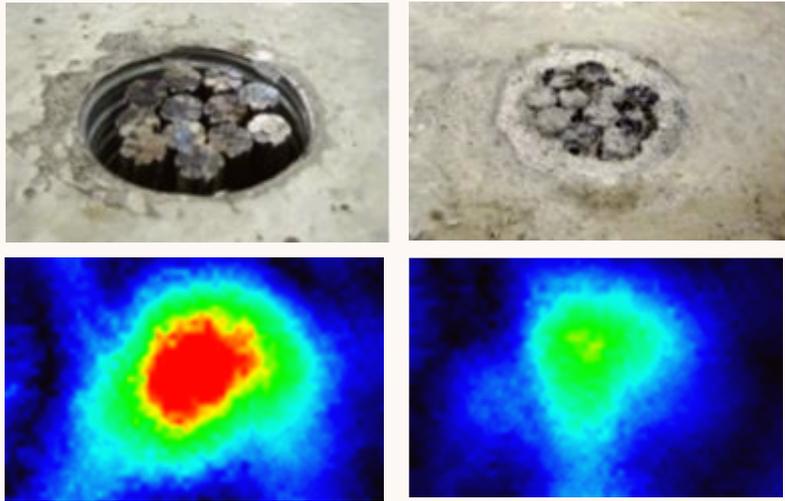
### 7.4.3. CASI CHE RICHIEDONO PARTICOLARE ATTENZIONE

#### 7.4.3.1. Strutture precomprese a cavi post-tesi

Le strutture precomprese a cavi post-tesi e iniettati, fra le quali, in particolare, quelle realizzate negli anni '60 e '70, possono essere soggette a pericolose situazioni di degrado che possono comportare corrosione dei cavi di precompressione e che, pertanto, possono influire negativamente sulla resistenza della struttura e provocare collassi improvvisi, anche in assenza di sovraccarico e/o di traffico. Tali situazioni possono essere in prevalenza causate da difetti nelle iniezioni dei cavi che, in presenza di stati di corrosione delle guaine o degli ancoraggi e/o infiltrazioni di acqua, possono costituire zone di innesco della corrosione.

## Subtask 3.2.1 – Rilievi, indagini, prove distruttive e non distruttive, diagnostica

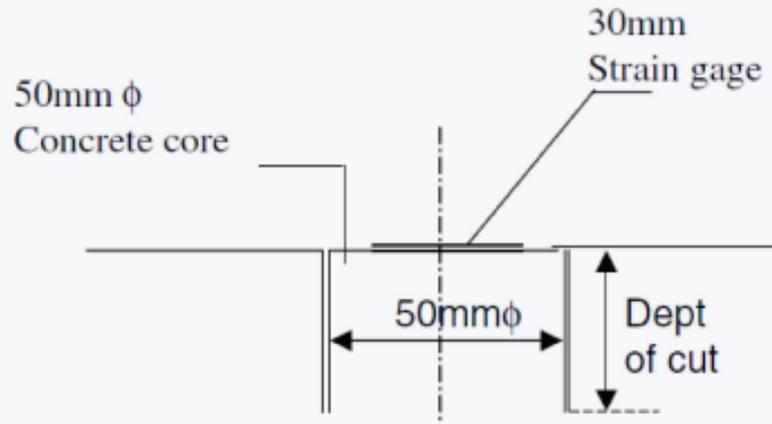
### Tomografia radar per la geometria di cavi e barre



Identificare la presenza di armature e cavi, ...  
(§6.2.2., §7.4.2, §7.4.3 Linee Guida)

Obiettivo: studiare il potenziale delle metodologie non distruttive avanzate

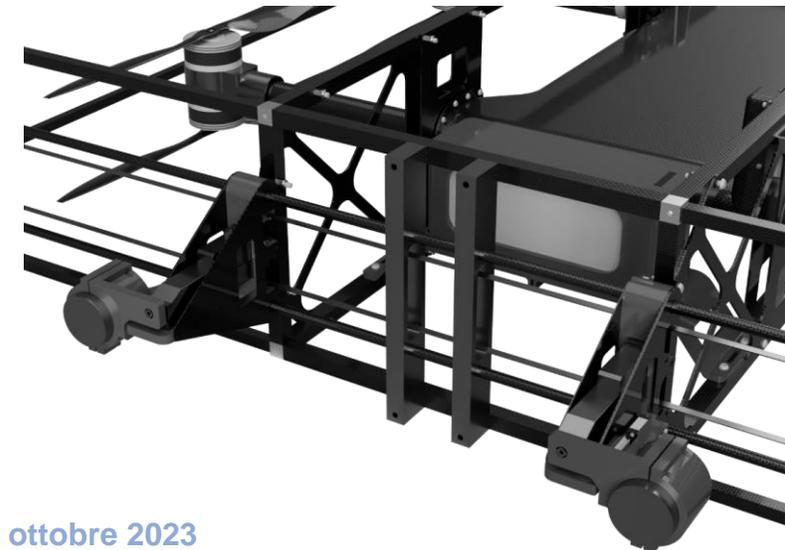
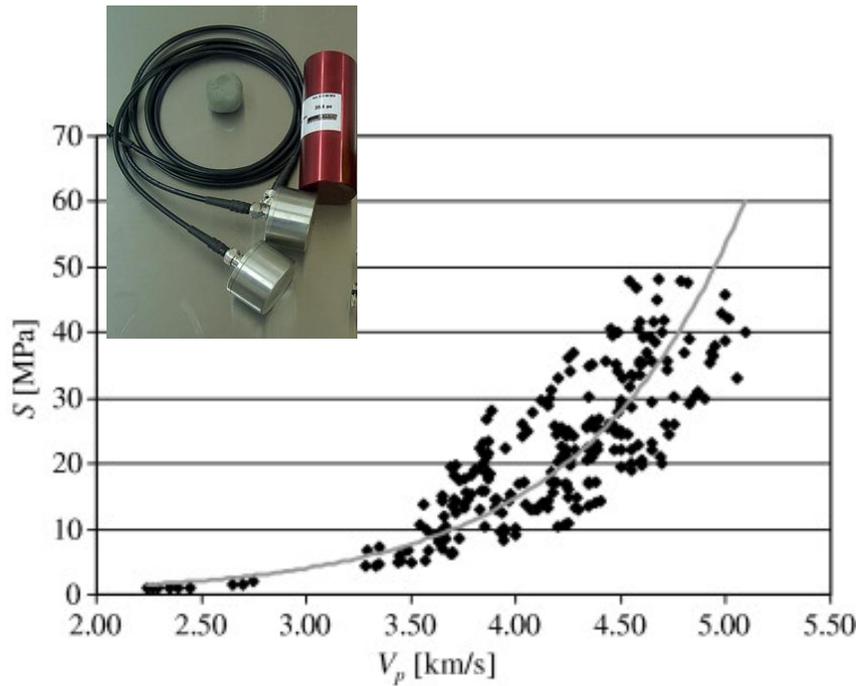
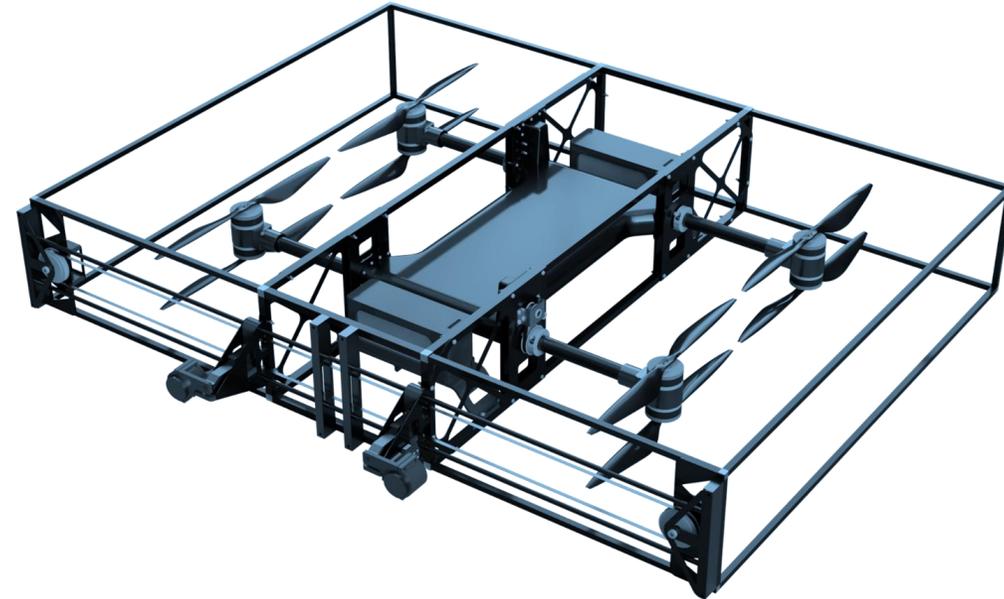
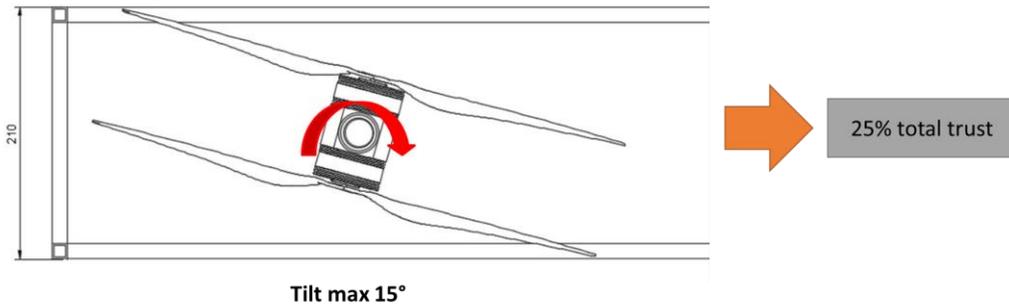
### Curve di rilascio tensionale



