

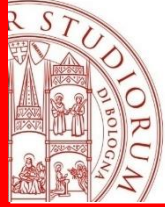


SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

Il monitoraggio vibrazionale on-site e l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed opere infrastrutturali (Parte 1)

Prof. Marco Savoia – Università di Bologna



Monitoraggio on-site



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

Quando è nato lo Structural Health Monitoring (SHM)?

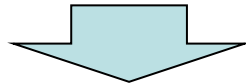
Structural Health Monitoring (SHM) is the **continuous or regular monitoring of the condition of a structure** or system using **built-in or autonomous sensory systems**, and any resultant intervention to **preserve structural integrity**.

SHM is a **broad multidisciplinary field both in terms of the diverse science and technology involved as well as in its varied applications**.

SHM is being implemented in many fields including physics, chemistry material science, biology, and mechanical, aerospace, **civil and electrical engineering** and on diverse systems and structures such as aircraft, spacecraft, ships, helicopters, automobiles, **bridges, buildings, civil infrastructure**, power generating plants, pipelines, electronic systems, manufacturing and processing facilities, biological systems, and for the protection of the environment, and for defense.

Fu-Kuo Chang, William H. Prosser, Mark J. Schultz
Structural Health Monitoring, 2002, Vol.1, pp. 3-4

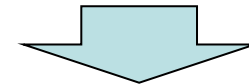
Danneggiamento strutturale



✓ Fenomeni di danneggiamento strutturale

- Corrosion
- Cracks
- Delamination and debonding
- Fiber pullout, fiber breakage and matrix cracking
- Slip, loose joints, and fasteners
- Creep
- Buckling
- Penetration and plastic deformation
- Welds defects
- Residual stresses

e Tecniche per rilevarli



✓ Tecniche distruttive

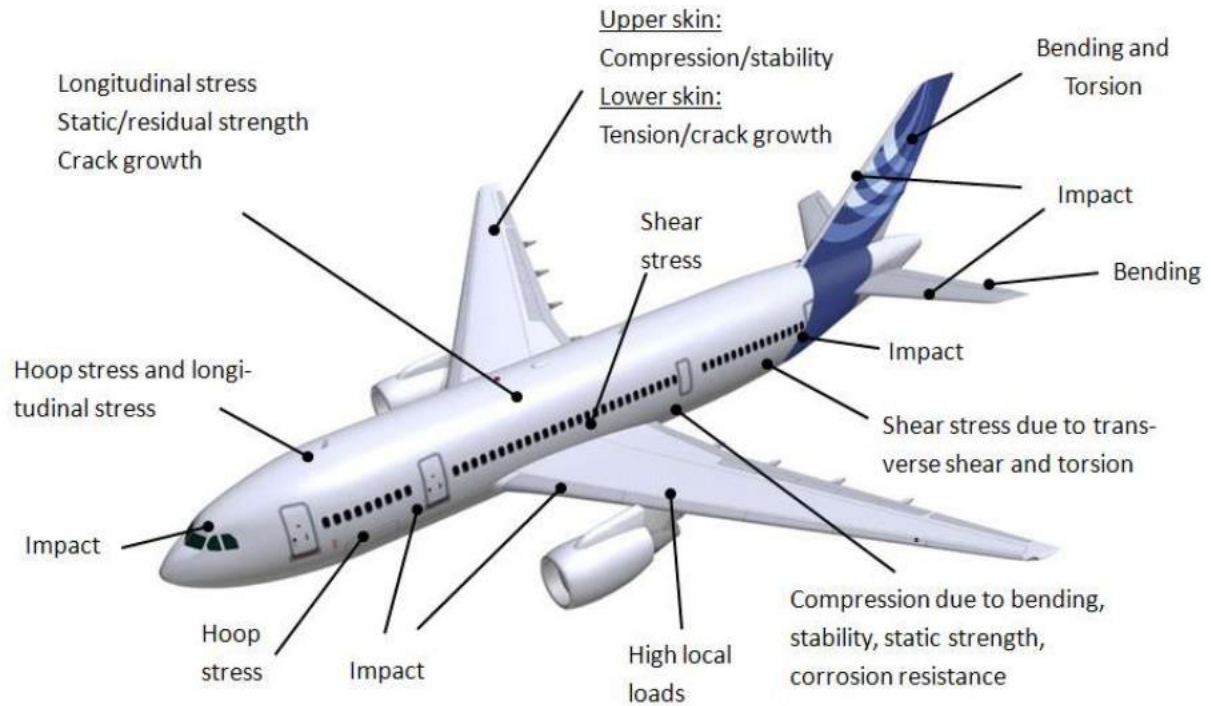
(da evitare quando possibile)

✓ Tecniche non distruttive:

- Radiography
- Ultrasonic testing
- Acoustic emission
- **Vibration-based methods**
- Optical methods
- Thermography
- Electromagnetic testing
- Magnetic particle inspection

QUALE TECNICA PUÒ ESSERE LA MIGLIORE PER LO SHM?

Dipende dall'entità e tipologia di danno che vogliamo rilevare...



Non-destructive testing (NDT) is needed in order to ensure the integrity of the airframe.

METODI DI ISPEZIONE DIRETTI

- Direct Visual Testing
- Remote Visual Testing

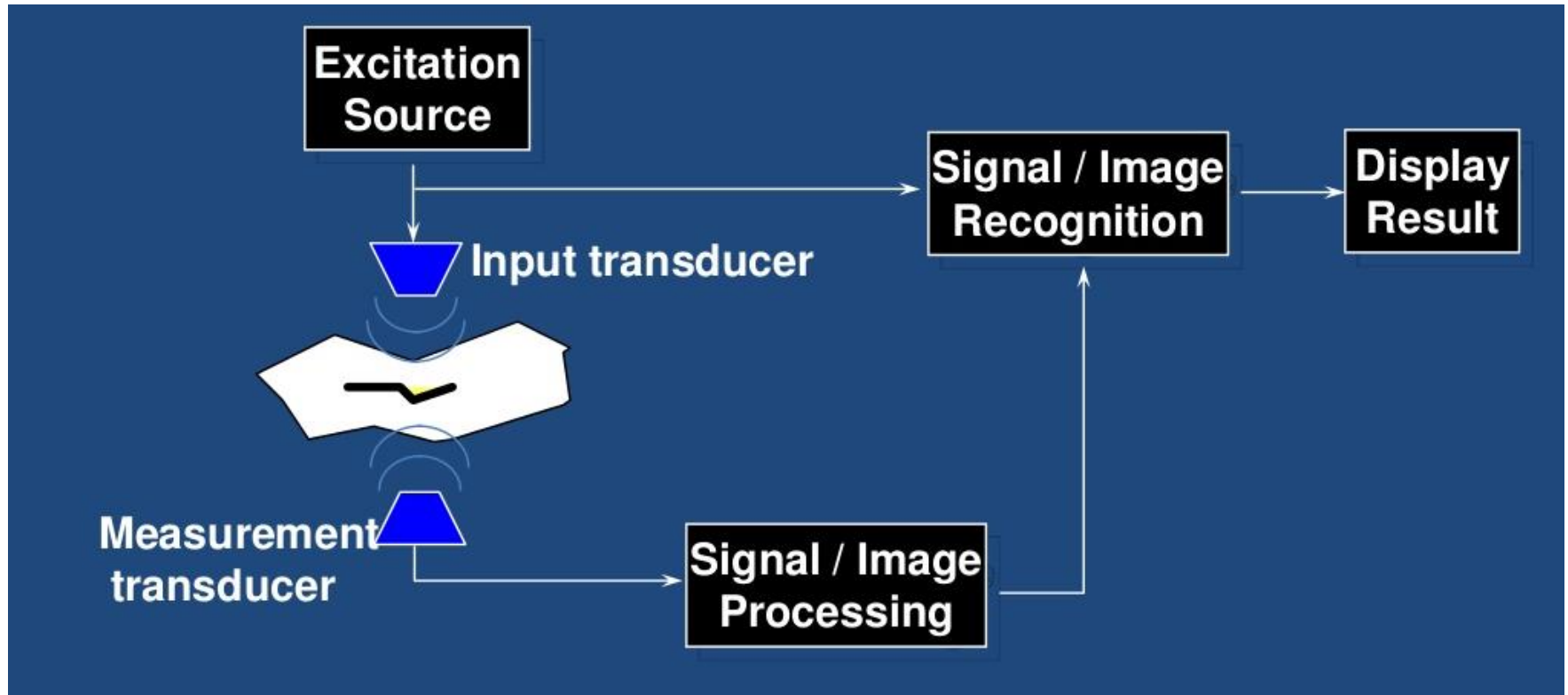


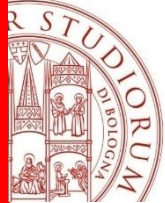
Tools for remote inspection include fiberscope & borescope

Portable video inspection unit with zoom allows inspection of large tanks and vessels



METODI INDIRETTI – SI RILEVA LA RISPOSTA E SI VERIFICA SE QUESTA SEGNA LA PRESENZA DI UN DANNO





Monitoraggio on-site



6/13
OTTOBRE
2024

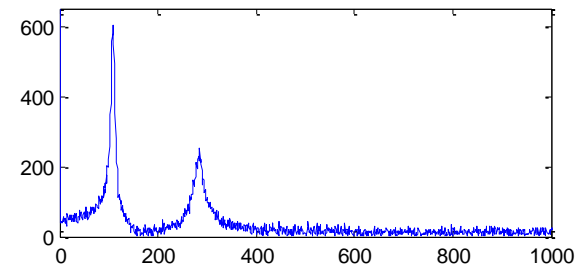
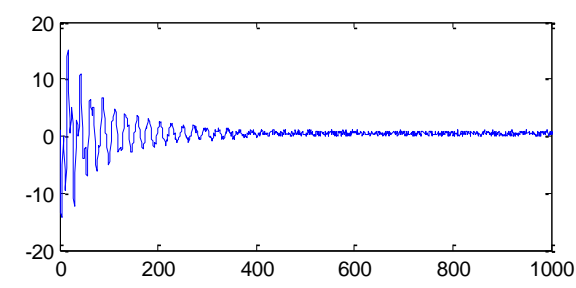
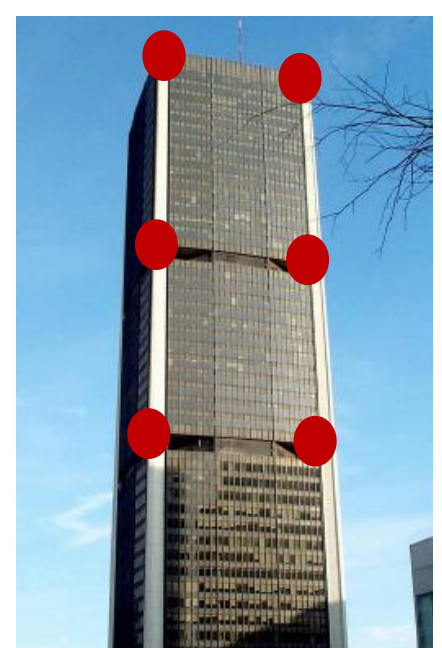
#settimanadiPC

QUALI TECNICHE SONO PIÙ APPROPRIATE PER LE GRANDI STRUTTURE DI INGEGNERIA CIVILE?

