Giornata di Studio

Lo stato della ricerca sulla valutazione del rischio e la verifica della sicurezza di ponti e viadotti

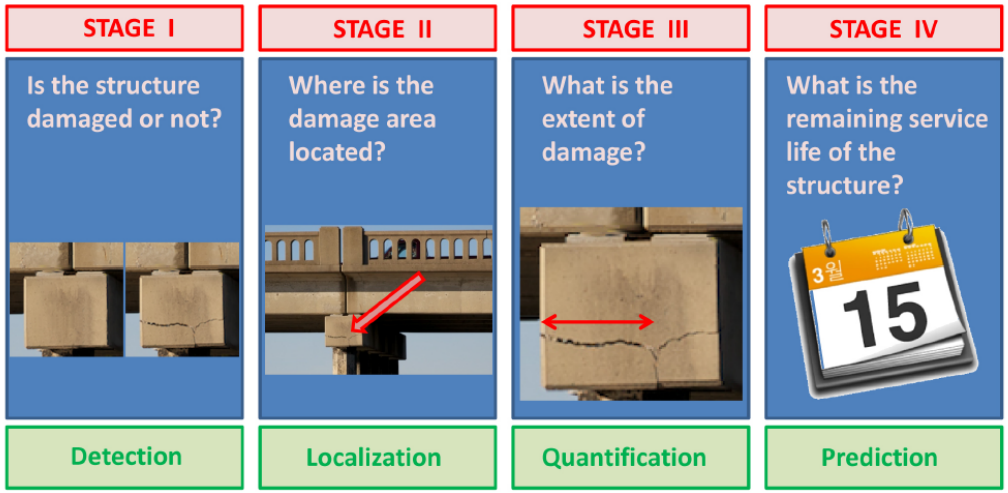
IL MONITORAGGIO DEI PONTI: ASPETTI GENERALI

Carmelo Gentile
DABC, Politecnico di Milano – **FABRE**

2 Settembre 2021

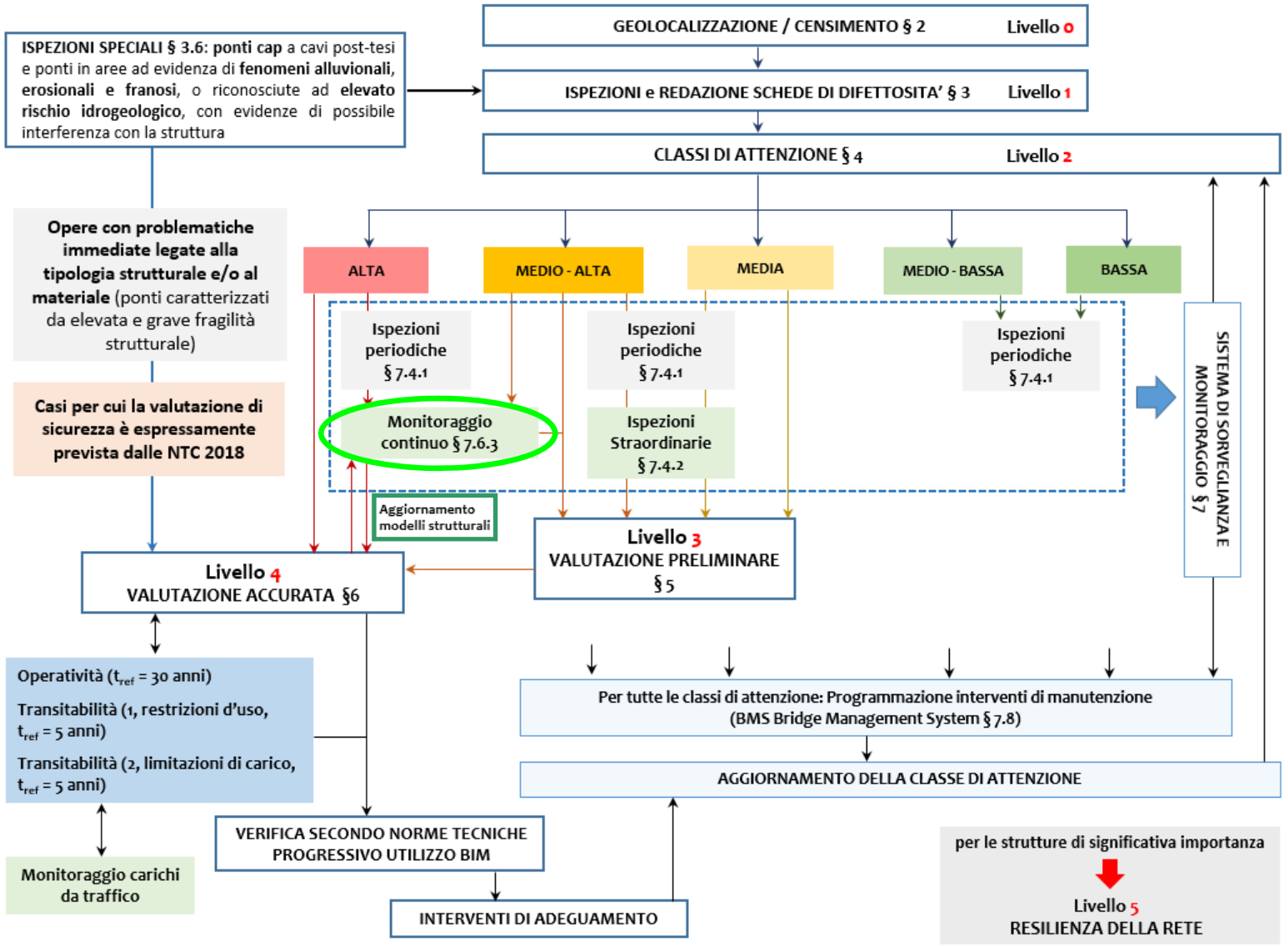
Sommario

- **Introduzione**
  - Istruzioni e documenti normativi
  - Campo d'applicazione del monitoraggio
  - Monitoraggio dinamico / statico
- **Il monitoraggio: obiettivo generale**
- **Monitoraggio dinamico / statico**
  - Effetti ambientali ed operativi
  - Strategia di *Structural Health Monitoring*
  - Esempi di identificazione del degrado



- **UNI 10985 (2002) "*Vibrazioni di ponti e viadotti. Linee guida per l'esecuzione di prove e rilievi dinamici*"**
- **D.M. 14/01/2008, "*Norme Tecniche per le Costruzioni*" (NTC 2008)**
- **Laboratoire Central des Ponts et Chausses (2009), "*Investigations et évaluation dynamiques des ponts*"**
- **D.M. 20/02/2018, "*Norme Tecniche per le Costruzioni*" (NTC 2018)**
- **UNI 11634 (2016) "*Linee guida per il monitoraggio strutturale*"**
- **MIT / CSLP (2020) "*Linee guida per la classificazione del rischio, la valutazione di sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti*"**
- **Regione Lombardia (2020) "*Linee Guida per il monitoraggio dei ponti*"**

Introduzione (2/7)



Monitoraggio

- Il monitoraggio si applica di regola a ponti appartenenti a Classe di Attenzione alta o medio–alta e da LC accurato (documentazione di progetto/collaudo, indagini preliminari su strutture e materiali, disponibilità di modello validato o *digital twin, …*);
- Il monitoraggio è generalmente raccomandato per ponti a tipologia speciale (ponti strallati o sospesi, ponti di grande luce, ponti caratterizzati da soluzioni strutturali innovative, ponti con difficoltà di ispezione, ponti storici, ecc.);
- Il monitoraggio può talora applicarsi a infrastrutture che non presentino un LC accurato (quando il ponte sia caratterizzato da chiari fenomeni locali o globali da indagare);
- Monitoraggio strutturale / geotecnico / idraulico;
- Monitoraggio periodico / continuo;
- Monitoraggio dinamico / statico.