La precompressione residua su elementi in calcestruzzo post-teso  
(§3.6 e §7.4 Linee Guida)

Obiettivo: validazione delle metodologie basate sul rilascio di tensione / suggerimento di procedure standard da includere nelle linee guida

## Droni robot per prove ultrasoniche





## Identificazione dinamica

### 6.3.3.5 Riduzione delle incertezze di modellazione

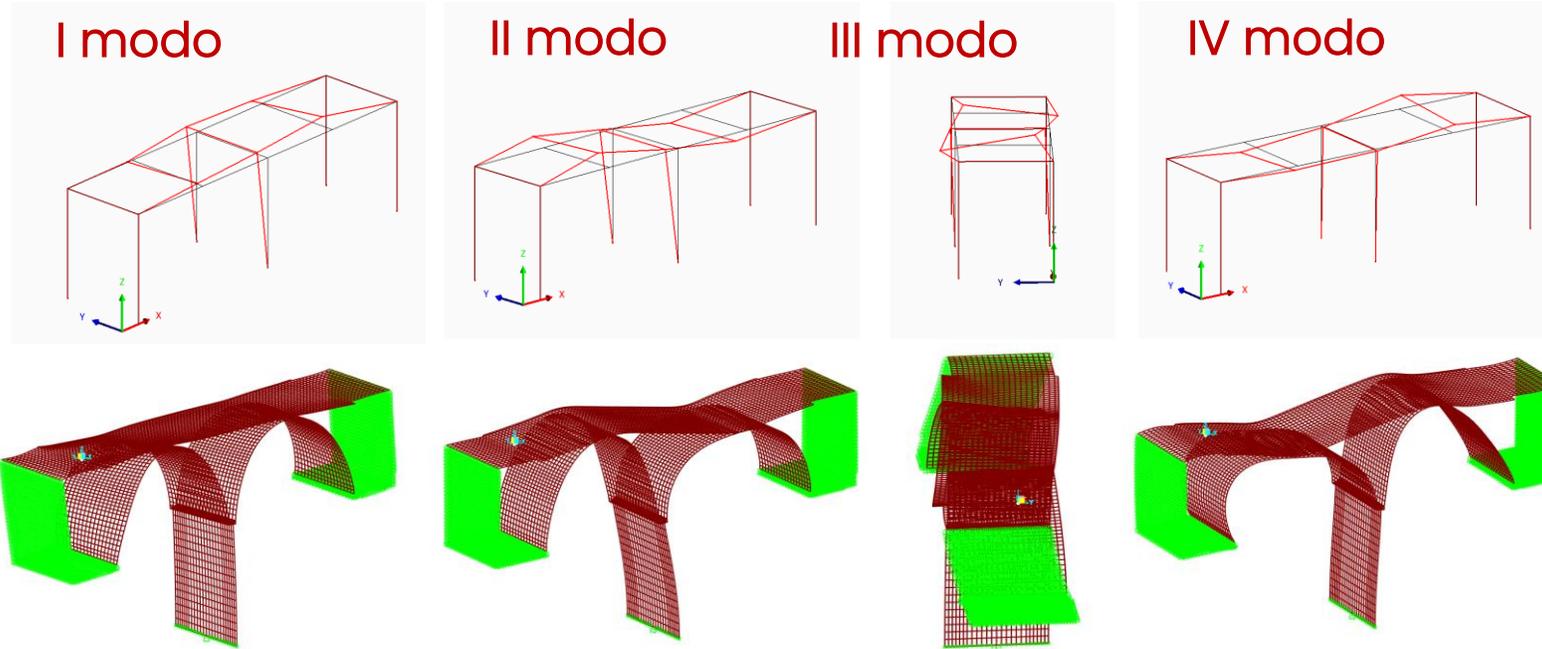
Relativamente ai coefficienti di sicurezza dei carichi permanenti, nel caso di strutture esistenti, in funzione del livello di approfondimento delle indagini condotte in termini di misure geometriche, caratteristiche dei materiali, modellazione strutturale, eventuali analisi di identificazione dinamica, 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.

## Subtask 3.2.2 – Identificazione e aggiornamento del modello strutturale



### Target (sperimentali)

- ✓ Frequenze
- ✓ Forme modali
- ✓ Curvature modali

### Variabili

- Modulo elastico
- Densità
- Masse non strutturali
- Condizioni vincolari

**Calibrazione**  
manuale Vs automatica

### Documentazione disponibile

- travi in CAP
- schema Gerber
- appoggi in lastra di piombo

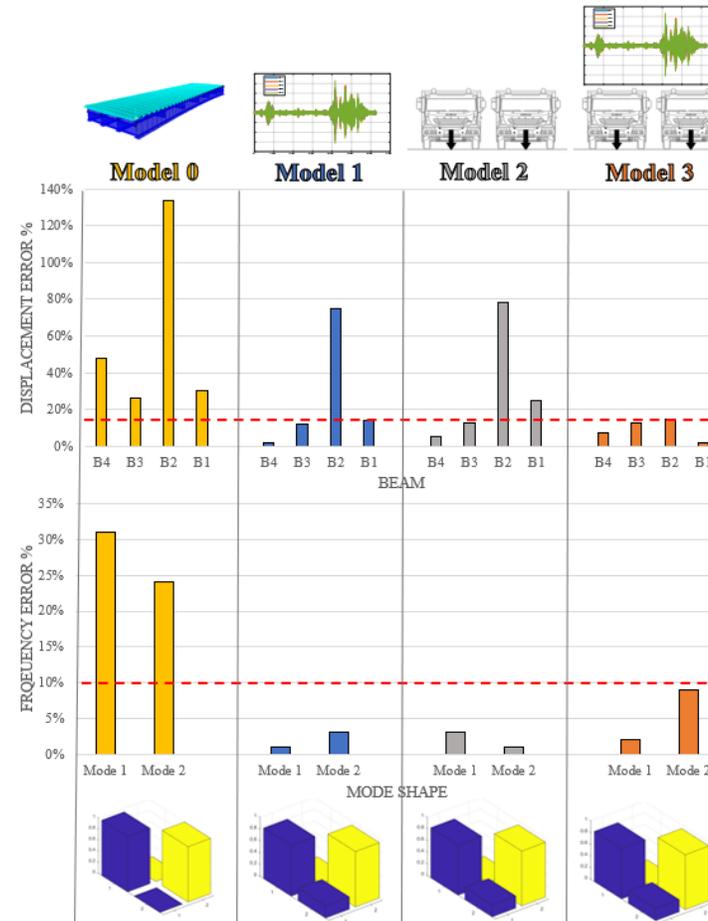
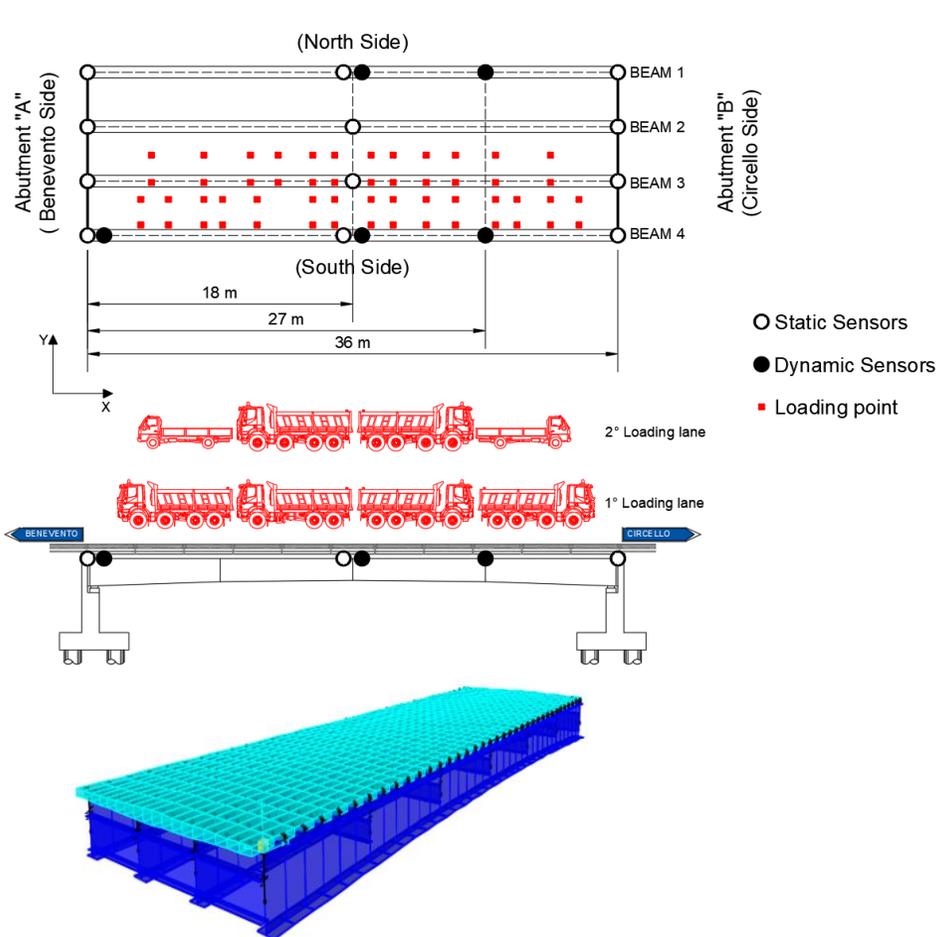