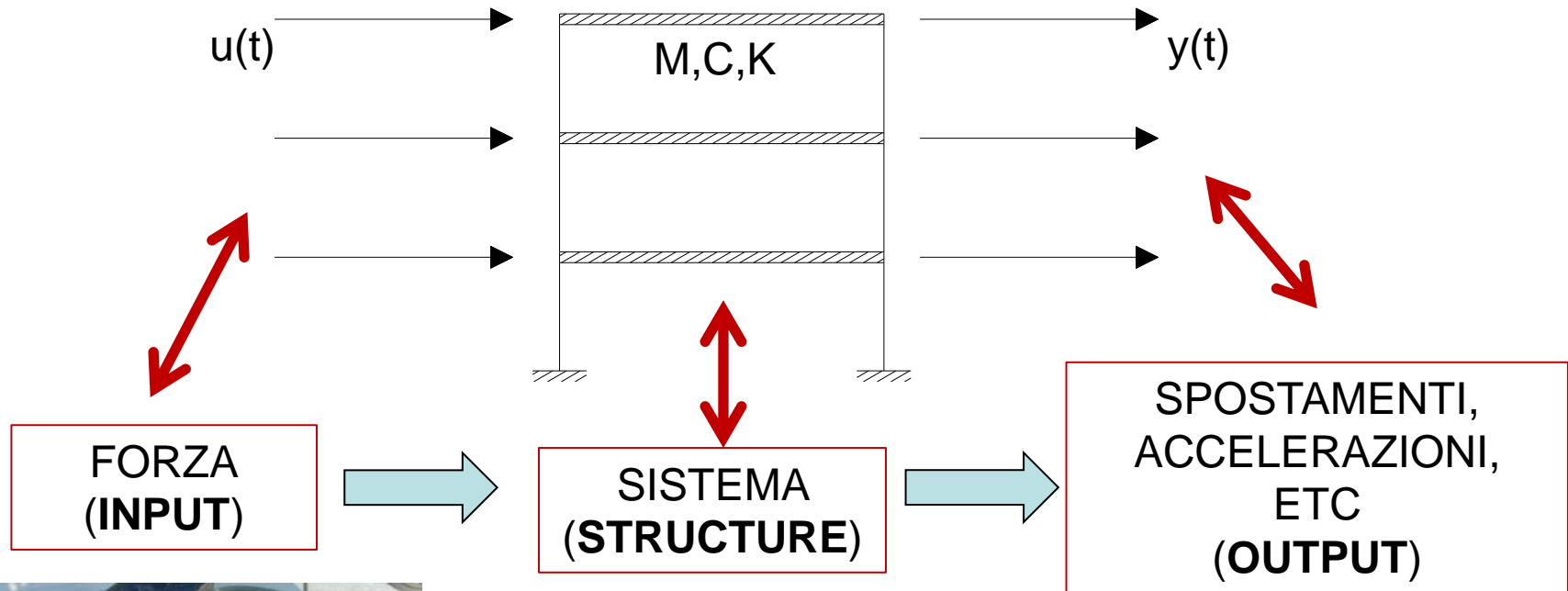


Le **PROVE DINAMICHE** consistono nel misurare la risposta dinamica in un certo numero di posizioni su una struttura soggetta ad eccitazione naturale o artificiale.

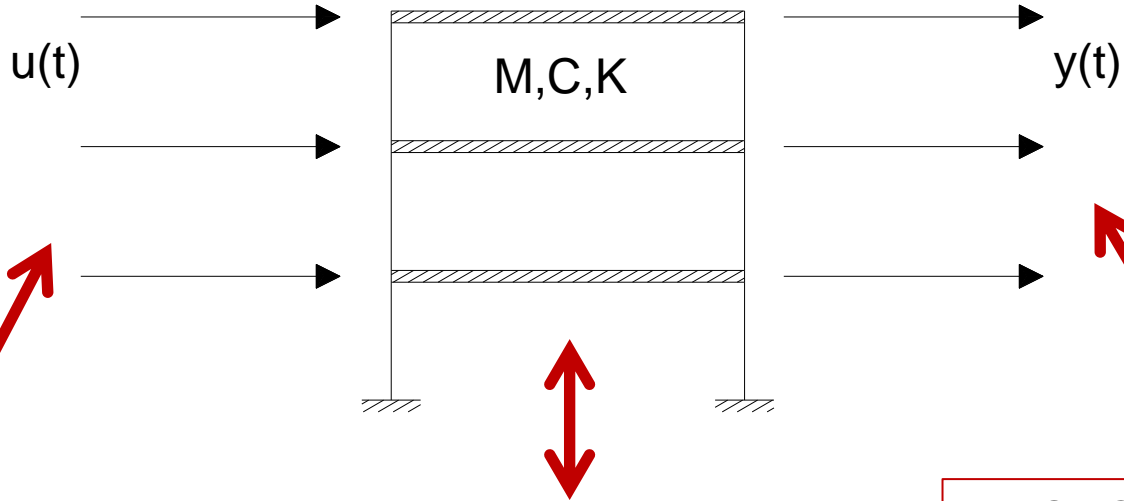
Le tecniche di **ANALISI MODALE SPERIMENTALE** mirano ad identificare i modi di vibrazione a partire dalla risposta dinamica misurata.



VIBRATION – BASED METHODS



VIBRATION – BASED METHODS



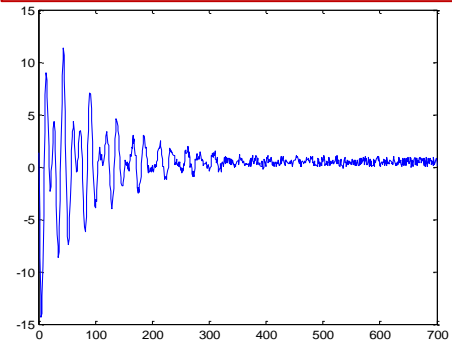
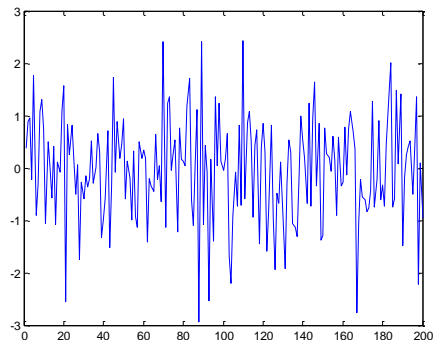
FORZA
(INPUT)



SISTEMA
(STRUCTURE)

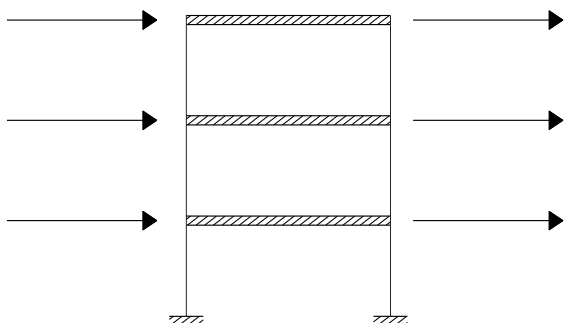


SPOSTAMENTI,
ACCELERAZIONI,
ETC
(OUTPUT)



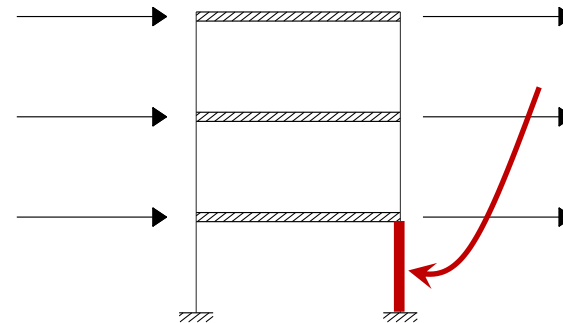
ESEMPIO DI PROCEDURA SHM

STRUTTURA INTEGRA



PROPRIETÀ MODALI
(NON DANNEGGIATO)

STRUTTURA DANNEGGIATA

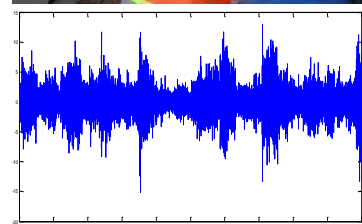
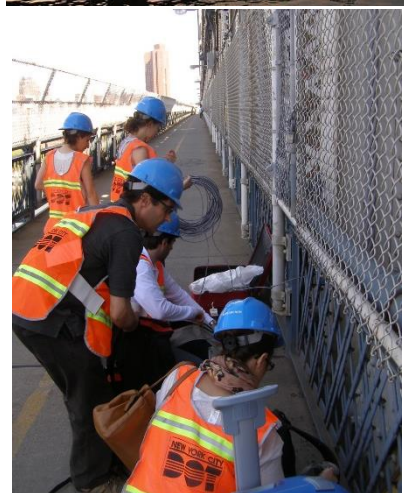


PROPRIETÀ MODALI
(DANNEGGIATO)

CONFRONTO

RILEVAMENTO DEL DANNO

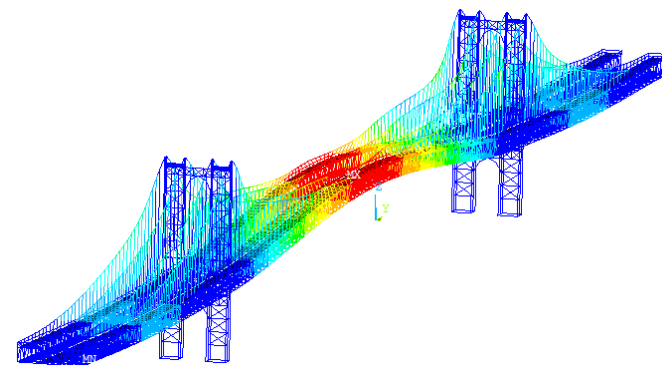
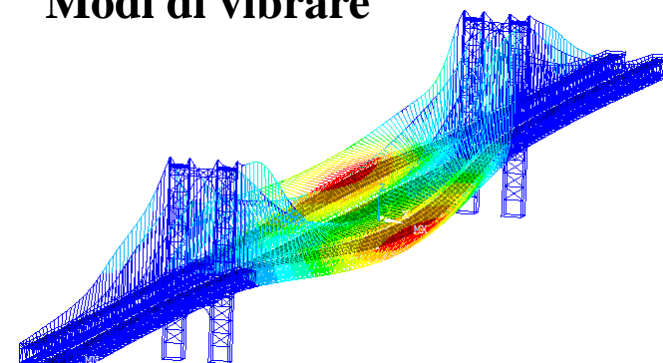
QUALI PROPRIETA' MODALI SONO UTILIZZATE?