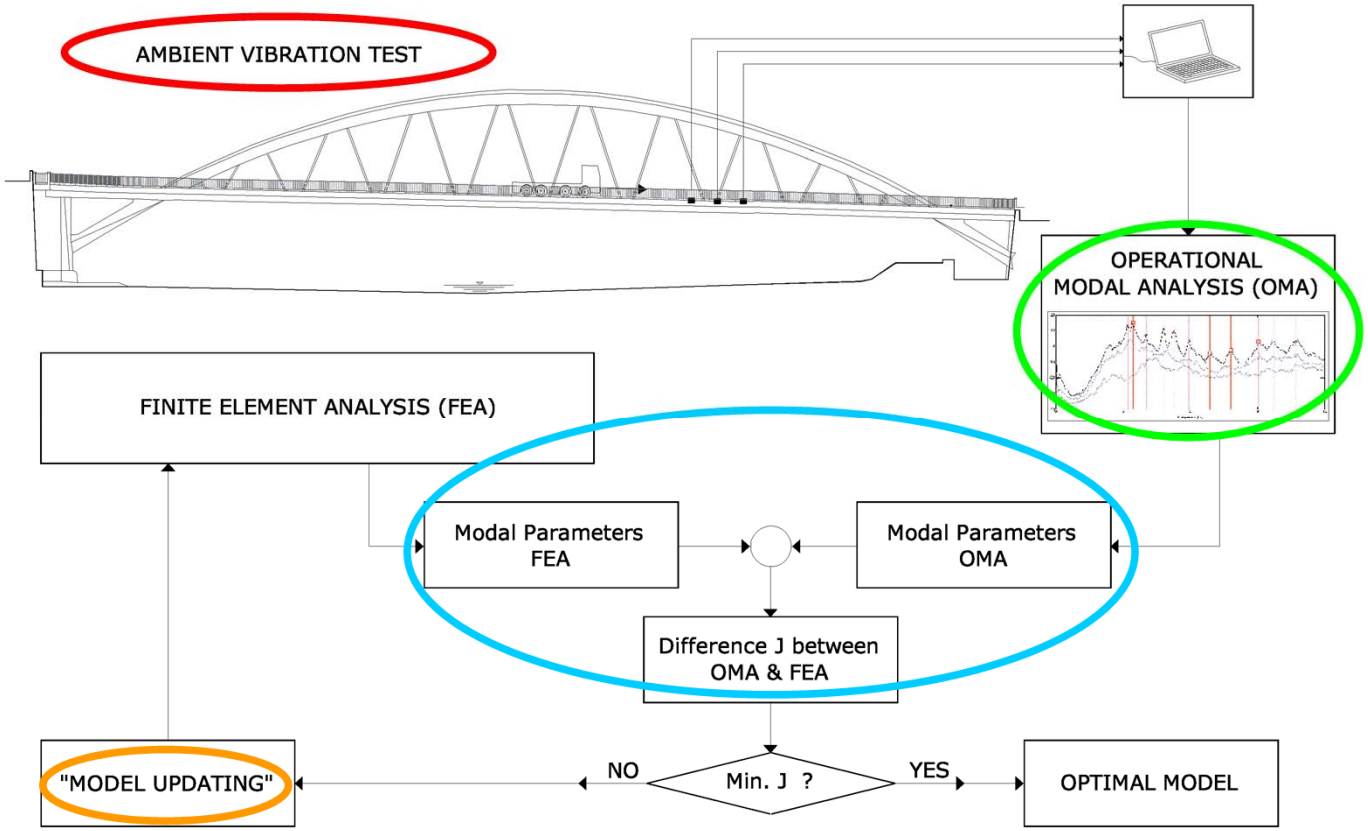
Monitoraggio statico

- Monitoraggio statico: installazione permanente di sensori (estensimetri, *strain gauges*, inclinometri, …) atti a registrare in modo continuo (a frequenze di campionamento dell'ordine di o inferiori a 1 Hz) la risposta quasi–statica alle azioni d'esercizio (traffico, micro-tremori, vento, …) ed i parametri ambientali (temperatura, umidità, …);
- Le grandezze misurate nel monitoraggio statico dipendono dai parametri ambientali e da fattori non noti (azioni di esercizio);
- Nel monitoraggio statico, gli indicatori della condizione strutturale sono generalmente le medesime grandezze misurate (deformazioni, rotazioni, spostamenti, …).

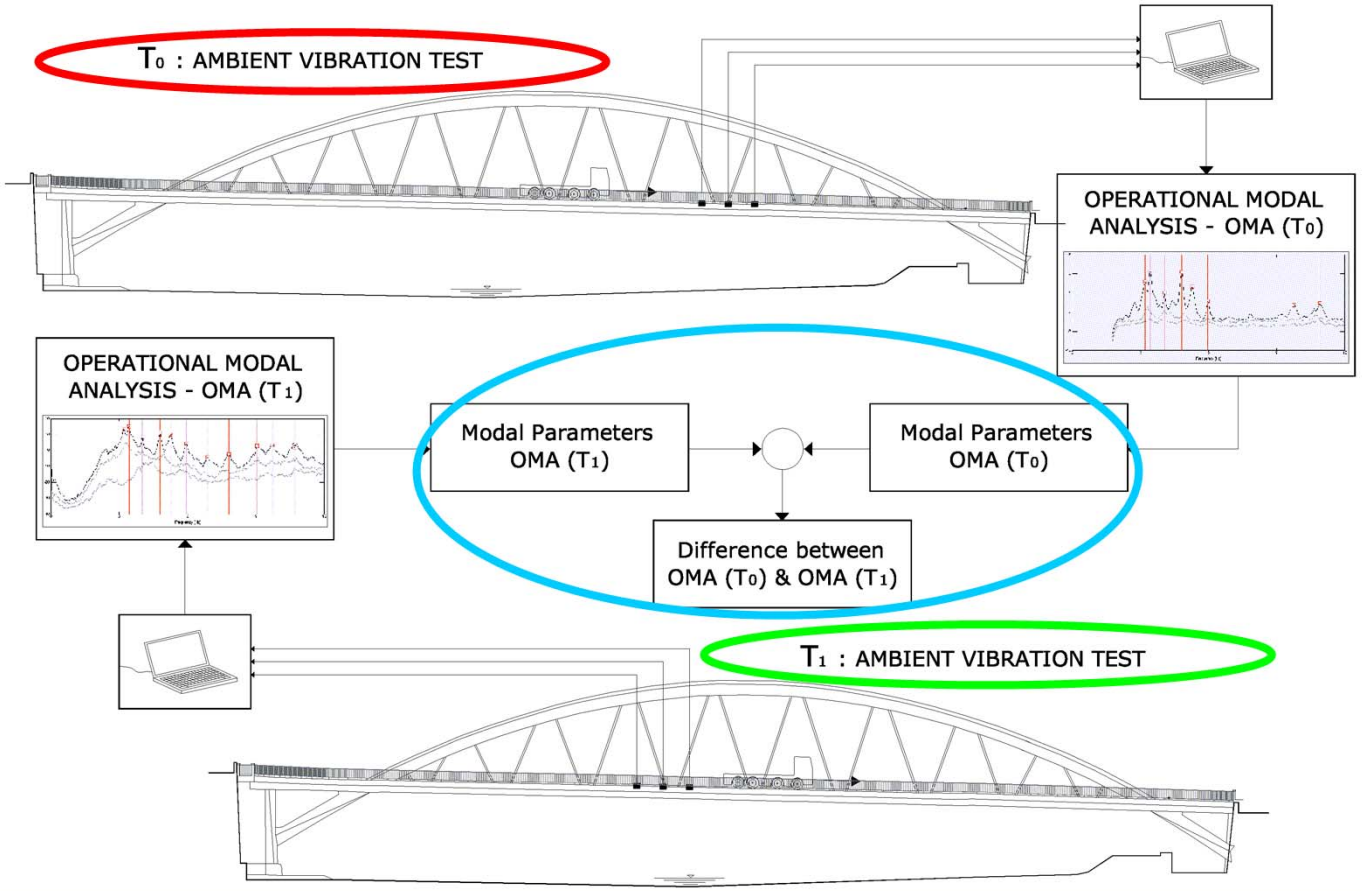
Monitoraggio dinamico

- Installazione permanente di sensori (accelerometri, sismo-metri, …) atti a registrare in modo continuo (tipicamente a frequenze di campionamento dell'ordine di 100-200 Hz) la risposta dinamica alle azioni d'esercizio (traffico, micro-tremori, vento, …);
- Anche la risposta dinamica di un ponte dipende dai parametri ambientali e dalle azioni di esercizio (non note);
- Il monitoraggio dinamico è generalmente accompagnato dall'identificazione ad intervalli prefissati (tipicamente di 3600 s) delle caratteristiche dinamiche modali (in particolare, frequenze proprie e deformate modali);
- Perché i parametri modali sono importanti ?