- Indagini materiali
- Prove di carico
- Schede difettosità LG20
- Rilievo geometrico
- Identificazione dinamica

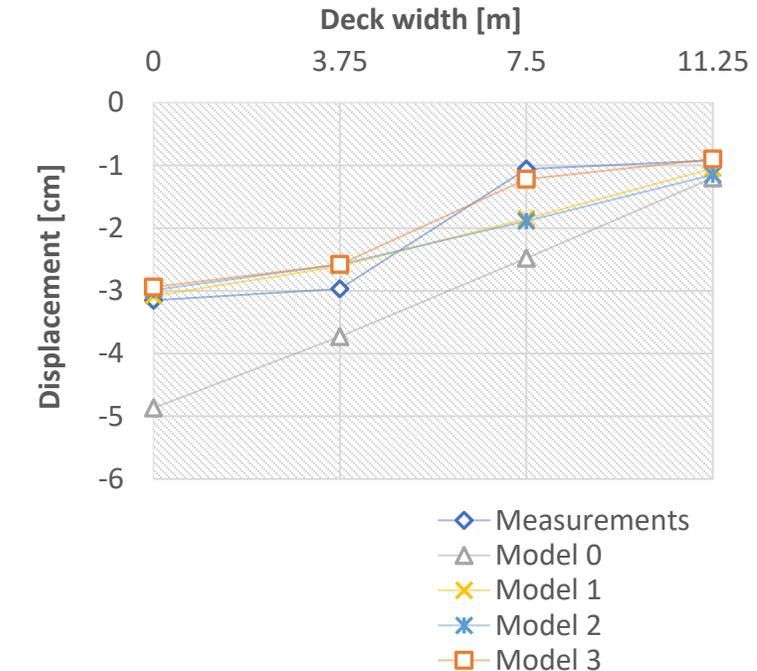


## Subtask 3.2.2 – Identificazione e aggiornamento del modello strutturale

Aggiornamento del modello sulla base di test dinamici e statici



Frequenza (Hz)					
Mode	Exp	Model 0	Model 1	Model 2	Model 3
1	4.08	2.83 (31%)	4.03 (1%)	3.96 (3%)	4.16 (2%)
2	4.98	3.77 (24%)	5.13 (3%)	5.04 (1%)	4.55 (9%)





## Monitoraggio

### 7.1.1. STRUMENTI OPERATIVI DEL SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO

Sono strumenti operativi del sistema di sorveglianza e monitoraggio:

- Ispezioni periodiche ordinarie;
- Ispezioni straordinarie;
- Indagini non distruttive e semidistruttive;
- Prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica;
- Monitoraggio strumentale;
- Algoritmi di analisi e interpretazione dati;
- Modelli rappresentativi del comportamento reale;
- Indici dello stato di condizione e modelli di degrado;
- Basi dati informatiche (BMS, di cui al §7.8).

rimanere funzionante a lungo sino a coprire l'intera vita dell'opera. Le indicazioni fornite sono da intendersi complementari rispetto ai contenuti generali del documento *UNI TR 11634:2016 Linee Guida per il monitoraggio strutturale*, cui si farà utile riferimento. Tra le raccomandazioni di carattere generale qui si anticipa, in via preminente, che un sistema di monitoraggio deve essere definito negli obiettivi, concepito, progettato e gestito in funzione delle specifiche problematiche che caratterizzano la struttura ed il suo contesto. Tali problematiche, e quindi le funzioni che il sistema è chiamato ad assolvere, non possono che essere individuate, e quindi valutate nel corso dell'esercizio del sistema, da chi svolge le attività di sorveglianza e/o dai progettisti degli interventi di manutenzione o di nuova costruzione, secondo idonee specifiche procedure.



## Monitoraggio

# Le linee guida su...

### UNI TR 11634:2016 *Linee guida per il monitoraggio strutturale*

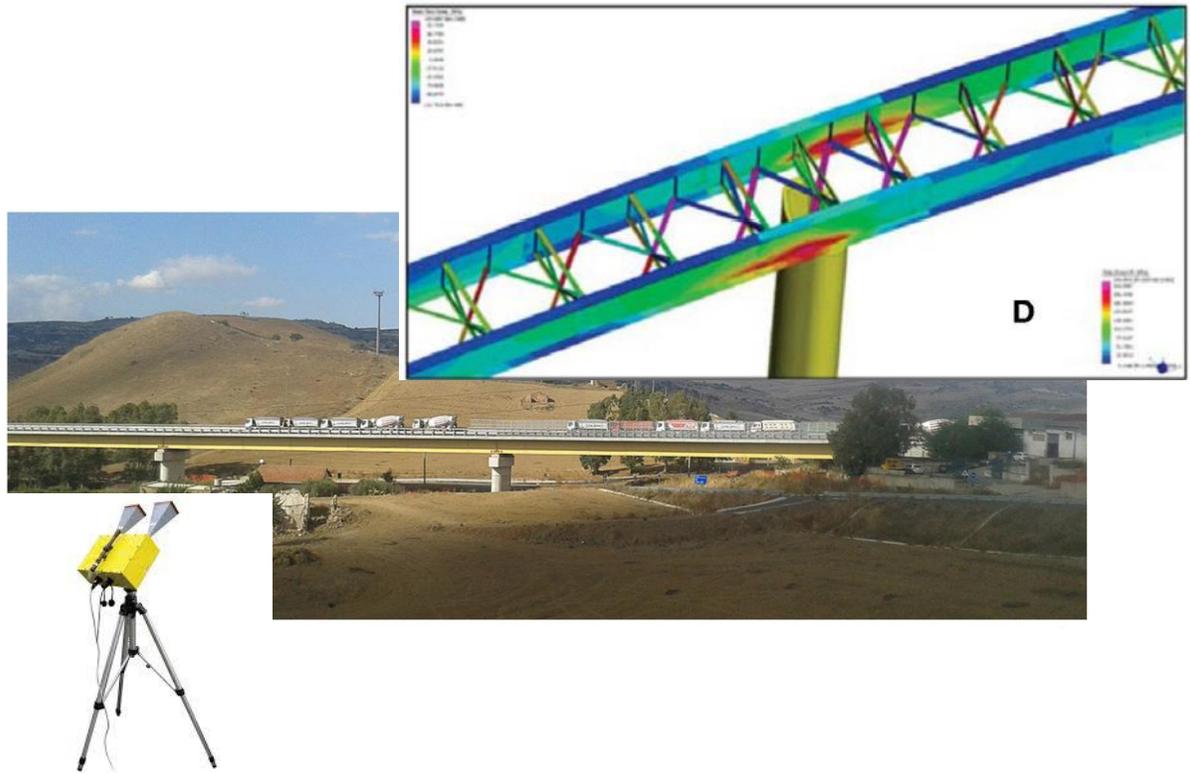
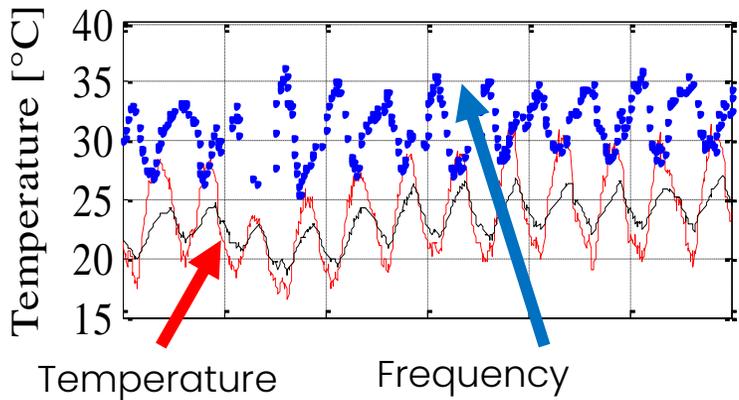
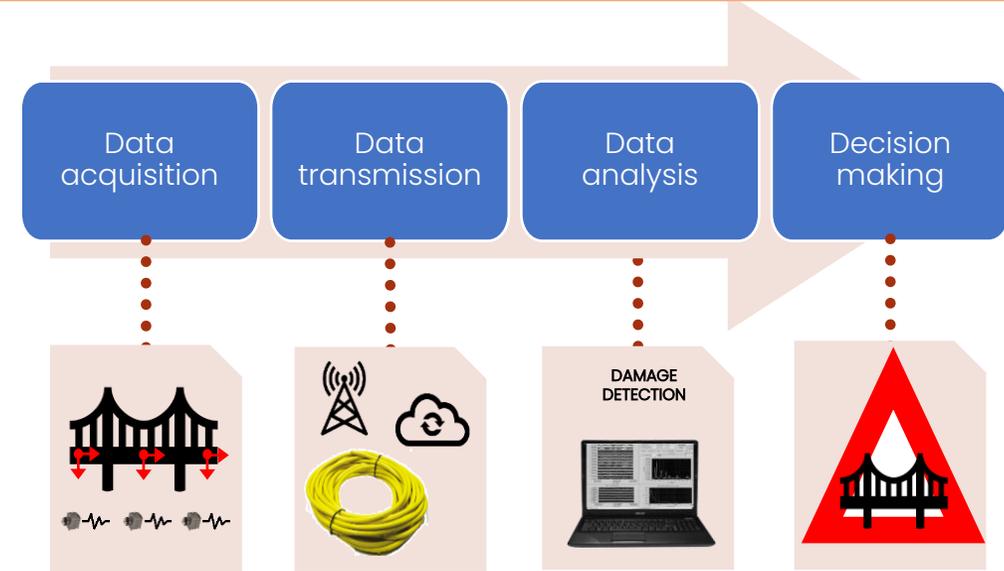
- Criteri di progettazione dei sistemi di monitoraggio
- Metodologie di identificazione dello stato delle strutture sulla base di classi e tipologie strutturali
- Caratteristiche e requisiti dei componenti logici del sistema
- Metodologie di rilevamento e analisi dati
- Metodologie di identificazione del danneggiamento e degrado dei materiali