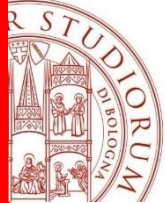


Frequenze di vibrazione

| Mode No. | Experimental Frequency [Hz] | Damping Ratio [%] | Mode type |
|----------|-----------------------------|-------------------|---------------------------|
| 1 | 0.205 | 5.73 | 1 st Lateral |
| 2 | 0.229 | 8.52 | 1 st Vertical |
| 3 | 0.303 | 7.01 | 2 nd Vertical |
| 4 | 0.381 | 5.38 | 1 st Torsional |
| 5 | 0.437 | 3.37 | 2 nd Lateral |
| 6 | 0.596 | 2.40 | 3 rd Vertical |
| 7 | 0.676 | 2.88 | 2 nd Torsional |
| 8 | 0.801 | 1.94 | 3 rd Torsional |
| 9 | 0.879 | 2.43 | 4 th Vertical |

Modi di vibrare





Monitoraggio on-site



6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

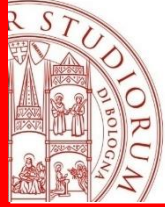
Inquadramento normativo delle prove dinamiche

Linee Guida Ponti 2020



*Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*

**LINEE GUIDA PER
LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO,
LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA
ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI**



Monitoraggio on-site



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

*Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti - Consiglio Superiore LLPP 2020
Parte III*

7. IL SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO

7.1. INTRODUZIONE

7.2. IL SISTEMA DI SORVEGLIANZA

7.3. IL SISTEMA DI IDENTIFICAZIONE

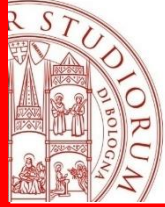
7.4. LE ISPEZIONI

7.5. PROVE DI CARICO STATICHE E RILIEVI DINAMICI

7.6. MONITORAGGIO STRUMENTALE (SHM)

7.7. INDICATORI NUMERICI E MODELLI DI DEGRADO

7.8. SOFTWARE PER LA GESTIONE DEI PONTI (BMS)



Monitoraggio on-site



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

7.2 IL SISTEMA DI SORVEGLIANZA

7.2.1. *Il sistema di sorveglianza rappresenta il **complesso** delle attività di **controllo, ispezione e monitoraggio** sulle opere d'arte ... allo scopo di assicurare la **disponibilità, la funzionalità e il mantenimento delle condizioni di sicurezza** dell'infrastruttura stessa.*

MODALITA'

Combinazione di varie attività

ATTIVITA'

controllo, ispezione e monitoraggio

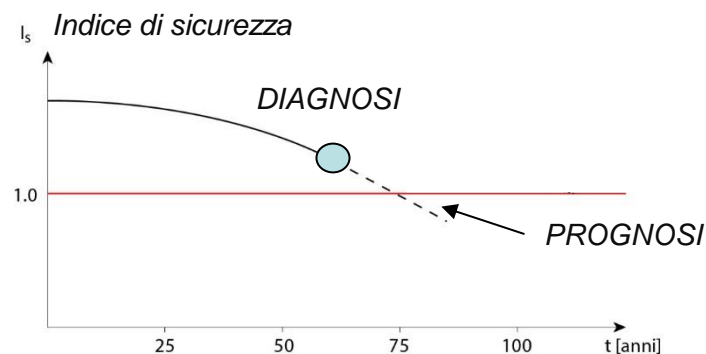
OBBIETTIVI

disponibilità, funzionalità e mantenimento delle condizioni di sicurezza

7. IL SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO

Le **ispezioni periodiche** ed il **monitoraggio di un'opera** esistente hanno lo scopo di:

- **Consentire la valutazione dello “stato di condizione” dell’opera stessa (diagnosi) con riferimento alla sua “idoneità all’uso previsto”,**
- **Stimarne le tendenze evolutive (prognosi).**



Dal punto di vista operativo esse consentono di:

- **migliorare la conoscenza dell’opera** riducendo le incertezze di natura epistemica (azioni, resistenze, modelli);
- **pianificare** in modo efficace, in termini tecnico-economici, **gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria.**

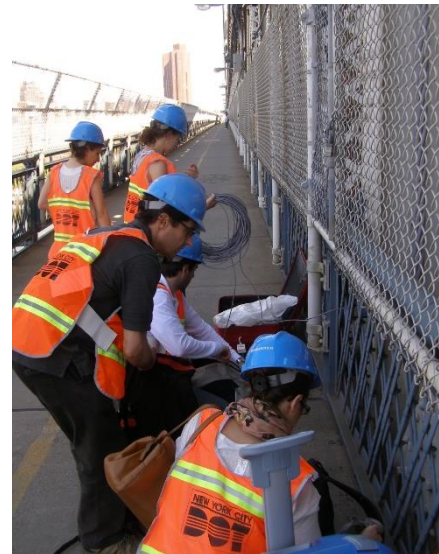
7.6. MONITORAGGIO STRUMENTALE (Structural Health Monitoring)

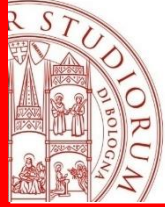
Il monitoraggio strumentale (SHM) si basa su:

- 1. Installazione per periodi di tempo abbastanza lunghi** (mesi o anni) o per l'intera vita operativa di una struttura, **di reti di sensori**;
- 2. Elaborazione dei dati** in modo automatico o semiautomatico;
- 3. Identificazione con opportuni algoritmi della presenza di malfunzionamenti.**



Posizionamento di inclinometri in varie sezioni del ponte





Monitoraggio on-site



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

7.6. MONITORAGGIO STRUMENTALE (Structural Health Monitoring)

POTENZIALITÀ:

Identificare stati di danno strutturale o malfunzionamenti delle dotazioni ausiliarie in modo precoce, ben prima che queste producano manifestazioni evidenti.

I sistemi possono essere efficaci qualora inseriti in un processo di analisi e gestione dei dati anche capace, ove necessario, di **determinare immediati provvedimenti di restrizione del traffico attuabili anche attraverso idonee apparecchiature di interdizione del traffico.**

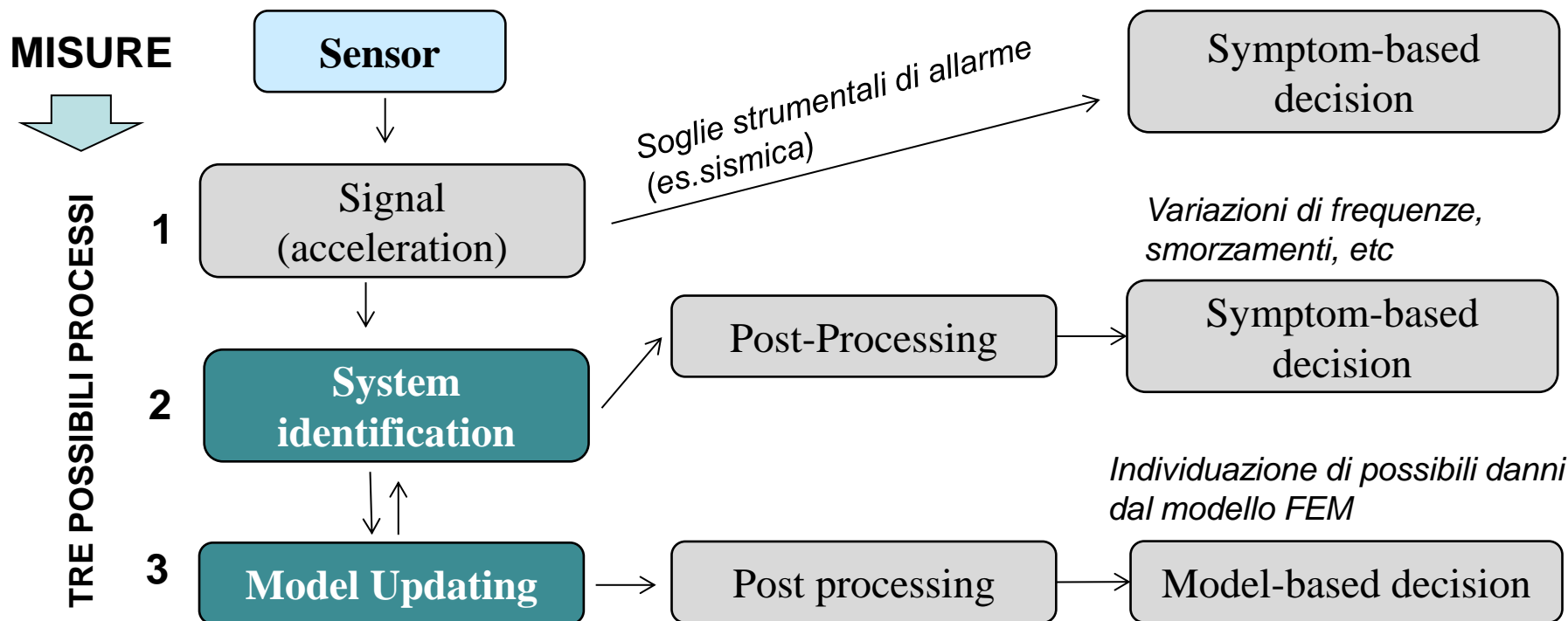
PROBLEMI:

SHM **richiede, anche nei casi meno complessi, lunghi periodi di osservazione** che precedano il possibile manifestarsi di un evento rilevabile.

MONITORAGGIO STRUMENTALE (SHM) - DUE STRATEGIE:

Monitoraggio occasionale o periodico, di durata relativamente breve ed eventualmente ripetuto con regolarità

Monitoraggio permanente, concepito per rimanere funzionante a lungo sino a coprire l'intera vita dell'opera



SISTEM IDENTIFICATION

Determinazione dei parametri modali dalle registrazioni accelerometriche:

- Prima Frequenza
- Frequenze superiori
- Forme modali
- Smorzamenti
- Etc.

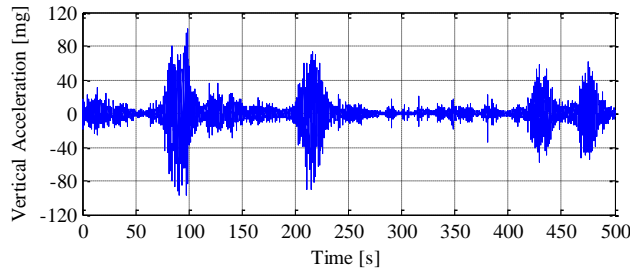
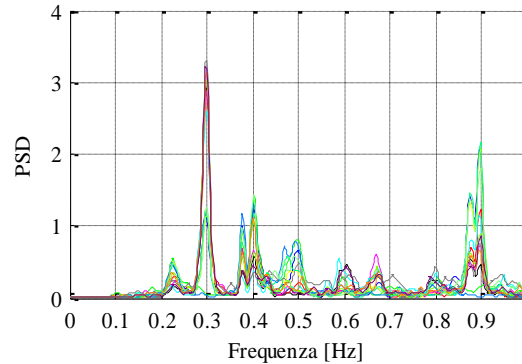
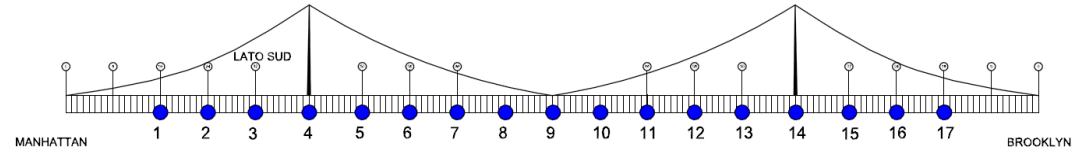
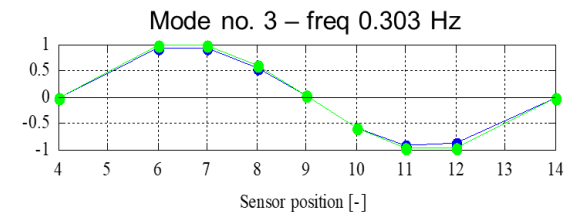
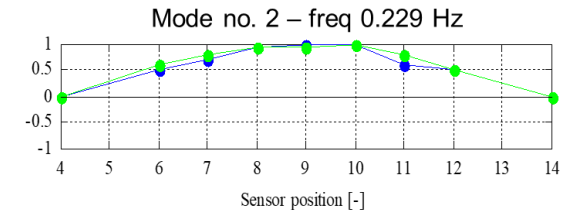