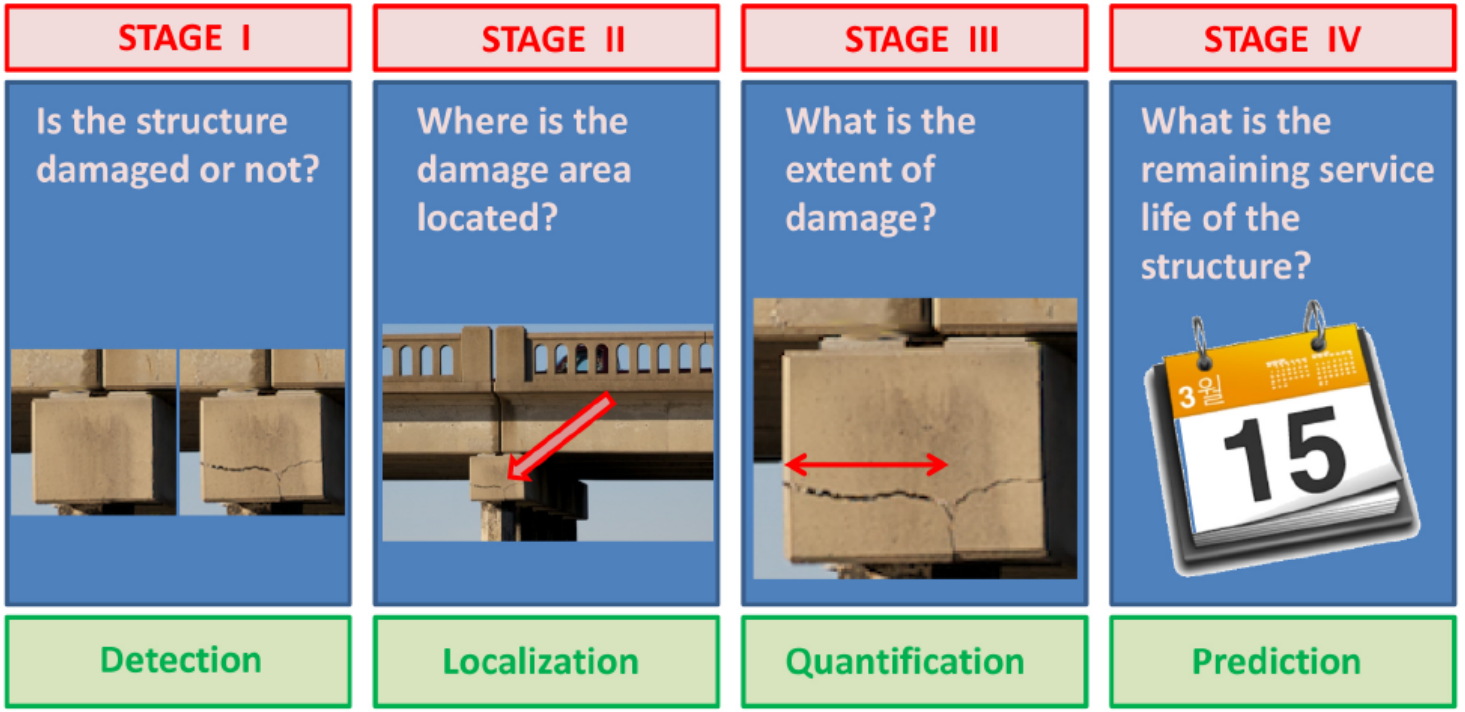
- f_r, ϕ_r possono essere "estratte" dalla risposta dinamica;
- Frequenze proprie e le deformate modali dipendono dalla distribuzione reale di masse e rigidezze.



- f_r, ϕ_r possono essere "estratte" dalla risposta dinamica;
- Per una struttura lineare ed invariante nel tempo, i parametri modali sono (*) invarianti nel tempo.



- **Livelli di identificazione del degrado**
  - **Livello 1, identificazione della presenza di un' anomalia;**
  - **Livello 2, localizzazione dell'anomalia;**
  - **Livello 3, quantificazione della gravità dell'anomalia;**
  - **Livello 4, prognosi e definizione della vita residua.**



Il monitoraggio: obiettivo generale (Rytter, 1993)

- **Livelli di identificazione del degrado**
  - **Livello 1, identificazione della presenza di un' anomalia;**
  - **Livello 2, localizzazione dell'anomalia;**
  - **Livello 3, quantificazione della gravità dell'anomalia;**
  - **Livello 4, prognosi e definizione della vita residua.**

NB: Livelli 1-2 ⇨ analisi *data-driven*

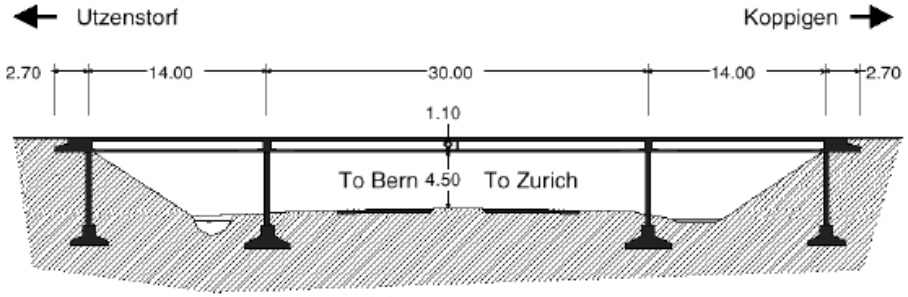
Livelli 2-4 ⇨ analisi *model-based*

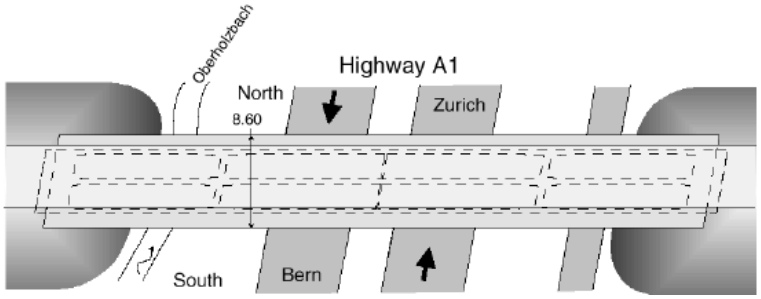
A. Rytter (1993). Vibration-based inspection of civil engineering structures. Ph.D. Thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, Denmark.

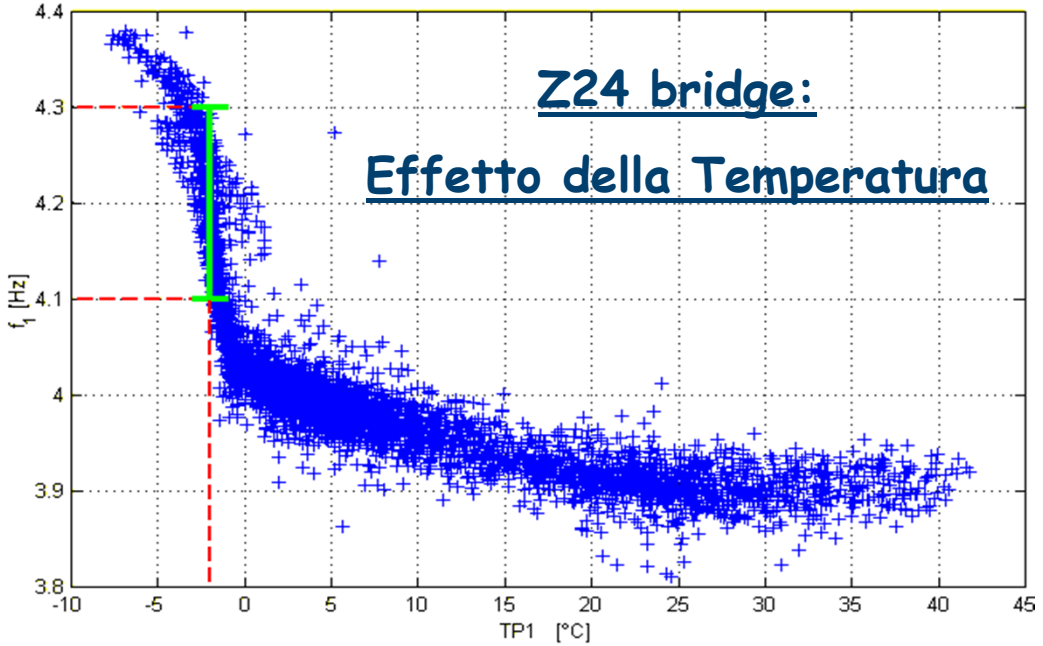
- Raccolta documentale delle informazioni relative al progetto originario e a eventuali interventi di manutenzione ordinaria o straordinaria;
- Rilievo geometrico ed ispezioni visive;
- Eventuale esecuzione di indagini locali non distruttive in sito ed il prelievo di campioni per prove di caratterizzazione dei materiali in laboratorio;
- Eventuale esecuzione di prove sperimentali condotte al fine di identificare le caratteristiche del comportamento globale e locale del ponte e la presenza di fenomeni di degrado;
- Implementazione di modelli numerici ed utilizzo dei dati sperimentali disponibili per la calibrazione dei parametri meccanici, e la modellazione delle condizioni di continuità e al contorno (vincoli).