rimanere funzionante a lungo sino a coprire l'intera vita dell'opera. Le indicazioni fornite sono da intendersi complementari rispetto ai contenuti generali del documento *UNI TR 11634:2016 Linee Guida per il monitoraggio strutturale*, cui si farà utile riferimento. Tra le raccomandazioni di carattere generale qui si anticipa, in via preminente, che un sistema di monitoraggio deve essere definito negli obiettivi, concepito, progettato e gestito in funzione delle specifiche problematiche che caratterizzano la struttura ed il suo contesto. Tali problematiche, e quindi le funzioni che il sistema è chiamato ad assolvere, non possono che essere individuate, e quindi valutate nel corso dell'esercizio del sistema, da chi svolge le attività di sorveglianza e/o dai progettisti degli interventi di manutenzione o di nuova costruzione, secondo idonee specifiche procedure.

## Subtask 3.2.3 – Monitoraggio

### Monitoraggio tradizionale (e.g. vibrazioni)

### Monitoraggio con interferometria radar terrestre



## Il progetto ReLUIS su... ... monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture

WP3: Analisi, revisione e aggiornamento delle Linee Guida

Task 3.2 - Indagini, diagnostica, identificazione e monitoraggio

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

WP5: Temi/Progetti speciali

Task 5.5 - Droni e droni robot

Task 5.6 - Monitoraggio satellitare

### Subtask 3.2.1

UniNA (Bilotta)  
IUSS-UniPV (Calvi, Pavese)  
UniSA (Rizzano)  
UniTN (Bursi)  
UniBO (Savoia)  
PoliBA (Foti)  
UniMOL (Fabbrocino)  
UniCA (Sassu)  
PoliMI (Felicetti)

### Subtask 3.2.2

UniNA (Bilotta, Pecce)  
IUSS (Calvi)  
UniBO (Savoia)  
PoliBA (Foti)  
UniCH (Camata)  
CNR-ITC (Occhiuzzi, Rainieri)  
UniPD (Da Porto)  
UniFI (De Stefano)

### Subtask 3.2.3

UniNA (Bilotta, Pecce, Losanno, Parisi)  
Eucentre-UniPV (Germagnoli, Pavese)  
UniTN (Zonta)  
UniBO (Savoia)  
UniMOL (Fabbrocino)  
PoliMI (Limongelli)  
CNR-ITC (Occhiuzzi, Rainieri)  
UniBG (Riva)  
UniRC (Chioccarelli)  
UniSannio (Maddaloni)  
UniGE (Pagnini)



# I sistemi di monitoraggio *REAL-TIME* ...

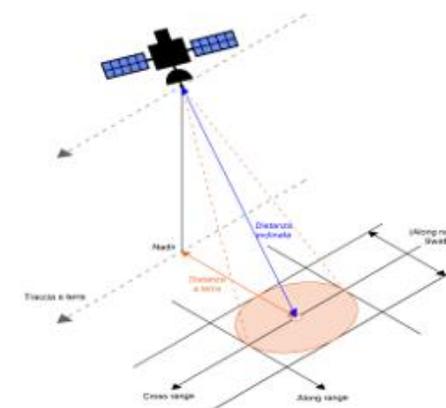
**Identificazione dinamica**  
(oggi: accelerometri, anni 90 interferometria laser)



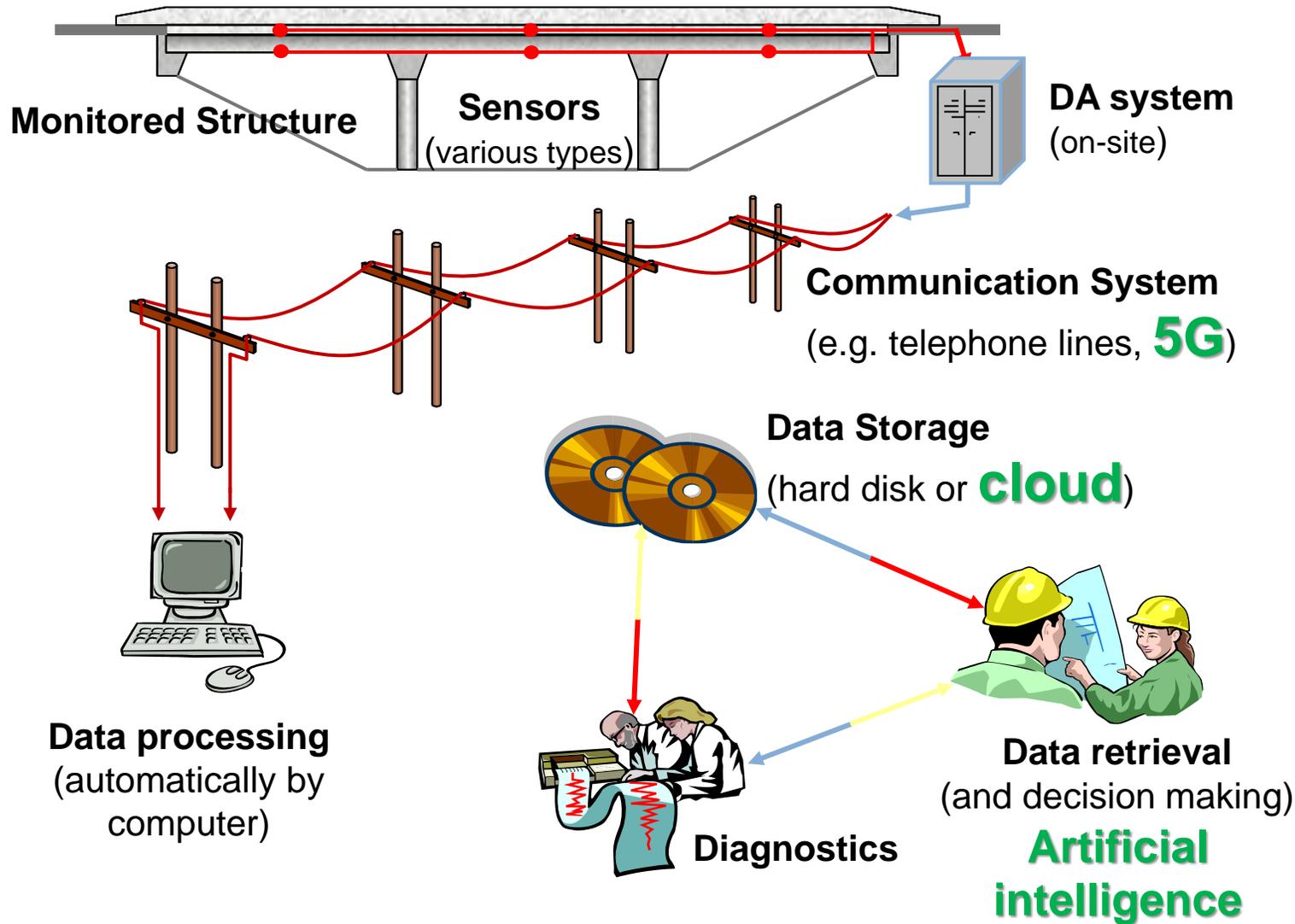
**Wireless Sensor Networks**  
(anni 2000 - Golden Gate)



**Tecniche SAR**  
(Radar ad apertura sintetica - l'interferometria di oggi)



# Il monitoraggio strumentale



Un sistema SHM ideale dovrebbe:

- fornire informazioni su richiesta sullo stato di salute di una struttura
- avvertire di danni significativi che sono stati rilevati.