Tabella I - Modi propri individuati

| modo | tipo | frequenza [Hz] | smorzamento [%] |
|------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 | 1° flessionale | 0.23 | 8.78 |
| 2 | 2° flessionale | 0.30 | 7.41 |
| 3 | 1° torsionale | 0.38 | 4.75 |
| 4 | 1° torsionale | 0.40 | 5.63 |
| 5 | 3° flessionale | 0.59 | 2.22 |
| 6 | 2° torsionale | 0.67 | 2.29 |
| 7 | 3° torsionale | 0.80 | 1.37 |
| 8 | 4° flessionale | 0.88 | 2.44 |
| 9 | 4° flessionale | 0.90 | 2.18 |

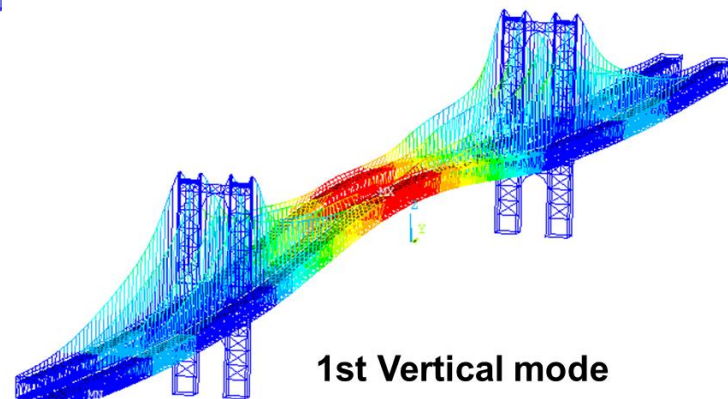
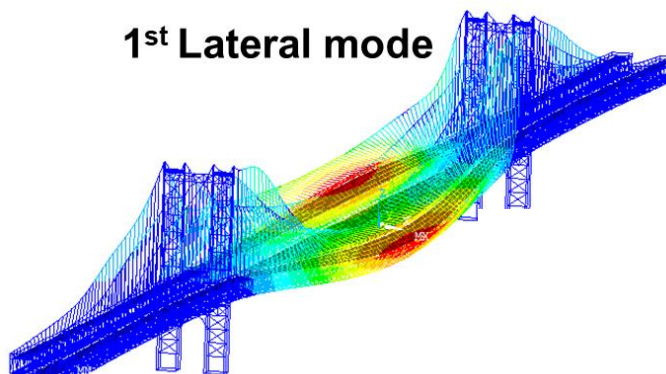
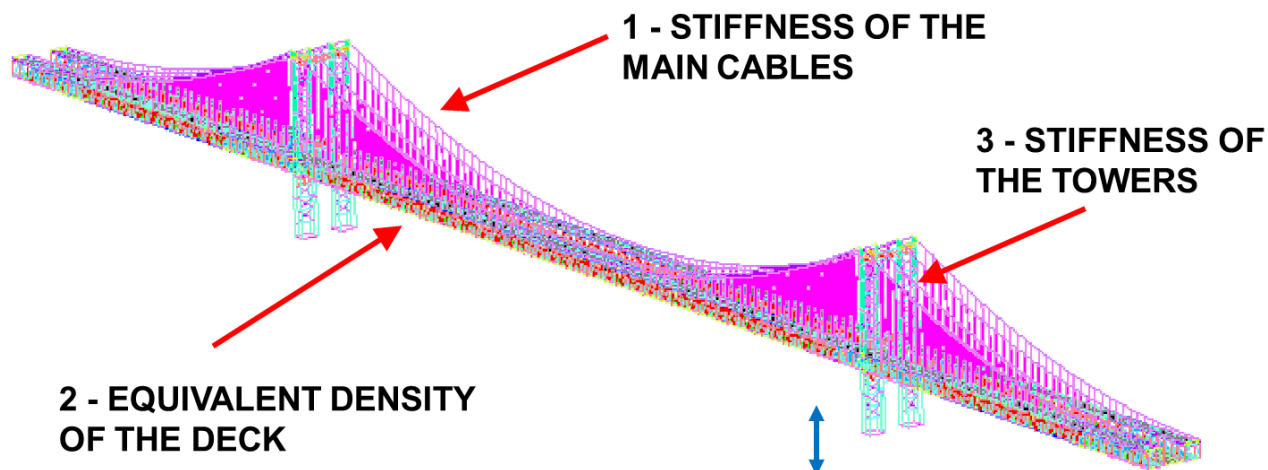


Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

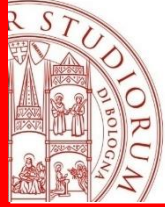
MODEL UPDATING

Calibrazione di alcuni parametri del modello numerico non ben noti:

- **Massa effettiva**
- **Effetto dei vincoli**
- **Moduli elastici**
- **Etc.**



| Mode No. | Exp. Freq. [Hz] | Num. Freq. [Hz] | Error [%] | Mode type |
|----------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 0.205 | 0.241 | +17.80 | 1 st Lateral |
| 2 | 0.229 | 0.228 | -0.76 | 1 st Vertical |
| 3 | 0.303 | 0.321 | +6.10 | 2 nd Vertical |
| 4 | 0.381 | 0.370 | -2.89 | 1 st Torsional |
| 5 | 0.437 | 0.432 | -1.18 | 2 nd Lateral |
| 6 | 0.596 | 0.571 | -4.28 | 3 rd Vertical |
| 7 | 0.676 | 0.724 | +7.08 | 2 nd Torsional |
| 8 | 0.801 | 0.730 | -8.85 | 3 rd Torsional |
| 9 | 0.879 | 0.811 | -7.76 | 4 th Vertical |



Come accoppiare correttamente modi di vibrare sperimentali e previsioni numeriche (modelli FEM)?

$(\bar{\omega}_i, \bar{\varphi}_i)$ Experimental frequencies and mode shapes

(ω_i, φ_i) Numerical frequencies and mode shapes

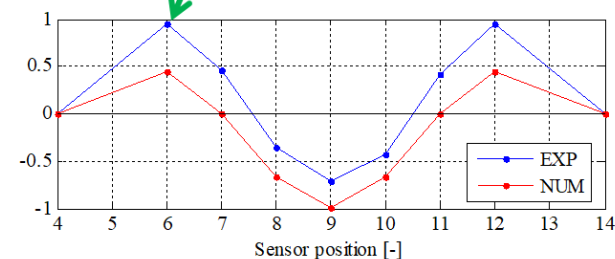
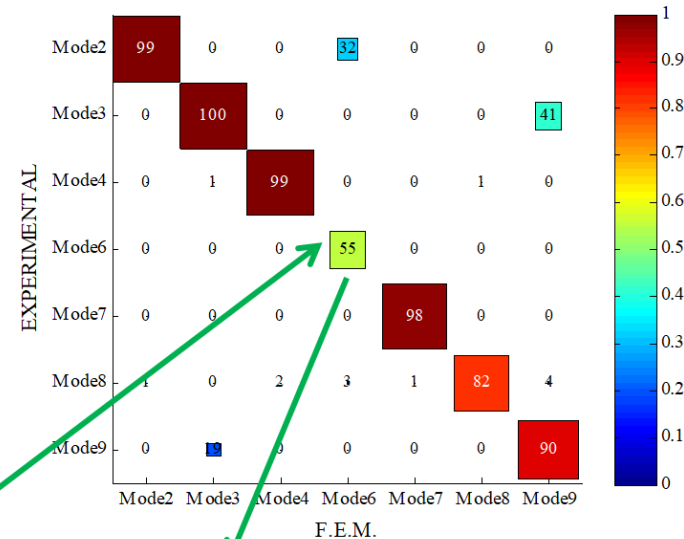
FREQUENCIES

| Mode No. | Exp. Freq. [Hz] | Num. Freq. [Hz] | Error [%] | Mode type |
|----------|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------|
| 1 | 0.205 | 0.241 | +17.80 | 1 st Lateral |
| 2 | 0.229 | 0.228 | -0.76 | 1 st Vertical |
| 3 | 0.303 | 0.321 | +6.10 | 2 nd Vertical |
| 4 | 0.381 | 0.370 | -2.89 | 1 st Torsional |
| 5 | 0.437 | 0.432 | -1.18 | 2 nd Lateral |
| 6 | 0.596 | 0.571 | -4.28 | 3 rd Vertical |
| 7 | 0.676 | 0.724 | +7.08 | 2 nd Torsional |
| 8 | 0.801 | 0.730 | -8.85 | 3 rd Torsional |
| 9 | 0.879 | 0.811 | -7.76 | 4 th Vertical |

$$MAC_{ij} = \frac{|\varphi_i^T \bar{\varphi}_j|^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\bar{\varphi}_j^T \bar{\varphi}_j)}$$

Numerical
Experimental

MODES



MONITORAGGIO STRUMENTALE (SHM) - Quali i principali problemi?

1. La forzante «ambientale» (traffico, vento) è una azione non nota (vedi slide successiva)

Si utilizzano metodi detti Operational Modal Analysis che considerano la forzante come un rumore bianco, richiedono finestre temporali di registrazione lunghe

2. Necessario operare per confronto con una sperimentazione completa sulla struttura in condizioni integre (struttura di riferimento)

3. La dinamica del ponte può essere influenzata da:

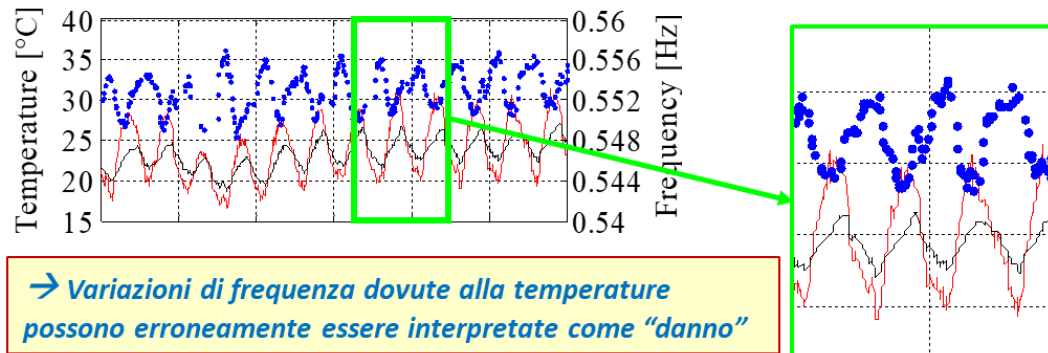
- La massa dei veicoli
- Gli effetti ambientali (temperatura, etc)

4. Gli effetti del danno sulla variazione della prima frequenza sono piccoli

5. Difficile identificare l'occorrenza del danno, ancora di più localizzarlo

6. Molta esperienza in laboratorio, pochissima su strutture al vero danneggiate

Effetto della temperatura sulle frequenze proprie



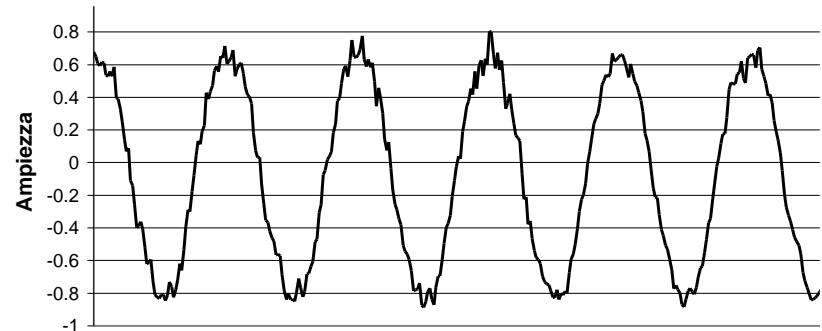
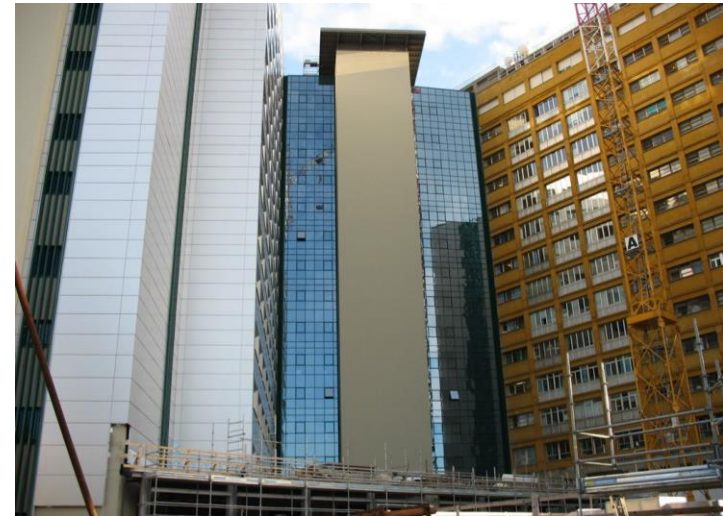
[1] Peeters, B.; Roeck, G.D. One-year monitoring of the Z24-Bridge: Environmental effects versus damage events. Earthq. Eng. Struct. Dyn. **2001**, 30, 149–171