Differente importanza e difficoltà per ponti di relativamente nuova realizzazione e infrastrutture esistenti e "storiche"

Monitoraggio dinamico
Effetti ambientali ed operativi



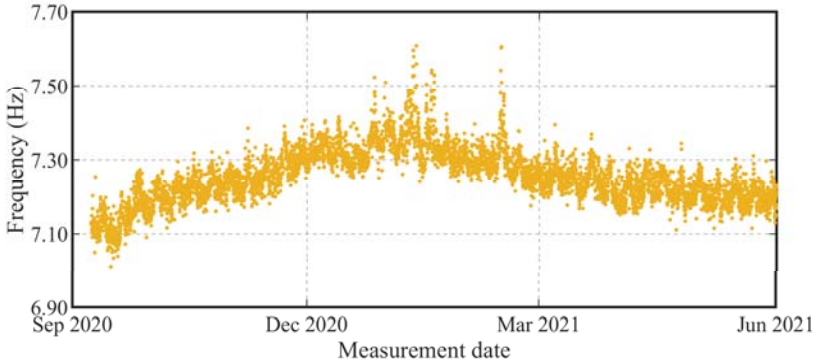


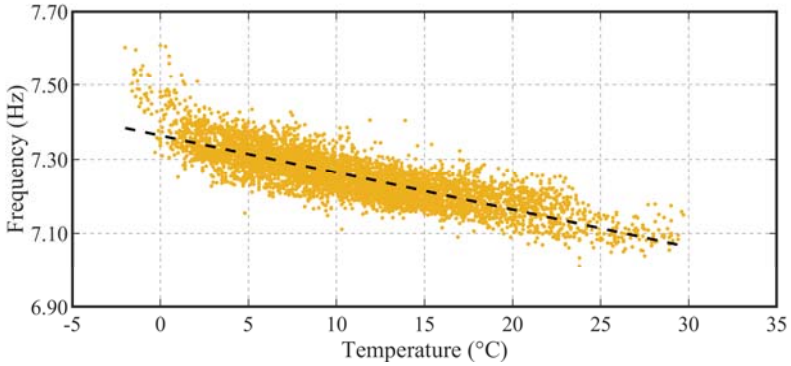


- ***In principio, le frequenze proprie dipendono da masse e rigidezze … ma le frequenze proprie variano anche per effetto delle condizioni ambientali e operative***

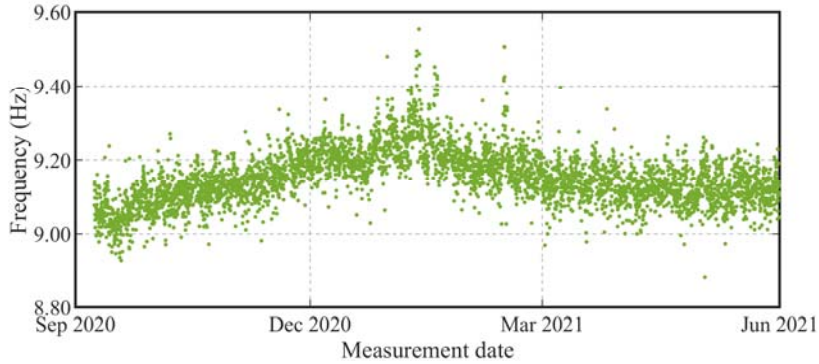
Monitoraggio dinamico
Effetti ambientali ed operativi

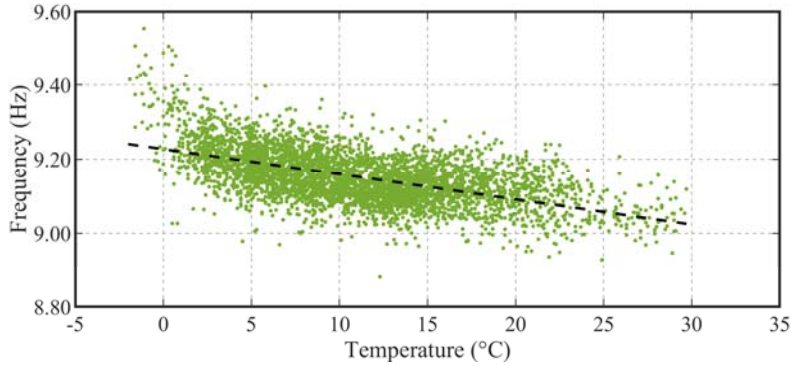
Modo 3 (S3)

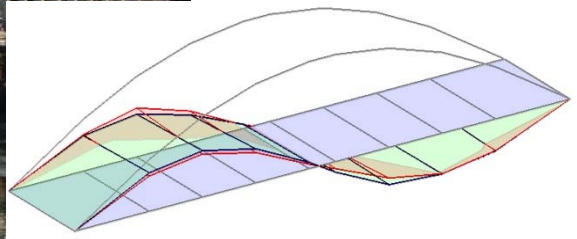




Modo 5 (S3)

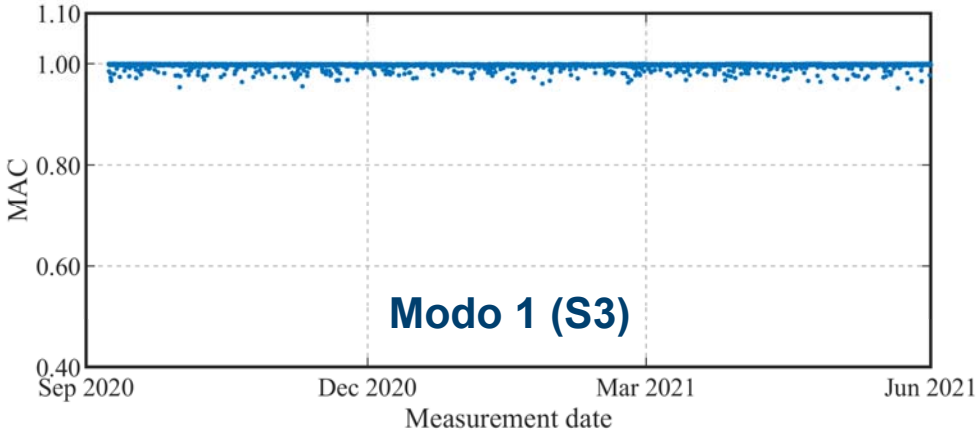




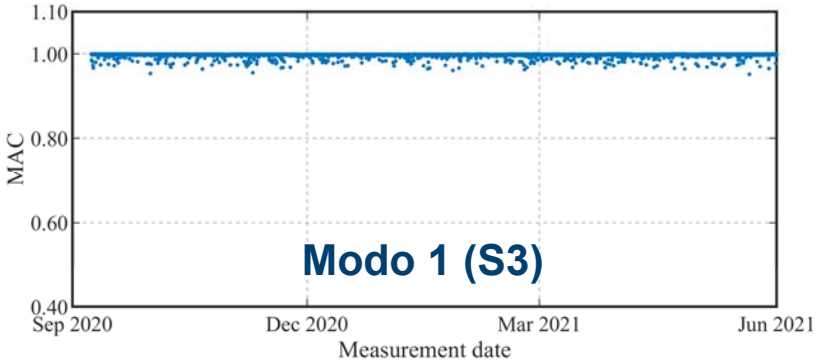


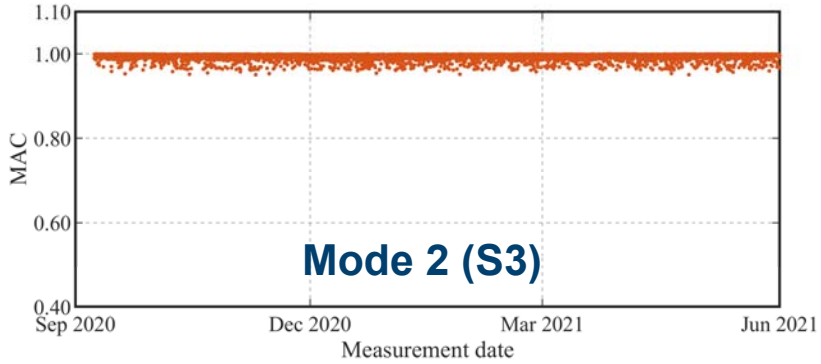
- *… al contrario, le deformate modali sono assai meno sensibili agli effetti ambientali ed operativi*

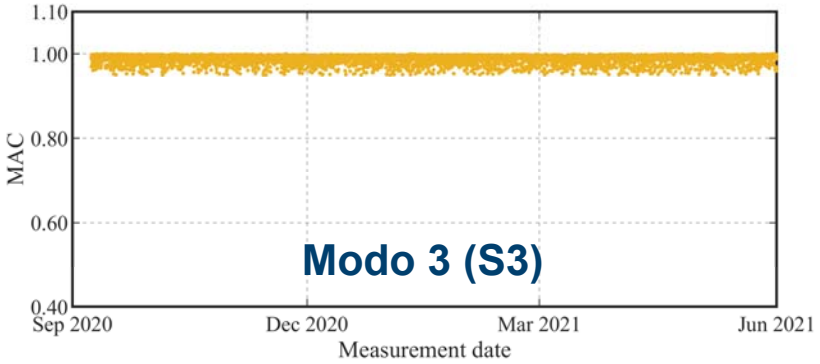
$$MAC(\boldsymbol{\phi}_X, \boldsymbol{\phi}_e) = \frac{(\boldsymbol{\phi}_X^t \boldsymbol{\phi}_e)^2}{(\boldsymbol{\phi}_X^t \boldsymbol{\phi}_X)(\boldsymbol{\phi}_e^t \boldsymbol{\phi}_e)}$$