Coinvolgimento di esperti in molte discipline, come strutture, materiali, rilevamento dei danni, sensori, gestione dei dati e elaborazione intelligente, computer e comunicazione.

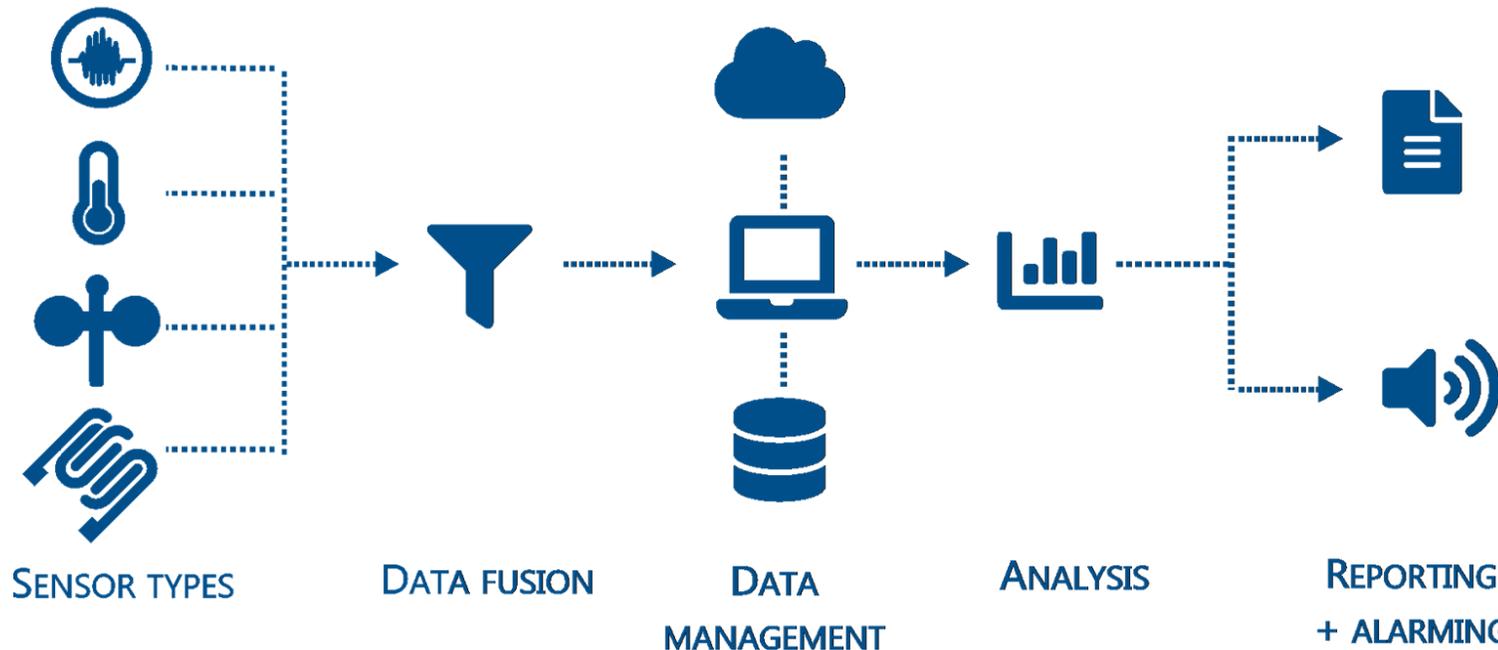
L'ispezione visiva rappresenta il metodo standard utilizzato per la valutazione strutturale, insieme alle tecniche di diagnostica.

Tuttavia, la maggior parte di queste tecniche:

- richiede molto lavoro manuale
- comporta interruzione dell'operatività
- non forniscono un risultato immediato

L'interesse per l'SHM sta crescendo per il risparmio sui costi dovuto alla riduzione del numero di ispezioni

## Monitoring Process Flow



rapido  
e  
efficace !!

Medico che si occupa  
del controllo della salute



## Attività

- ❑ Utilizzo delle strumentazioni mediche per verificare la salute dell'uomo
- ❑ Prescrivere le medicine per la cura se parametri sono alterati

## Requisiti

- ✓ Conoscere il corpo umano (struttura ossea, organi, ...)
- ✓ Conoscere le possibili malattie e la loro relazione con i sintomi
- ✓ Effettuare un'analisi considerando valori di riferimento dei valori misurati per effettuare la diagnosi

Ingegnere che si occupa  
di monitoraggio strutturale



## Attività

- ❑ Utilizzo di strumenti di misura per verificare la salute della struttura
- ❑ Indica gli interventi per correggere la situazione se tensioni o deformazioni sono eccessive

## Requisiti

- ✓ Conoscere il comportamento della struttura (schema statico, materiali, ...)
- ✓ Conoscere la causa del degrado e del danno
- ✓ Definire i valori soglia dei parametri che influenzano il comportamento della struttura

## Obiettivi e finalità del sistema di monitoraggio

elemento degradato e/o con difetto conclamato (e.g. appoggio, sella Gerber, curvatura)  
degrado globale (non conclamato)  
monitoraggio sismico

## Progetto del sistema di monitoraggio

Tipologia strutturale, schemi statici e dettagli costruttivi

Progetti – Ispezioni – Indagini – Identificazione dinamica – Prove di collaudo

Fenomeni di degrado/danno

Descrizione e modellazione numerica dei fenomeni

Parametri misurabili per la valutazione dei fenomeni (specifico per struttura e/o tipologia strutturale)

Strumentazione per il monitoraggio

parametro globale                      abbassamento, rotazione, frequenze

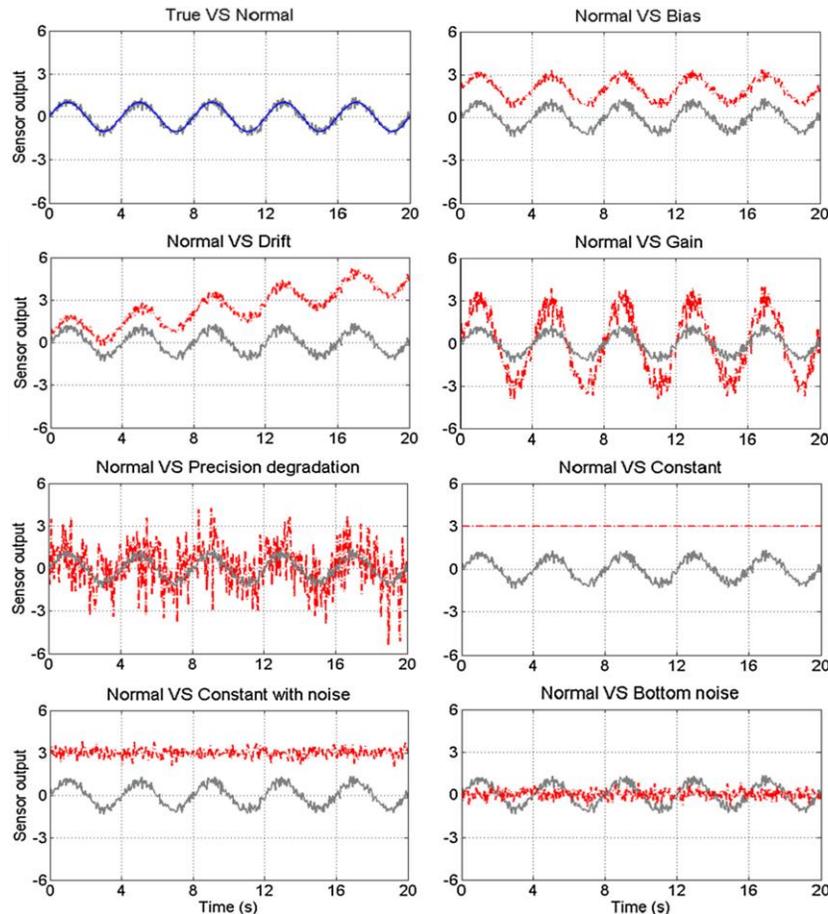
parametro locale                      spostamento, deformazione, deformata modale

Clinometri, Deformometri, Trasduttori di spostamento, Accelerometri, Condizioni ambientali