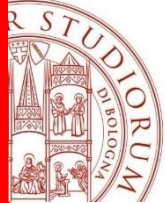
UNA DIFFICOLTA' INSITA NEI PROBLEMI DI INGEGNERIA STRUTTURALE – DI SOLITO L'ECCITAZIONE NON E' NOTA

SEGNALI DETERMINISTICI

ESEMPIO – L'ECCITAZIONE DATA DA UNA VIBRODINA

$$f(x) = \sin(x)$$





Monitoraggio on-site

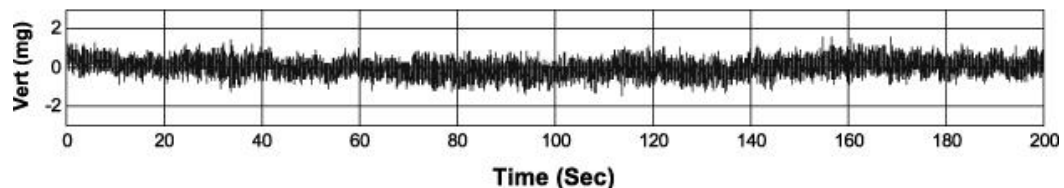
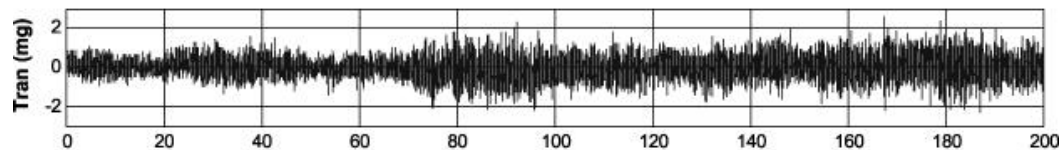
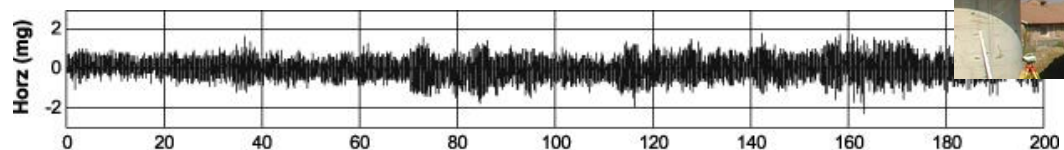


6/13 OTTOBRE 2024

#settimanadiPC

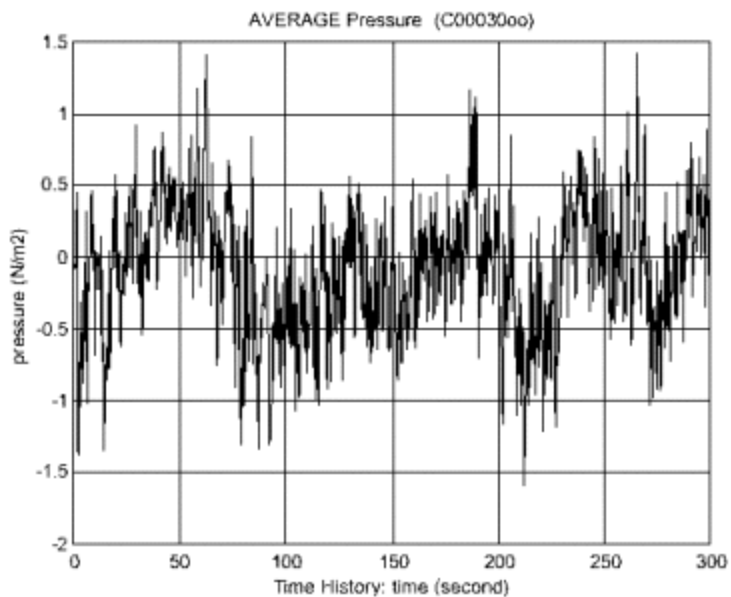
SEGNALI CASUALI / STOCASTICI

ESEMPIO – ECCITAZIONE AMBIENTALE
simile a un rumore bianco



SEGNALI CASUALI / STOCASTICI

ESEMPIO – L'ECCITAZIONE DEL VENTO non è un rumore bianco



SHM – STRATEGIE PER IDENTIFICAZIONE DEL DANNO

Variation of natural frequencies

Ma le sole frequenze non possono fornire informazioni su localizzazione del danno

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

Variation of modal damping

Ma l'identificazione dello smorzamento comporta **grandi deviazioni standard dei risultati** e quindi scarsa affidabilità dell'indicatore [2]

[2] William, C.; Salawu, O.S. Damping as a damage indication parameter. 1997.

Variation of modal shapes

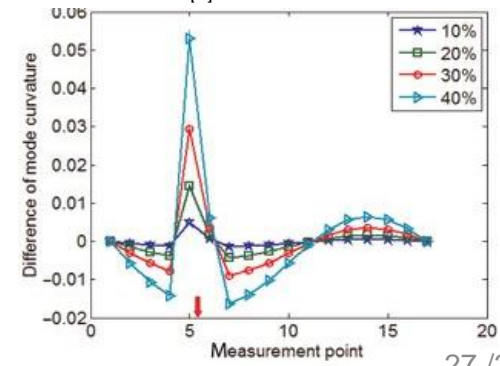
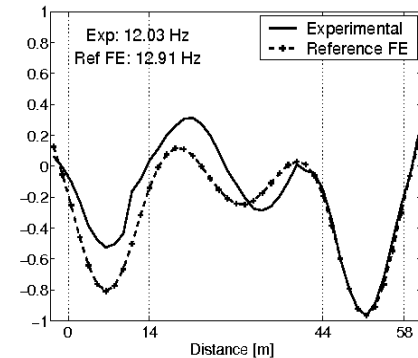
Soprattutto delle forme di vibrare superiori; molte proposte in letteratura,

- semplici: MAC, COMAC;
- utilizzo delle forme modali accoppiate a frequenze

Variation of modal curvatures (derived from accelerations [3] or from deformations)

Es: Modal Curvature Method (MCM) Tipicamente necessario un numero elevato di sensori

[3] Teughels, A., De Roeck, G. Damage detection and parameter identification by finite element model updating. *Arch. Comput. Meth. Engng.* **12**, 123–164 (2005).

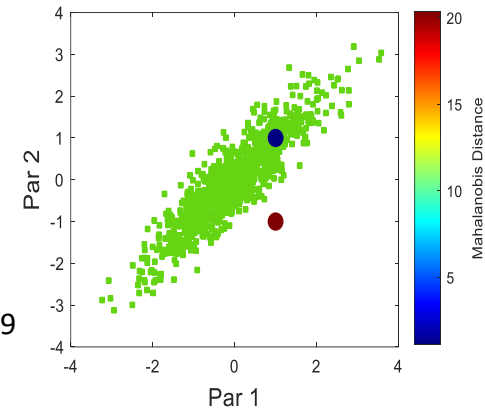


SHM - STRATEGIE PER L'IDENTIFICAZIONE DEL DANNO

Utilizzo di parametri o funzioni di variazione statistica

Distanza di Mahalanobis – identifica divergenze dalla distribuzione (multivariata) di parametri o funzioni dei dati. Richiede una standardizzazione dei parametri di danno

[8] Yager M., Gregory B., Key C., Todd M. On using robust Mahalanobis distance estimations for feature discrimination in a damage detection scenario, Structural Health Monitoring 2019



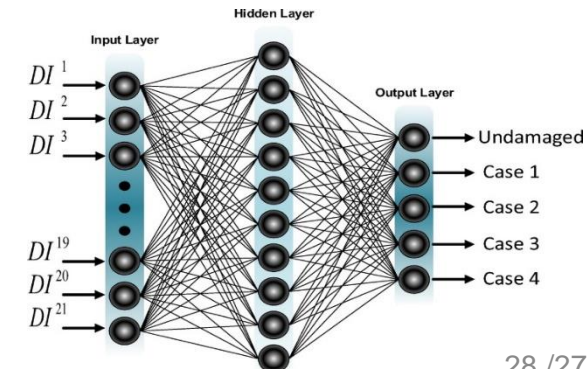
Metodi basati sulle serie temporali

Parametri dei modelli Autoregressivi (**AR, ARMA, ARMAX...**). Maggiore sensibilità al danno delle caratteristiche modali ma si deve selezionare un opportuno ordine del modello [9]; scelta di indici di danno «riassuntivi» dei parametri autoregressivi (talvolta case-dependent)

[9] Figueiredo, E.; Figueiras, J.; Park, G.; Farrar, C.R.; Worden, K. Influence of autoregressive model order on damage detection. Int. J. Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng. **2011**, 26, 225–238

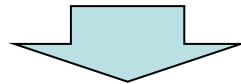
Metodi di Machine Learning: Neural Networks, Convolutional neural networks (CNNs), Long Short-Term Memory Neural Network, ...[10]. Necessario un apprendimento della rete neurale che talvolta è di difficile realizzazione

[10] Farrar, C.R.; Worden, K. Structural Health Monitoring—A Machine Learning Perspective, 2013.



STRUCTURAL HEALTH MONITORING – ATTUALI PROSPETTIVE

- Nelle strutture civili i fenomeni di **degrado sono molto lenti**
- SHM è stato principalmente applicato su **strutture di nuova costruzione**
- Necessita di **un periodo di training** in cui lo stato di condizione della struttura è considerato stabile (stato di riferimento), per costruire algoritmi e modelli predittivi per riconoscere in seguito anomalie comportamentali associabili a degrado o danneggiamento.



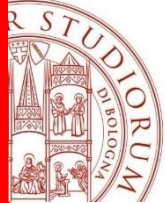
Non c'è ancora completa evidenza sperimentale delle capacità di diagnosi precoce.

TUTTAVIA:

- I sistemi di monitoraggio sono **strumenti utili per la gestione della infrastruttura;**
- SHM può **orientare le ispezioni ordinarie e straordinarie**, riducendone l'impegno e consentire di eseguirle in modo mirato.