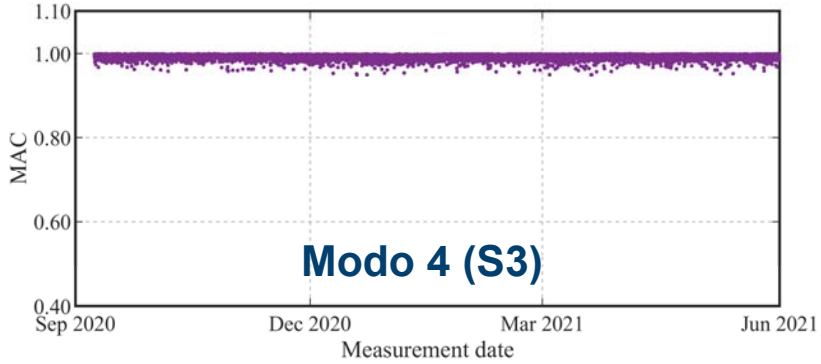


Monitoraggio dinamico
Effetti ambientali ed operativi

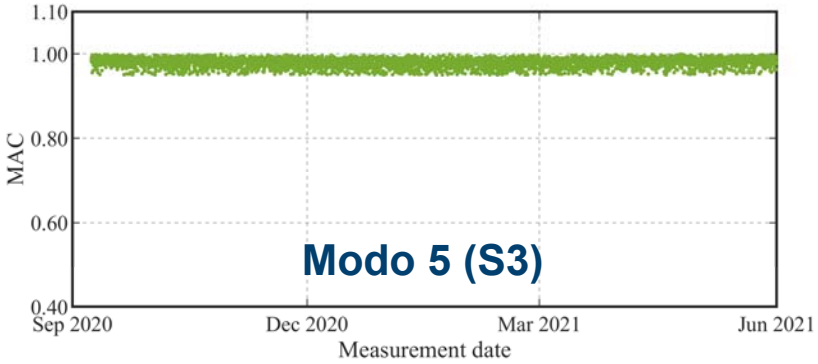


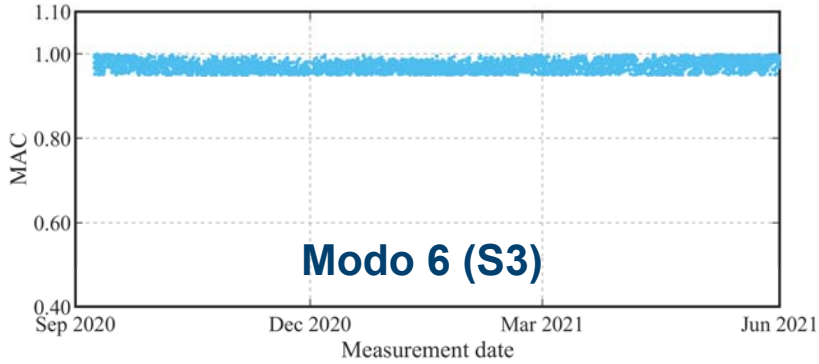


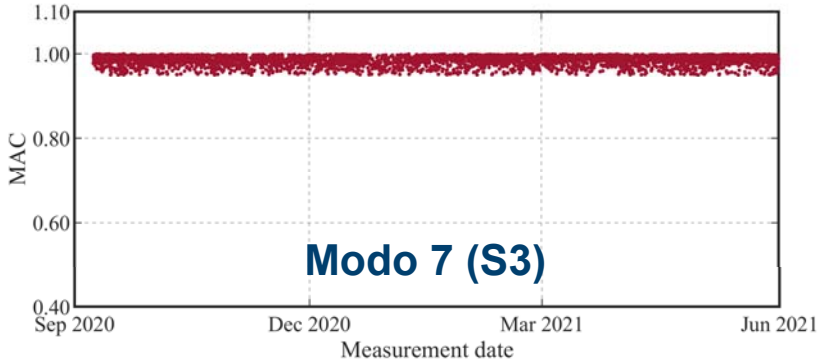


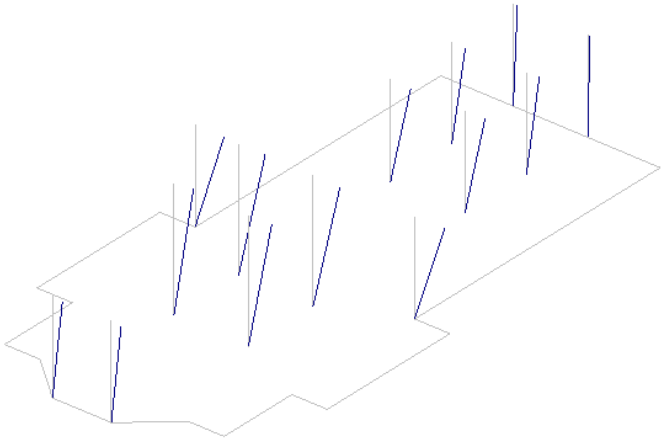


Monitoraggio dinamico
Effetti ambientali ed operativi





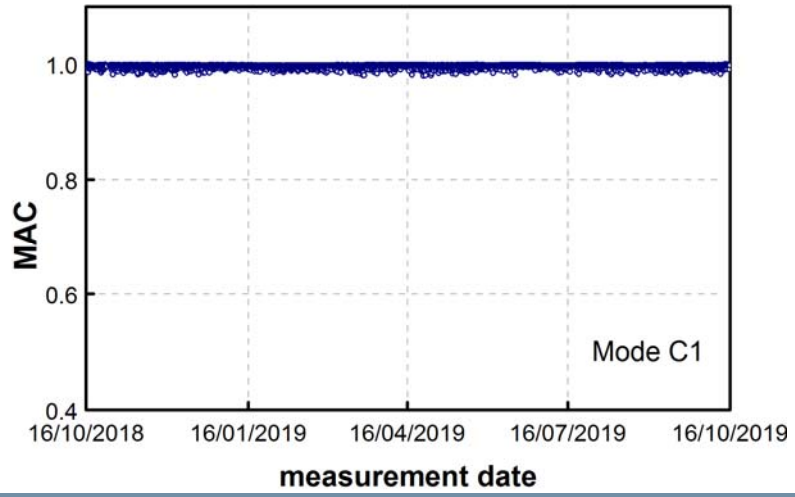




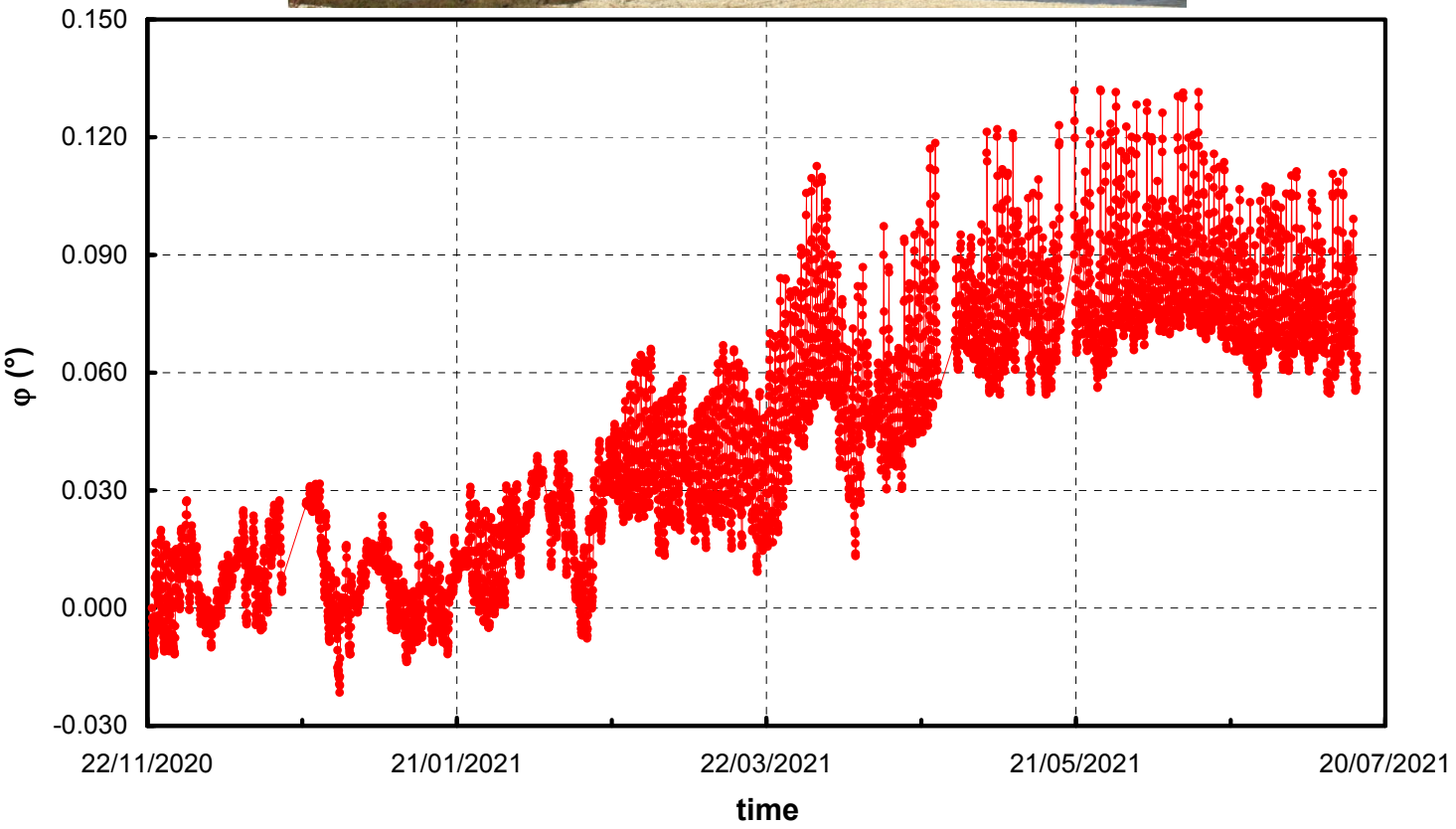
$f_1 = 1.39$ Hz
$\zeta_1 = 3.78$ %

- ***… al contrario, le deformate modali sono assai meno sensibili agli effetti ambientali ed operativi***

$$MAC(\boldsymbol{\phi}_X, \boldsymbol{\phi}_e) = \frac{(\boldsymbol{\phi}_X^t \boldsymbol{\phi}_e)^2}{(\boldsymbol{\phi}_X^t \boldsymbol{\phi}_X)(\boldsymbol{\phi}_e^t \boldsymbol{\phi}_e)}$$