Layout del sistema di monitoraggio

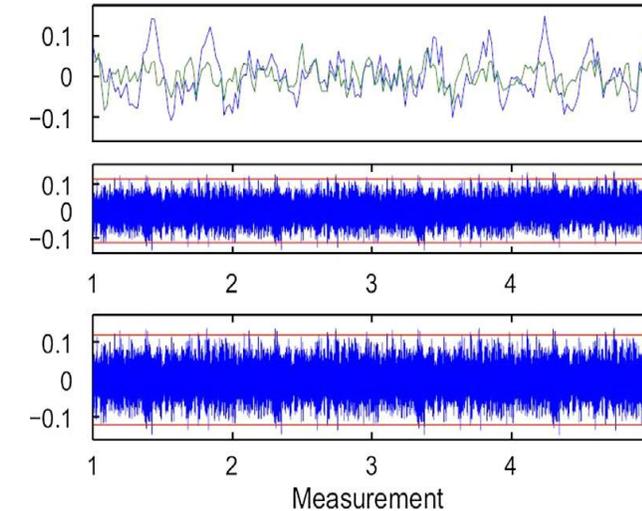
Caratteristiche sensori, sistema di acquisizione, elaborazione dei dati

## Alterazione delle misure del sensore Vs anomalia strutturale



Errore di misura più difficilmente distinguibile per:

- Interazione con i veicoli
- Strutture da ponte con alta deformabilità
- Azione sismica



- Procedure per la certificazione nel tempo dei sistemi di monitoraggio (in situ)
- Correlazione meccanica delle misure dei diversi sensori.  
Il modello (numerico) può aiutare (è tipico delle nostre discipline)
- Tempestività dell'informazione → Reti neurali e algoritmi avanzati



Ting-Hua Yi, Hai-Bin Huang, Hong-Nan Li (2017) *Development of sensor validation methodologies for structural health monitoring: A comprehensive review* Measurement 109, 200–214. Elsevier. DOI:10.1016/j.measurement.2017.05.064



Oreste S. Bursi, Daniele Zonta, Emiliano Debiassi, Davide Trapani (2018) *Structural health monitoring for seismic protection of structure and infrastructure systems*. 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE) in Thessaloniki, Greece.

## Flusso e gestione di grandi quantità di dati

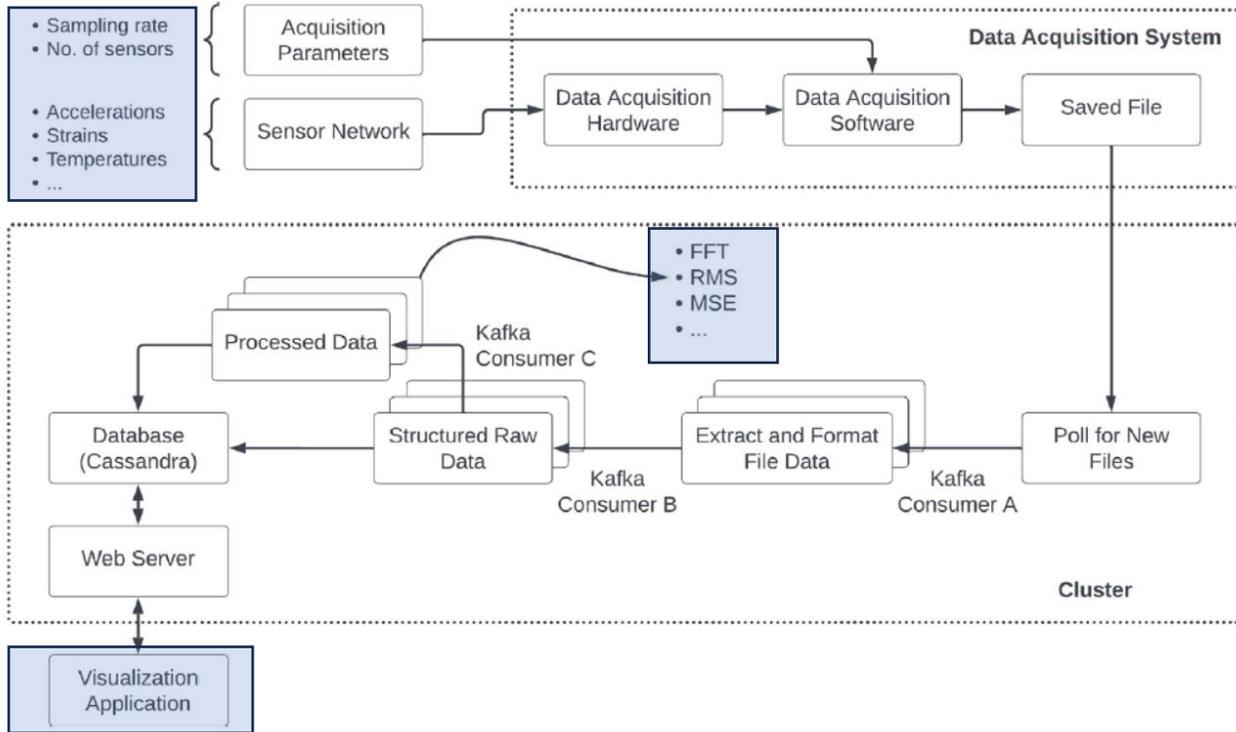


Fig. 4. Dashboard showing the frequency spectrum (E) and the MSE (F) in historical mode (A). The date selector (B), floor drop-down (C) and sensor properties menu (D)

- Sostenibilità della gestione dei dati
- Velocità di analisi dei dati ed efficacia

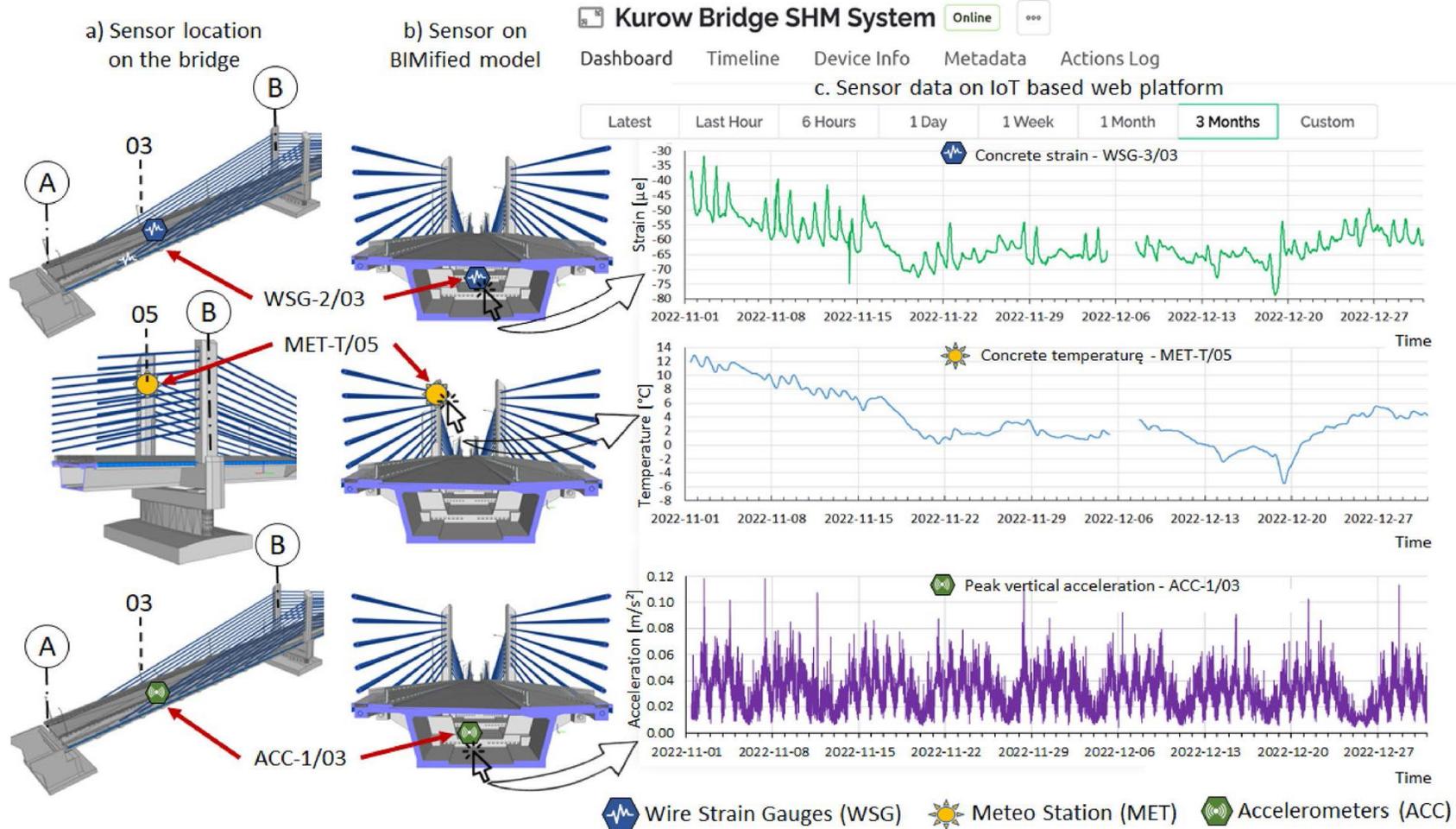
Sono utili le analisi dei casi studio

ANAS  
ASPI  
RFI



Natasha Vipond, Abhinav Kumar, Joseph James, Frederick Paige, Rodrigo Sarlo, Zhiwu Xie (2023)  
*Real-time processing and visualization for smart infrastructure data.*  
 Automation in Construction 154, 104998. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104998>