STRUCTURAL HEALTH MONITORING – PROSPETTIVE FUTURE





Monitoraggio on-site

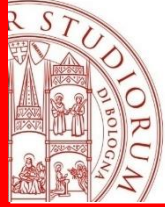


6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

APPLICAZIONI

Monitoraggio di ponti ferroviari dell'Emilia Romagna



Monitoraggio on-site



6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

INTEGRAZIONE DI MONITORAGGIO E METODI PREDITTIVI

UN PROCESSO A 4 STEP PER L'ANALISI A FATICA DI PONTI FERROVIARI

OBIETTIVO – PREDIZIONE DELLA VITA RESIDUA A FATICA PER PONTI FERROVIARI IN ACCIAIO

STEP 1: Conduzione delle prove dinamiche

STEP 2: Identificazione di sistema e model updating di un modello FEM globale

STEP 3: Definizione delle azioni - Analisi modello FEM con Identificazione delle sollecitazioni negli elementi critici

STEP 4: Analisi a fatica e predizione della vita residua dei vari componenti / dettagli

FADLESS – Fatigue Damage control and assessment for railways bridges
Progetto EU – Final Report 2014

2 viadotti in acciaio del Ponte Lagoscuro sul PO sulla linea Bologna – Venezia

Vecchio viadotto:
Diagonali:
Profili calastrellati
con elementi ad L



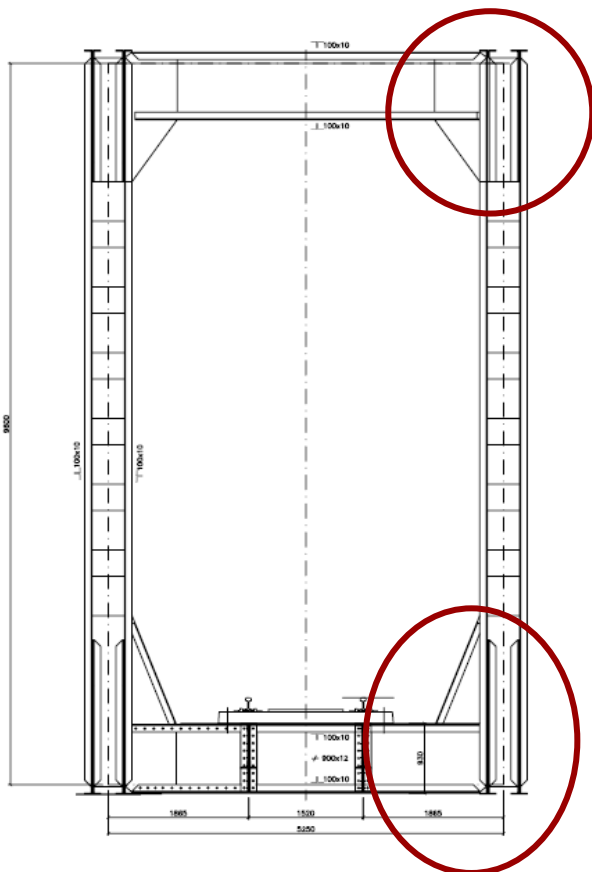
**Vecchio viadotto (1948) →
collegamenti rivettati**

**Nuovo viadotto (2005) →
collegamenti bullonati**

Nuovo viadotto:
Diagonali:
Profili HEB



9 campate appoggiate di lunghezza 60 m e 75 m e larghezza 5.20 m



3+2 campate di lunghezza 60 mt

4 campate di lunghezza 75 mt

PONTE DEL 1948

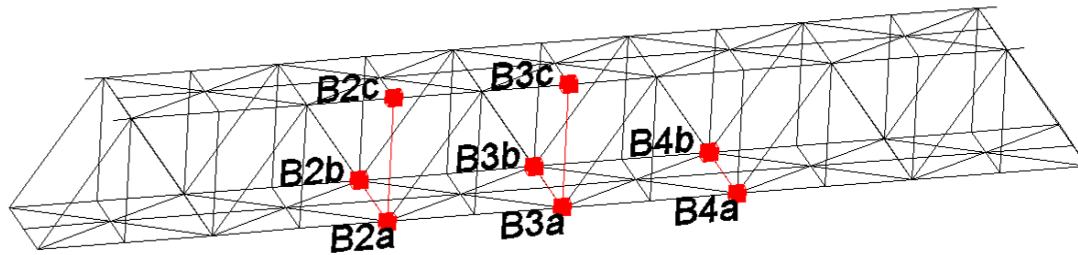
Progettato per carichi verticali

→ Molto rigido nel piano verticale;

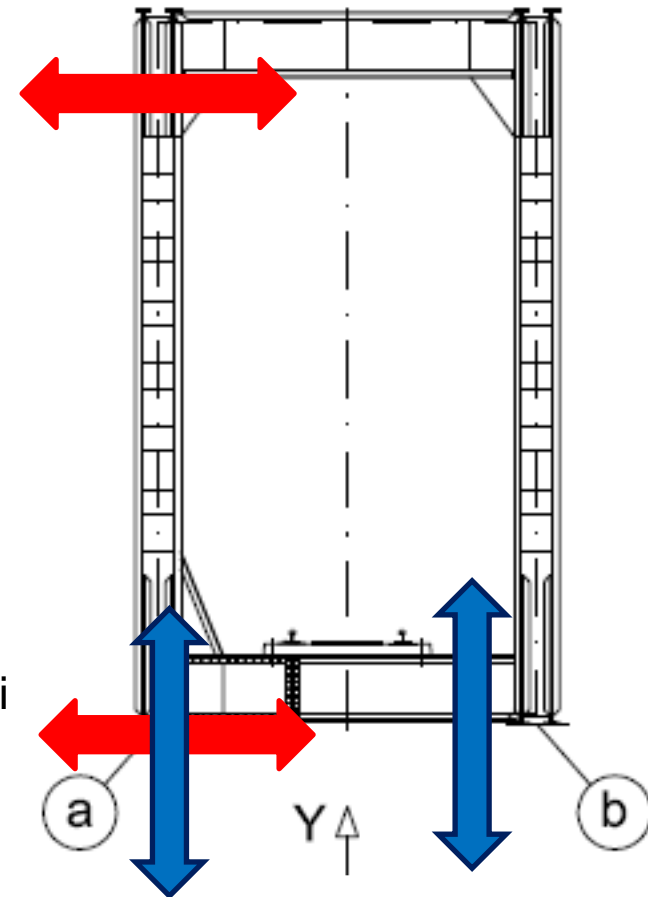
→ Deformabile in direzione trasversale

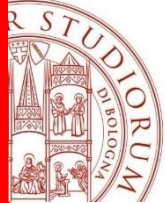
STEP 1 – PROVE DINAMICHE E IDENTIFICAZIONE PARAMETRI MODALI

I modi globali sono stati identificati via Operative Modal Analysis (OMA) utilizzando le vibrazioni ambientali.



- ✓ 11 PCB accelerometri (10v/g)
 - 6 per le accelerazioni sul piano verticale – 2 in mezzeria, 4 ai quarti delle luci
 - 3+2 per accelerazioni in direzione trasversale – 1+1 in mezzeria 2+1 ai quarti.
- ✓ Frequenza di campionamento: 400 Hz - minimo 20 minuti
- ✓ Algoritmo per l'identificazione PolyMAX



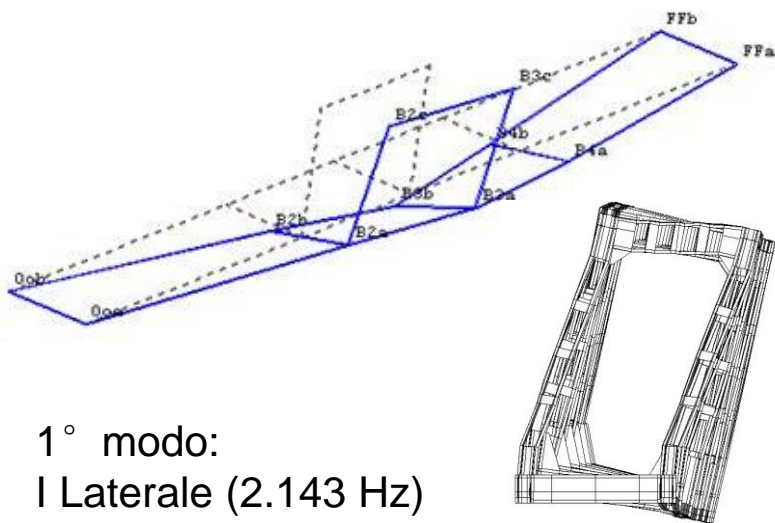


Monitoraggio on-site

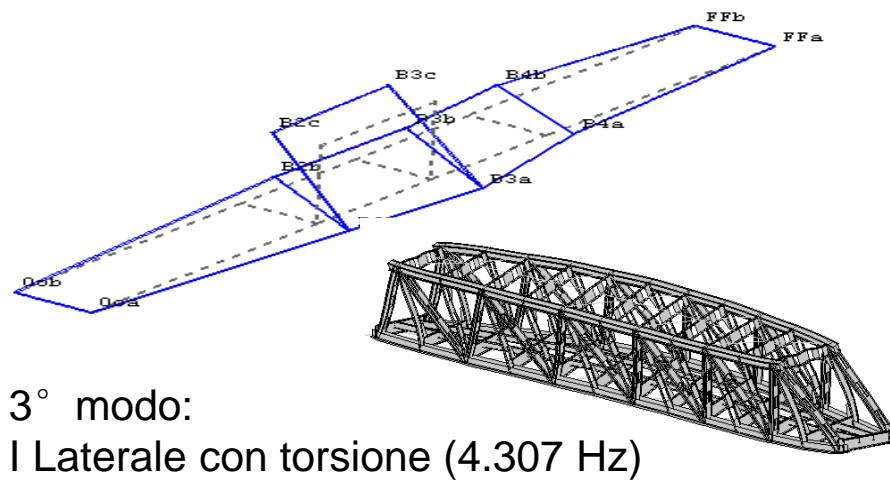


6/13
OTTOBRE
2024

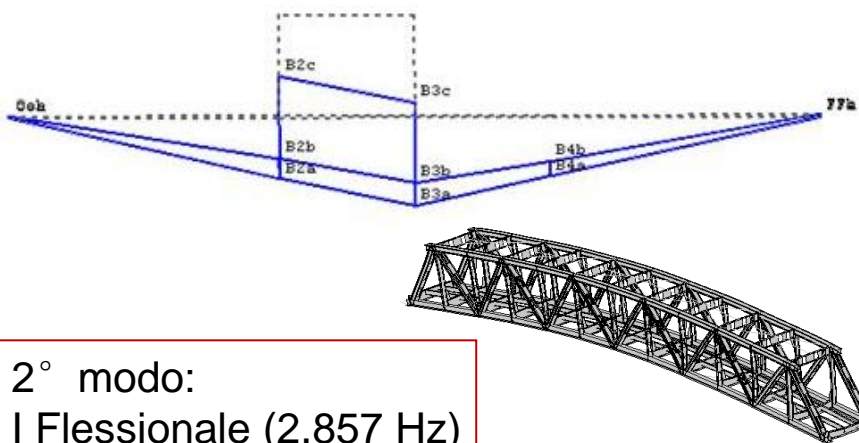
#settimanadiPC



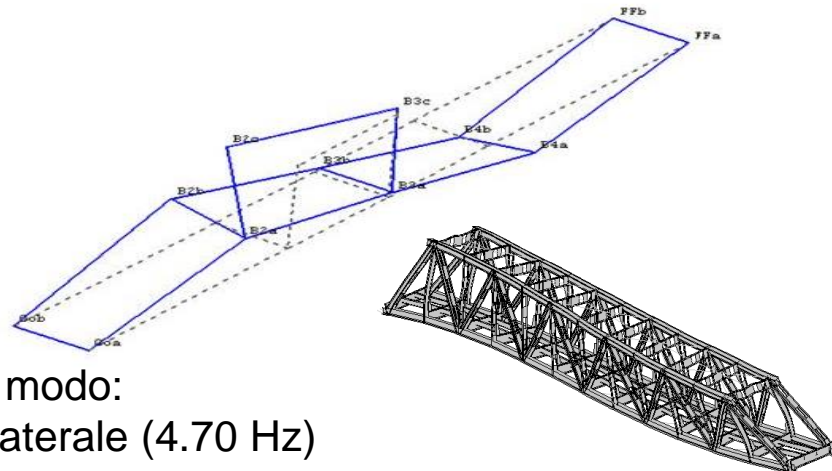
1° modo:
I Laterale (2.143 Hz)