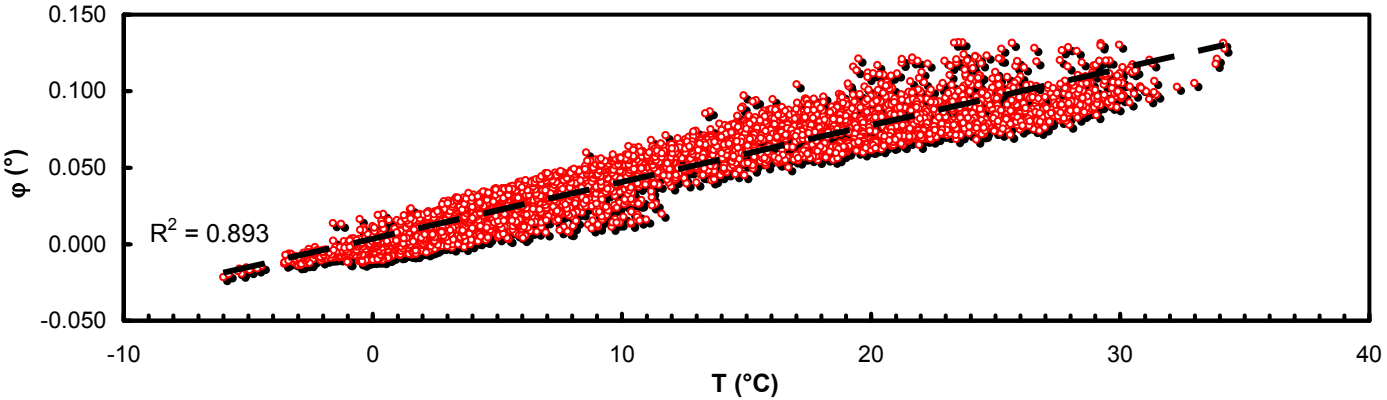


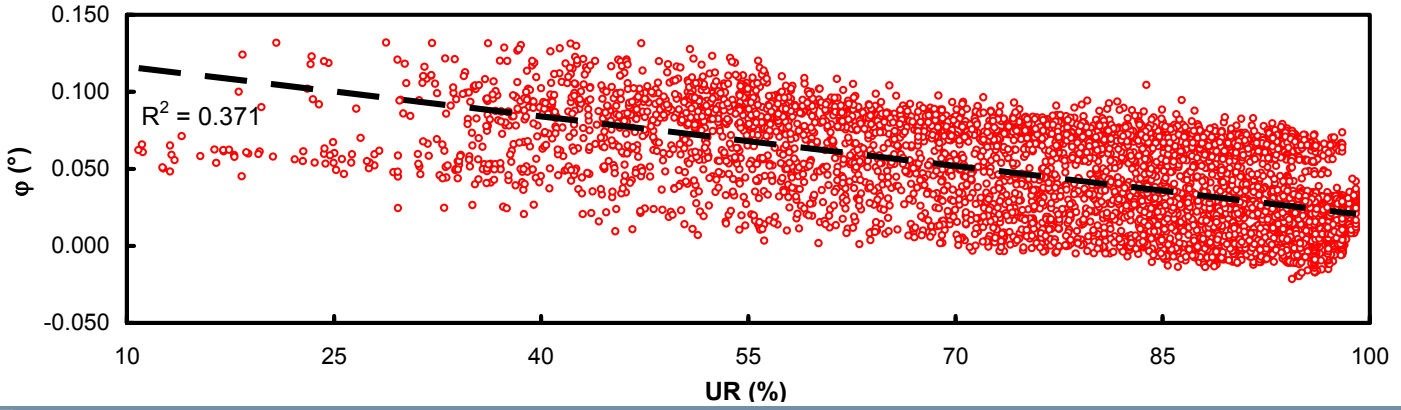
Monitoraggio statico
Effetti ambientali ed operativi



Monitoraggio statico
Effetti ambientali ed operativi

(2/2)

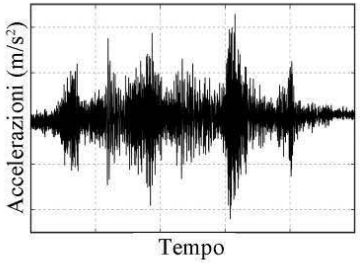




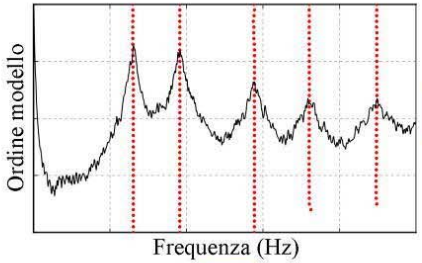
Monitoraggio dinamico / statico

Strategia di *Structural Health Monitoring*

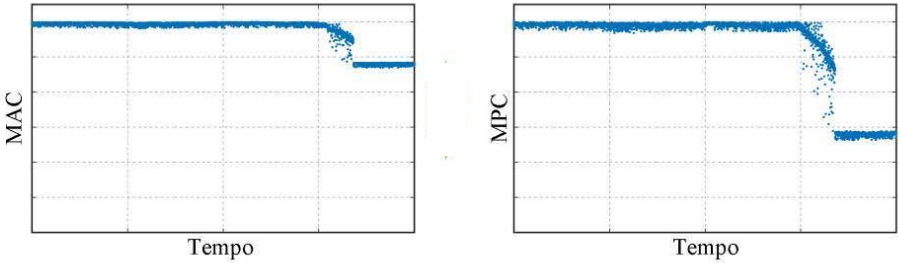
Pre-Processing



Identificazione modale



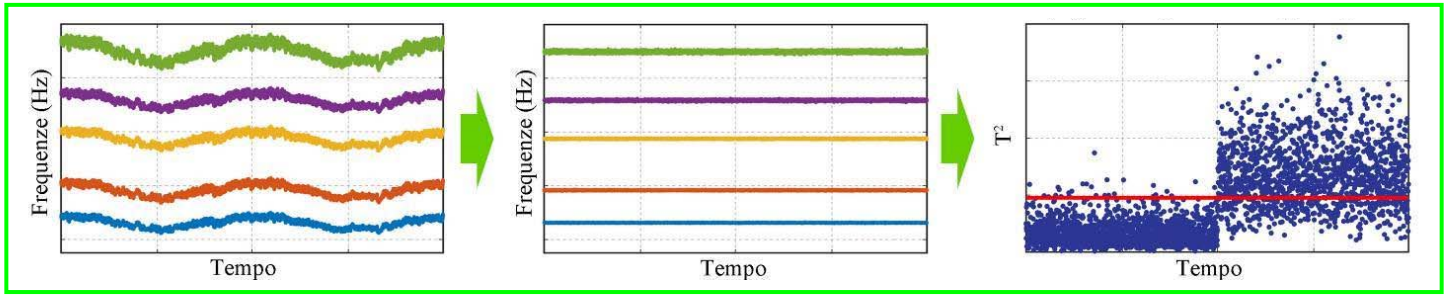
Identificazione del danno: (a) deformate modali