## Flusso e gestione di grandi quantità di dati



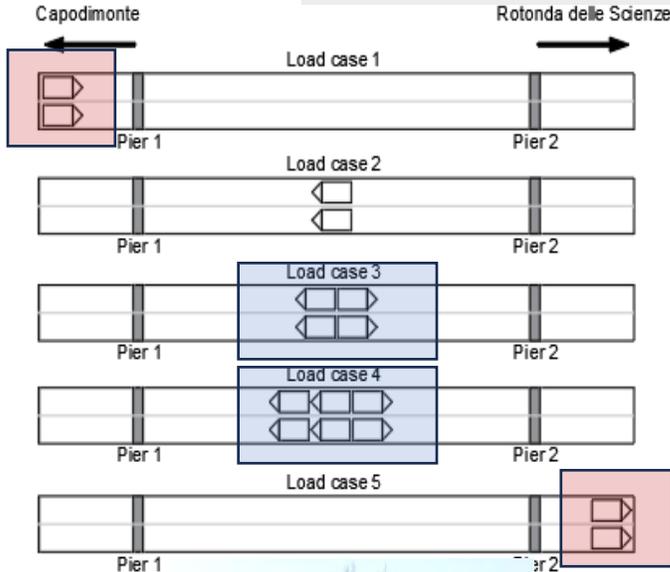
- La rappresentazione dei dati real time serve?
- Utile il gemello digitale con modello FEM (con degrado)
- In alcuni casi è utile monitoraggio geotecnico



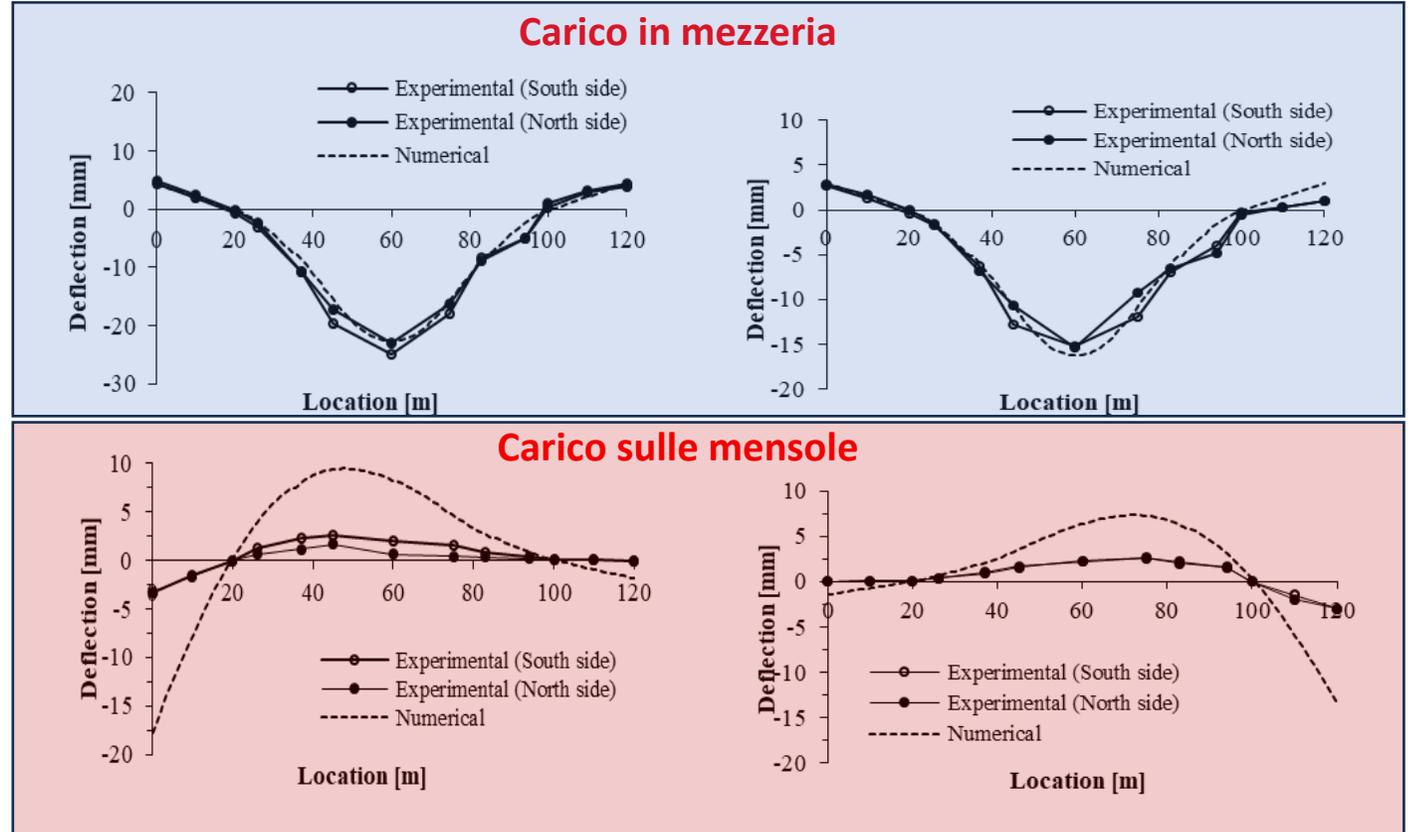
Muhammad Fawad, Marek Salamak, Grzegorz Poprawa, Kalman Koris, Marcin Jasinski, Piotr Lazinski, Dawid Piotrowski, Muhammad Hasnain & Michael Gerges (2023) *Automation of structural health monitoring (SHM) system of a bridge using BIMification approach and BIM-based finite element model development* Scientific Reports, 13:13215 | <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40355-7>

## Importanza della documentazione di progetto

### Test di carico per aggiornamento del modello



### Spostamenti prima del model updating



Il modello iniziale non è soddisfacente quando il carico è sullo sbalzo

Alessandra De Angelis, Maria Rosaria Pecce (2023)

*Model assessment of a bridge by load and dynamic tests*

Engineering Structures, 275, 115282. Elsevier. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115282

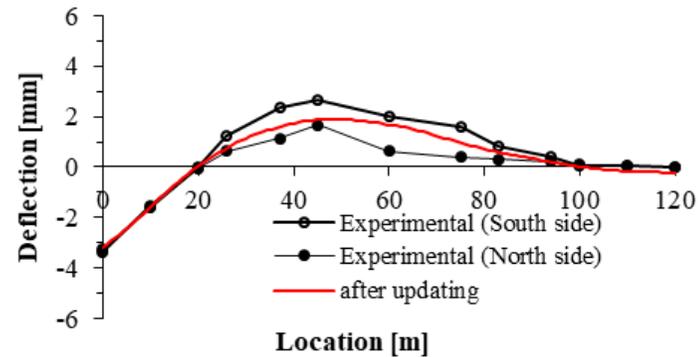
## Importanza della documentazione di progetto

### Risultati dell'aggiornamento del modello

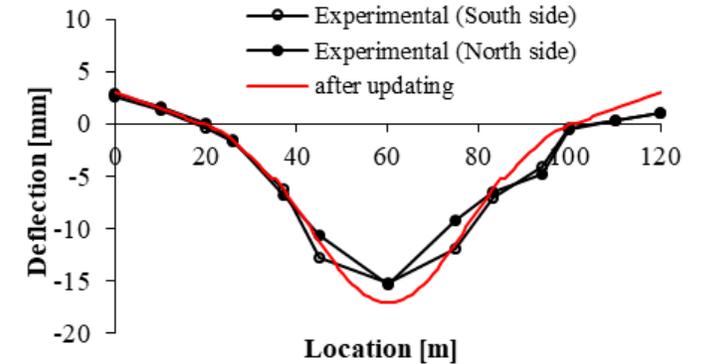


Gli sbalzi sono sostenuti dai gabbioni:  
non c'è un'intercapedine  
perché è riempita di cemento