3° modo:
I Laterale con torsione (4.307 Hz)



2° modo:
I Flessionale (2.857 Hz)



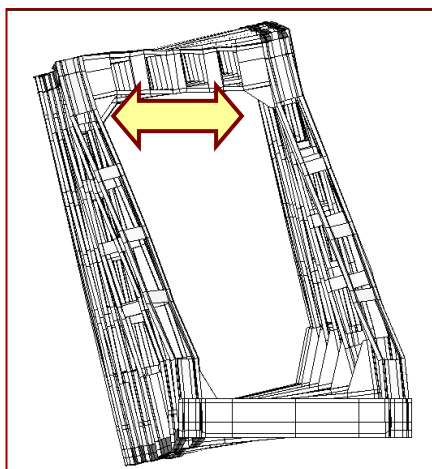
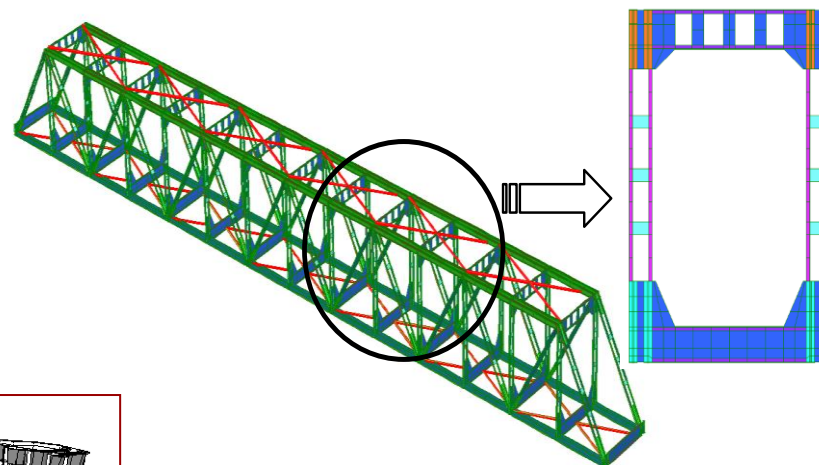
4° modo:
II Laterale (4.70 Hz)

STEP 2 – MODEL UPDATING

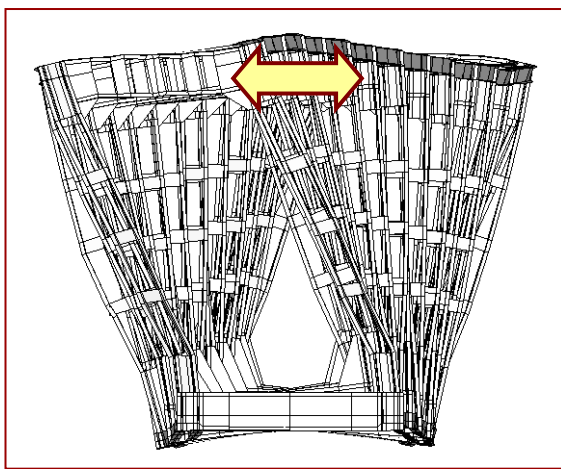
Aggiornamento del modello FEM utilizzando frequenze e modi di vibrare come riferimento

Modello FEM globale raffinato

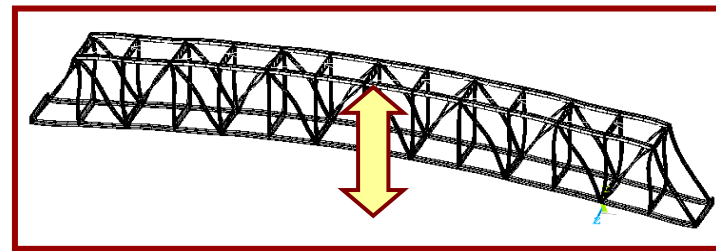
→ Elementi shell elastici lineari (ANSYS)
Analisi modale – 4 parametri da identificare



Mode 1.



Mode 2



Mode 3

Algoritmo DE (Differential Evolution) – (Savoia e Vincenzi 2008)

| Mode | Experiment al frequency [Hz] | Numerical frequency [Hz] | Error [%] | MAC [%] |
|------|------------------------------|--------------------------|-----------|---------|
| 1 | 2.143 | 2.166 | 1.07 | 96 |
| 2 | 3.857 | 3.638 | 4.60 | 96 |
| 3 | 4.307 | 4.409 | 2.37 | 85 |
| 4 | 4.700 | 4.749 | 1.04 | 88 |

Identification Parameters

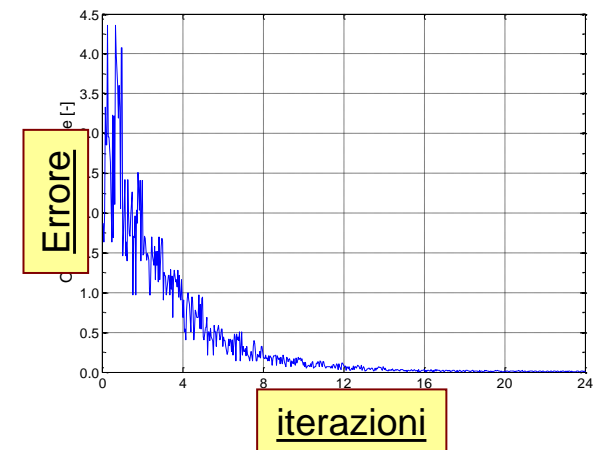
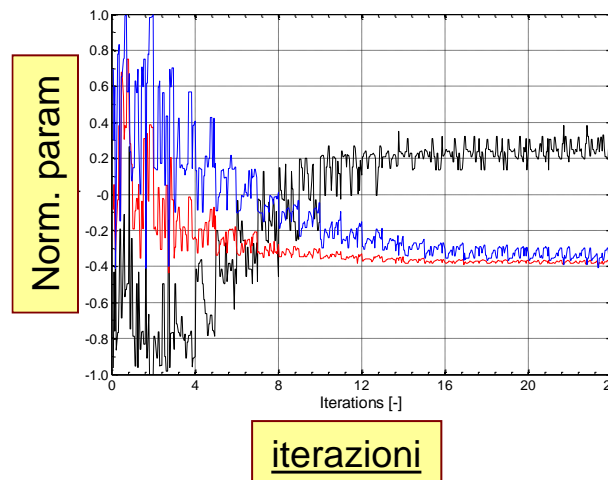
| | |
|---------------------------------------|-------|
| m_{eq} [10^3 kg/m ³] | 9.05 |
| J_d [10^{-4} m ⁴] | 1.74 |
| m [10^3 kg/m ³] | 15.90 |
| k_h [10^5 N/m] | 6.56 |
| No. of iterations | 24 |
| No. of evaluations | 600 |

- Errori sulle frequenze dell'ordine di 1÷4%
- MAC 85-96%

Parametri normalizzati nel range] -1, 1 [.

•Consente identificazione con un numero elevato di parametri

•Dopo 12 iterazioni è giunto a convergenza

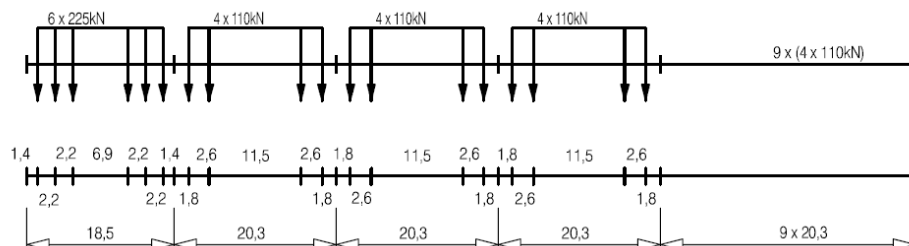


STEP 3 – ANALISI NUMERICA DI DETTAGLIO

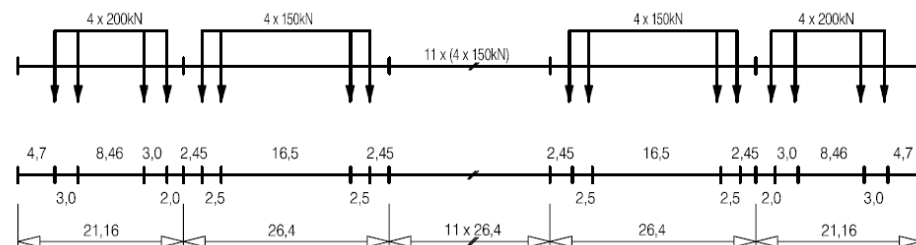
✓ IL MODELLO E' UTILIZZATO PER CONDURRE ANALISI DI FATICA SUI COMPONENTI.

✓ Analisi a fatica condotta secondo la procedura delle **EN1993 – Eurocode 3.**

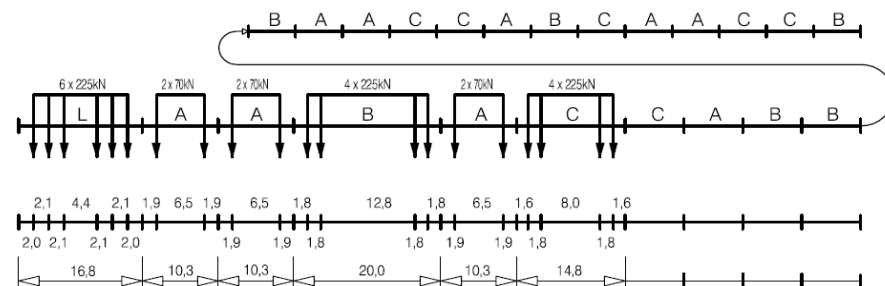
✓ Utilizzati I tipi di traffico ("standard traffic", "traffic with 250 kN-axles" or "light traffic mix") definiti nell'Annex "D" delle EN1991 – Eurocode 1.