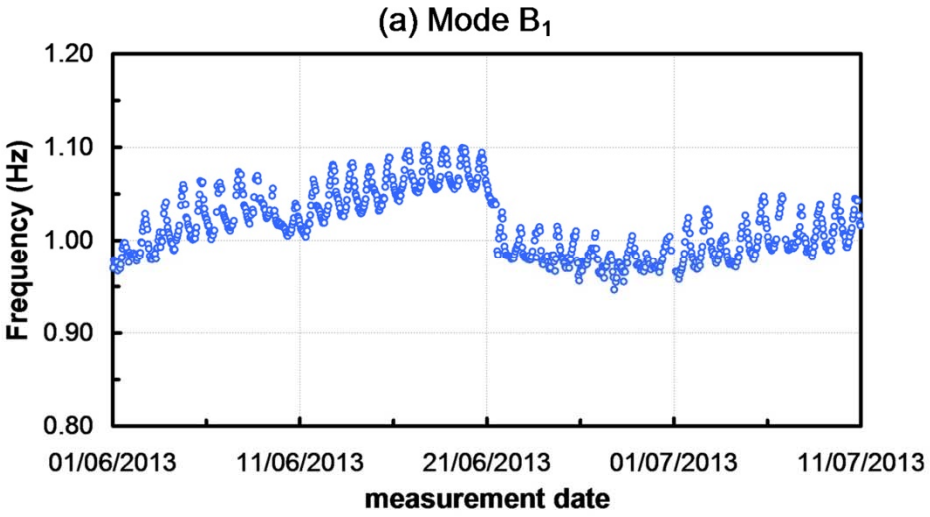
Tracking frequenze

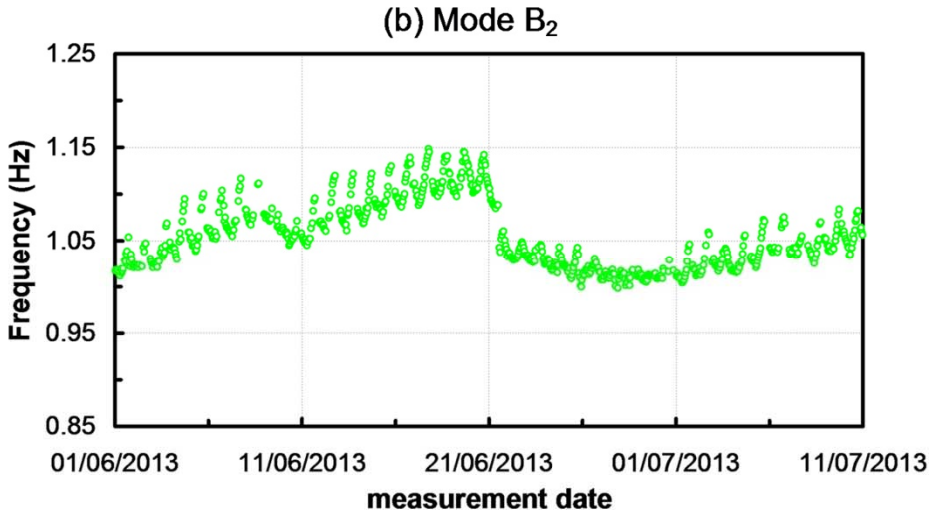
Identificazione del danno: (b) frequenze proprie