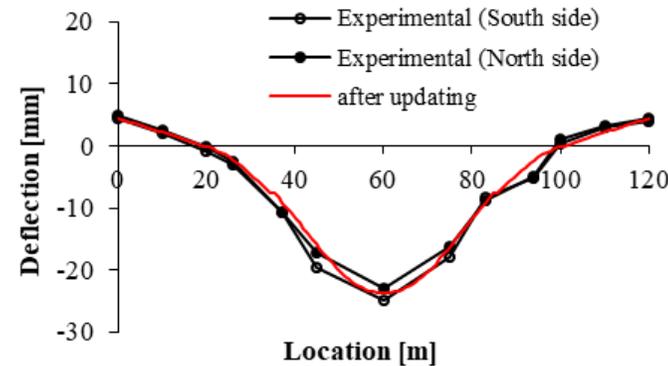
**Comportamento diverso  
da quello progettato !**



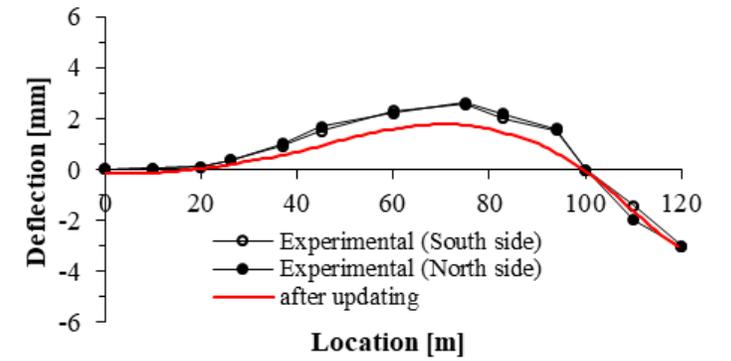
(a)



(b)



(c)

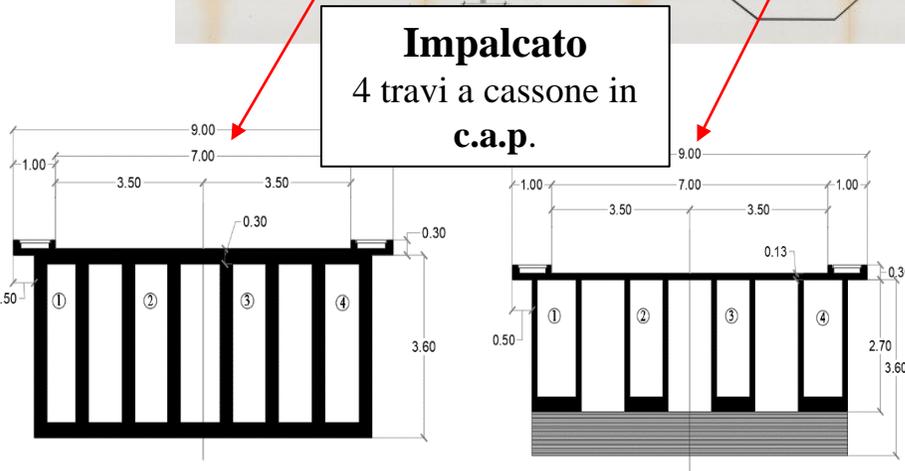
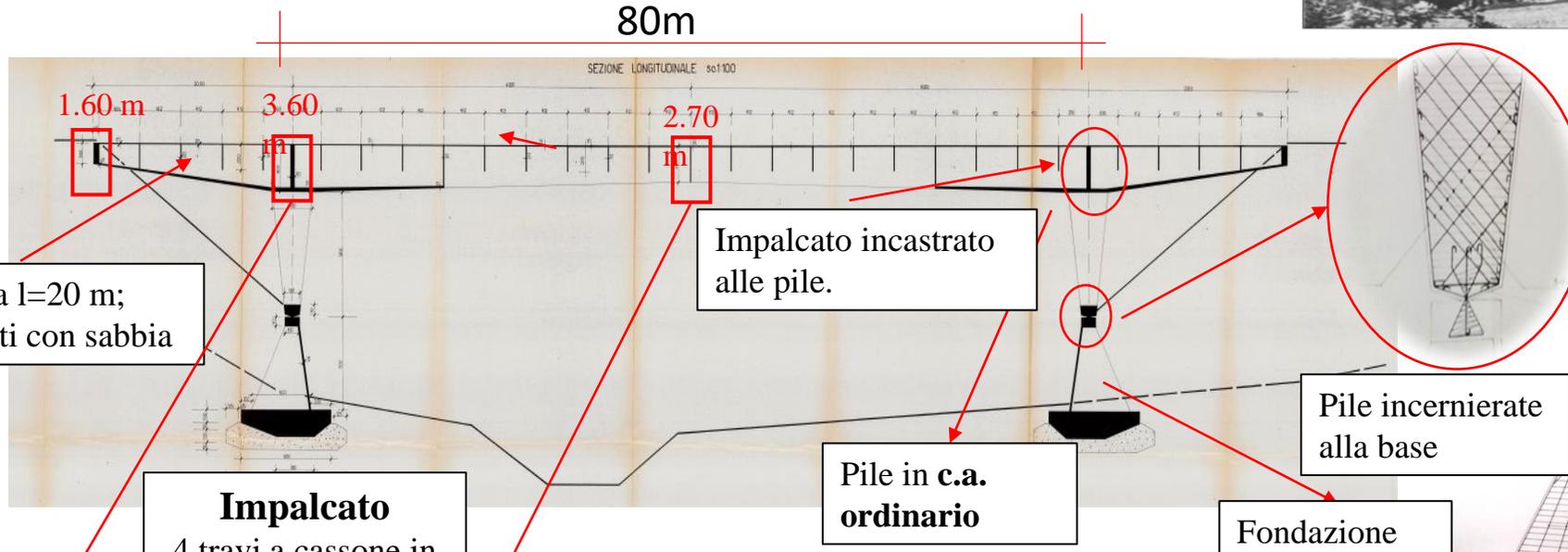


(d)

Alessandra De Angelis, Maria Rosaria Pecce (2023)  
*Model assessment of a bridge by load and dynamic tests*  
Engineering Structures, 275, 115282. Elsevier. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115282

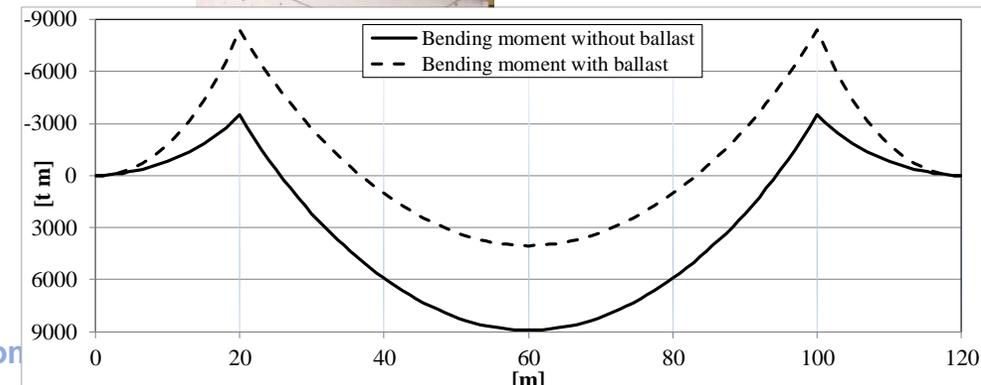
## Importanza della documentazione di progetto

Ponte in c.a.p. realizzato negli anni '50 a Benevento (Riccardo Morandi)



### Geometria

- Soletta superiore (13÷30 cm)
- Soletta inferiore (20÷30 cm)
- Anime cassoni di spessore variabile 13 ÷ 30 cm



## Indagini e diagnostica

**§6.2.2, §6.3.3.5, §7.4.3.1, appendici**

Suggerimenti/guida operativa sulle tecniche di indagine (e.g. numero e tipo di prove) (georadar, tecniche radiografiche, prove vacuometriche, tomografia ultrasonica, prove di rilascio tensionale, emissioni acustiche, ...)

(suddivisione per tipologia strutturale).

**Manuali per applicazione  
LLGG**

## Model updating e riduzione incertezze di modello (casi studio) **§6.3.3.5, appendice**

- Procedure di ottimizzazione dell'updating (posizione sensori)
- Effetti ambientali (temperature, vento, traffico)
- Integrazione tra misure statiche e dinamiche
- Correlazione con altre indagini (DT e NDT)

## Sistemi di monitoraggio strumentale (casi studio) **§7, §7.6.3, §7.7.2 → appendice**

- Criteri di progetto per tipologia strutturale e in funzione dell'obiettivo (Interventi di manutenzione straordinaria o adeguamento, periodico per tipologia ripetitiva, periodico per supporto ad analisi degrado, monitoraggio continuo)
- Parametri da monitorare e soglie (accelerazioni, deformazioni, spostamenti, velocità)
- Sensoristica e acquisizione (durata dell'acquisizione, costo, sistema cablato o wi-fi)
- Effetti ambientali (temperature, vento, traffico)
- Metodi di interpretazione dei dati (model-based, data-driven supervisionato/non supervisionato, ibrido)
- Sistemi per le pesse dinamiche o transiti eccezionali
- Gestione dei dati (piattaforma per opera e su larga scala)
- Criteri di supporto alle decisioni