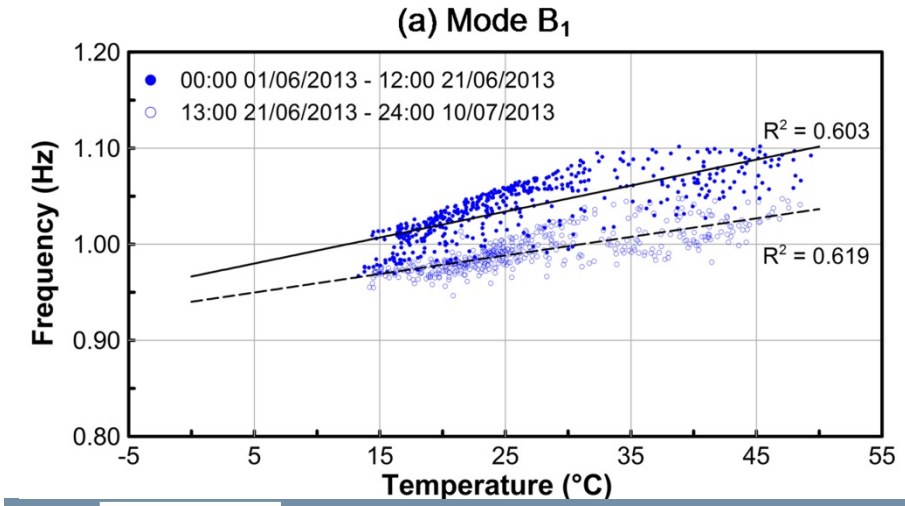
Monitoraggio Statico

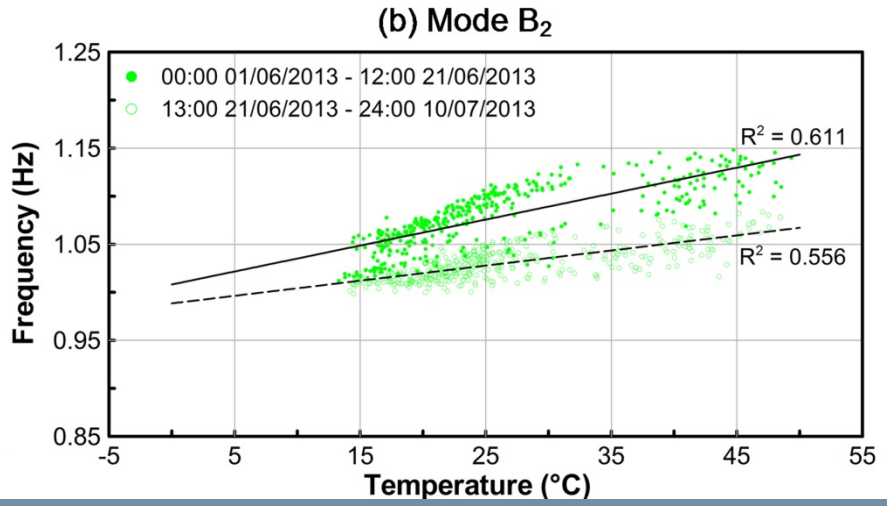


Effetti di temperatura e danno sulle frequenze proprie



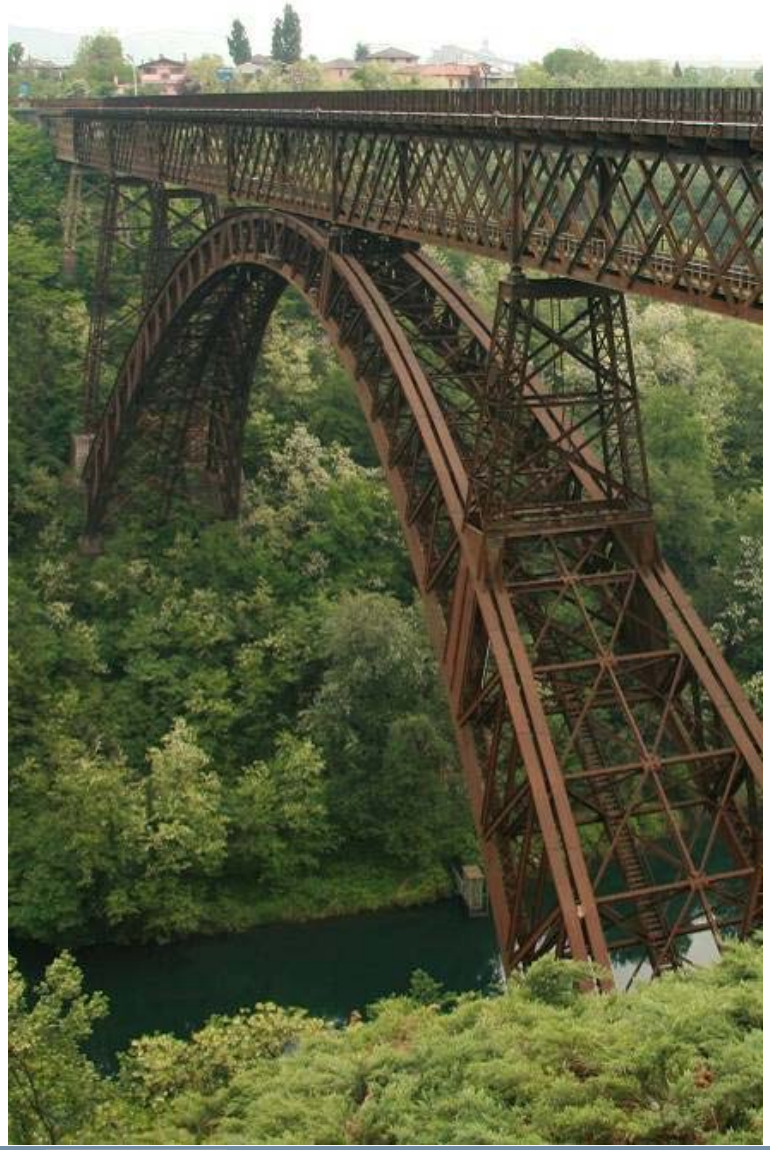


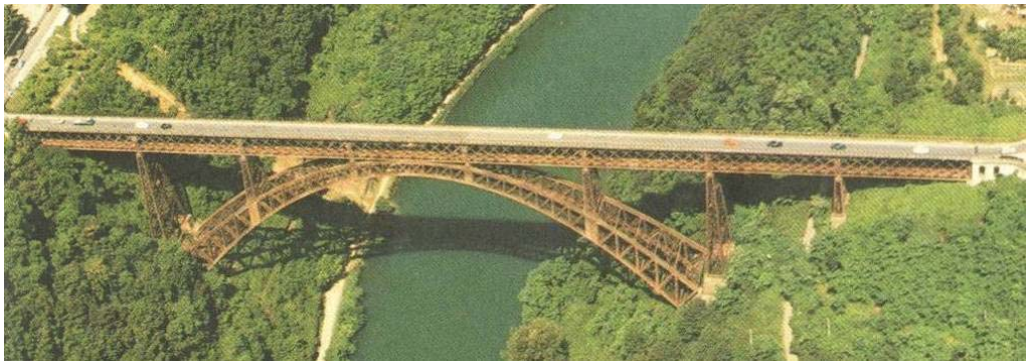




Monitoraggio dinamico

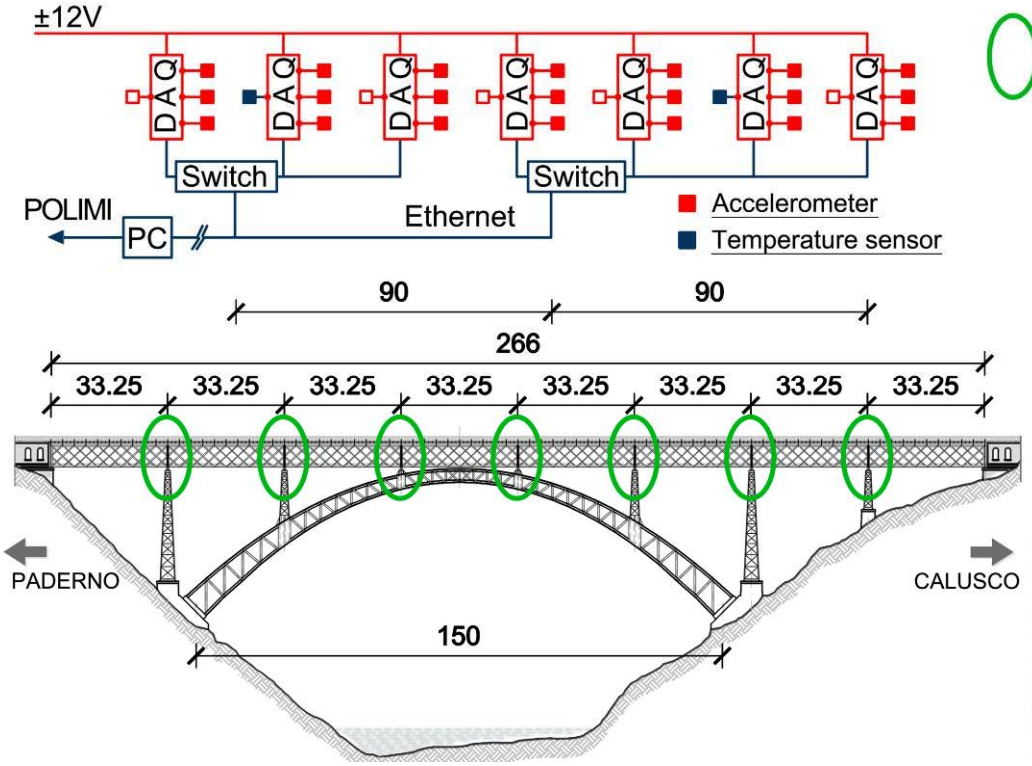
Identificazione del degrado: Ponte San Michele (1889) (1/3)

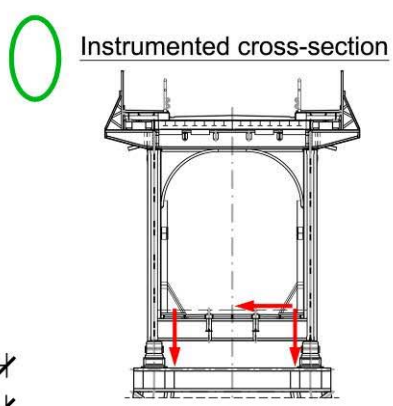


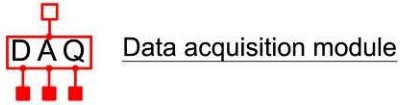


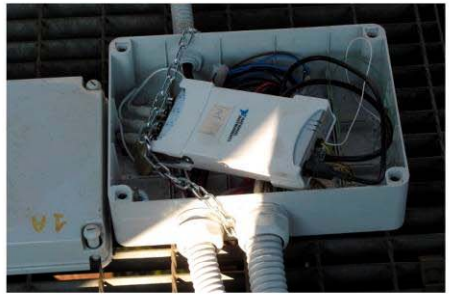
Monitoraggio dinamico

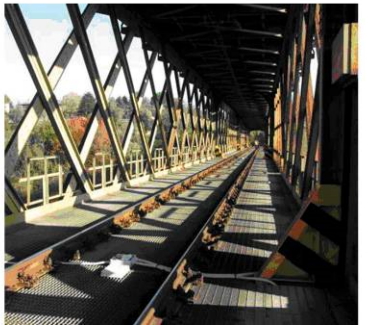
Identificazione del degrado: Ponte San Michele (1889) (2/3)

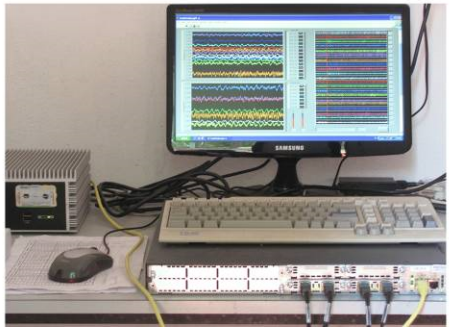










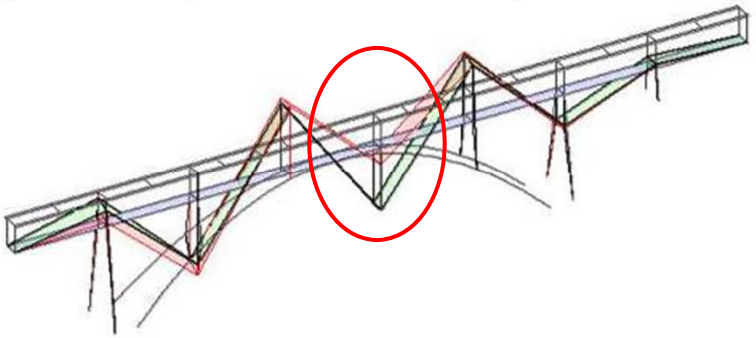


Hardware:

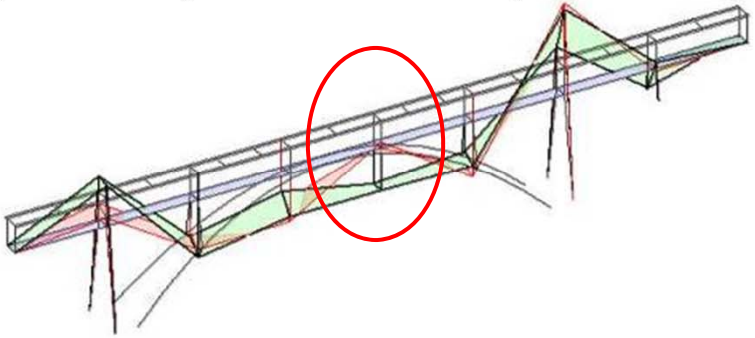
- 21 accelerometri (■) MEMS (Sensibilità: 1.2 V/g; *Range*: ±3.0 g);
- 2 sensori di temperatura (■);
- 7 moduli DAQ NI 9234;
- 2 *switch* Ethernet;
- 1 PC industriale in sito

Individuazione di anomalie strutturali

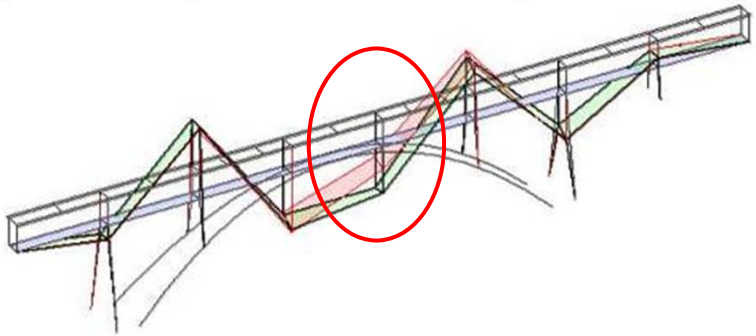
(e) VB5 — f = 10.74 Hz — f = 10.77 Hz



(f) VB6 — f = 11.05 Hz — f = 11.04 Hz



(g) VB7 — f = 11.93 Hz — f = 11.92 Hz



— 09/03/2012
— 30/11/2012

Conclusioni

- **Le Linee Guida MIT/CSLP assegnano alla sorveglianza e al monitoraggio un ruolo centrale nel processo di gestione della sicurezza dei ponti esistenti;**
- **Le indagini dinamiche ed il monitoraggio dinamico (permanente) sono metodi diagnostici efficaci, di validità generale e sostenibili;**
- **Nel monitoraggio dinamico, le grandezze misurate sono accelerazioni o velocità ma sono grandezze derivate (quali frequenze proprie e le deformate modali) a dare informazioni sullo "stato di salute" dell'opera !! In base a tali grandezze derivate è possibile istituire procedure di apprendimento automatico finalizzate all'individuazione delle anomalie;**
- **La gestione e l'interpretazione ingegneristica automatica del monitoraggio dinamico/statico sono attività che, non essendo non ancora coperte da affidabili software commerciali, comportano un costo annuo dello stesso ordine di grandezza del costo d'impianto. In quest'ambito, vanno create competenze e investite risorse !!**