Type 1: passenger train



Type 3: High speed train

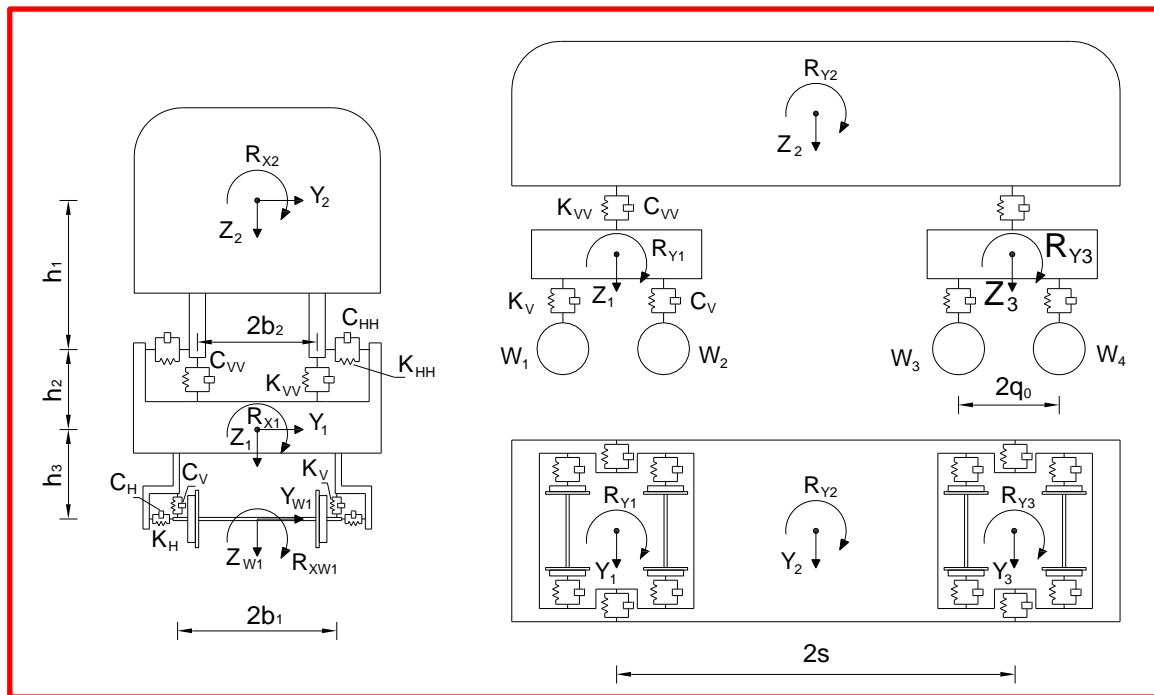


Type 6: Freight train

STEP 3 – ANALISI NUMERICA DI DETTAGLIO

Interazione dinamica treno - viadotto

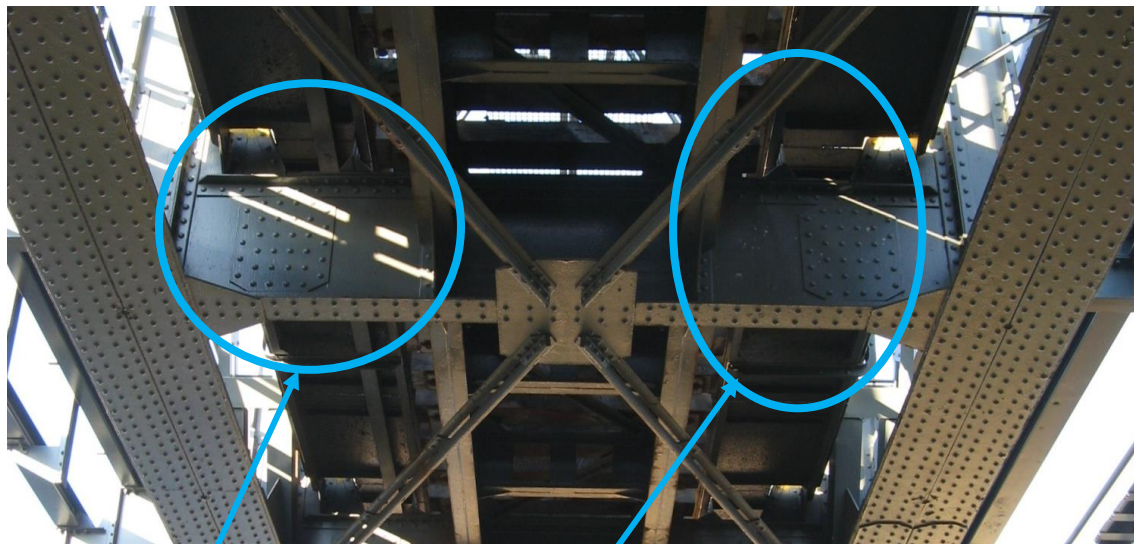
$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{C}_b^* \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{K}_b^* \mathbf{q}_b = \mathbf{P}_b^* \\ \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{v}_v = \mathbf{P}_v \end{cases}$$



K. Liu, E. Reynders, G. De Roeck, G. Lombaert: *Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains*. Journal of Sound and Vibration 320, 2008.

K. Liu, G. De Roeck, G. Lombaert: *The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage*. Journal of Sound and Vibration 325, 2009.

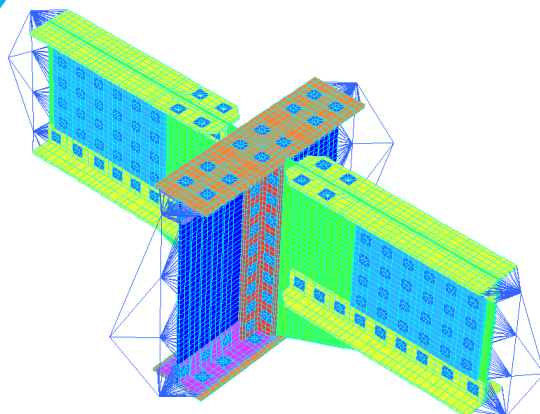
STEP 3 – ANALISI NUMERICA DI DETTAGLIO



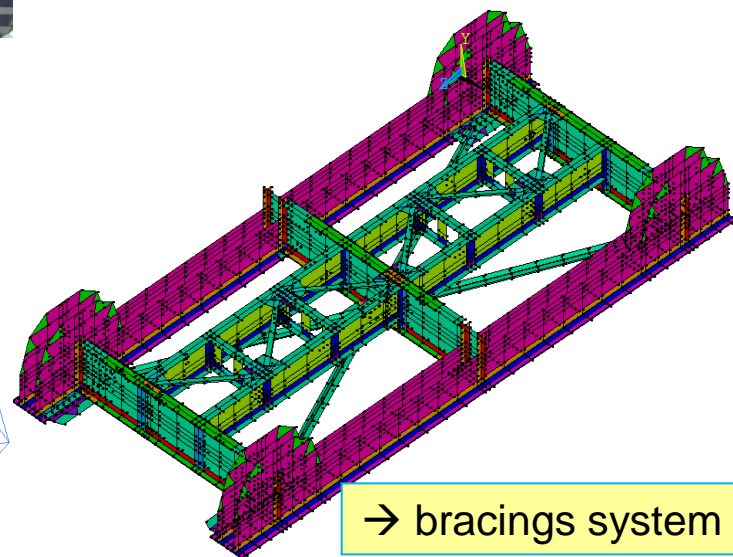
Realizzati modelli di dettaglio dei componenti
prescrivendo al contorno storie di spostamento ottenute dalle simulazioni numeriche sul modello globale

Modelli di dettaglio ove il Damage Index è maggiore di 10

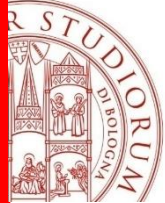
- Connection between floor beams and stringers,
- Connection between floor beams and the truss girders.
- Lower bracing system



→ connections



→ bracings system

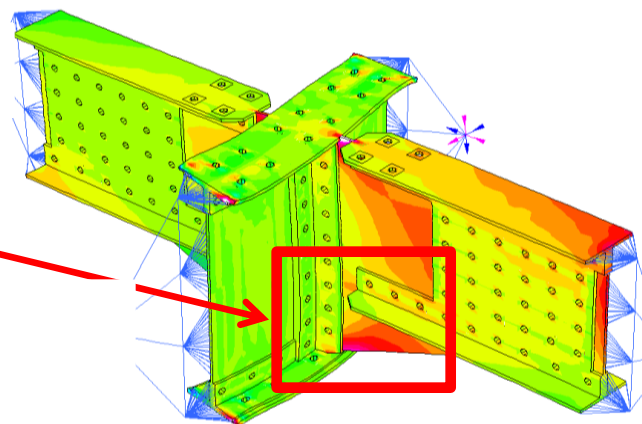
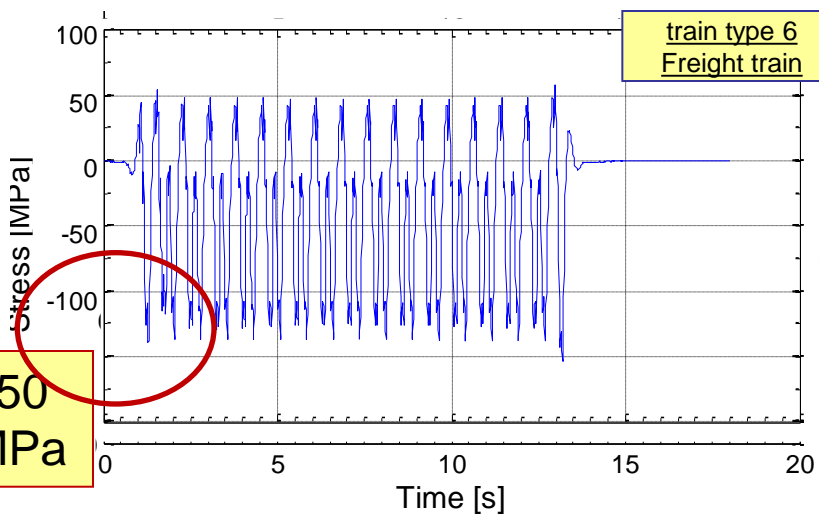
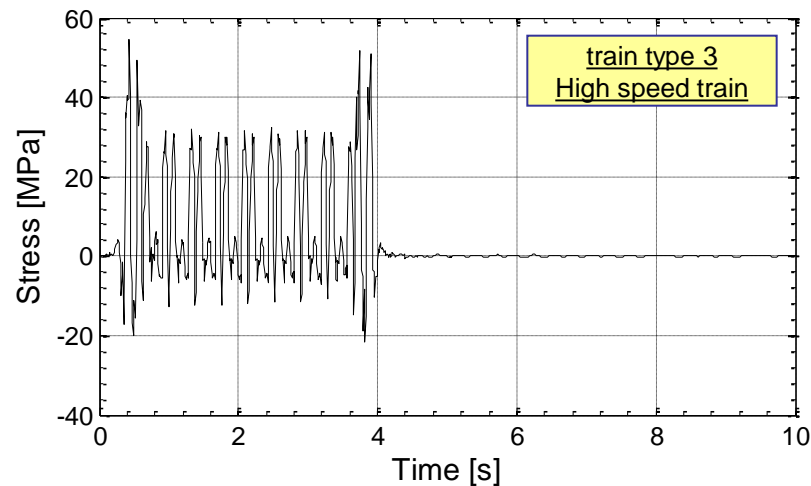
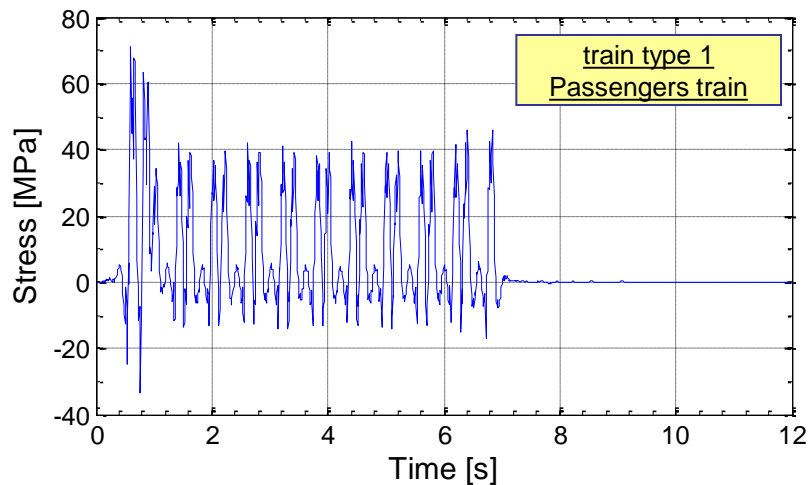


Monitoraggio on-site



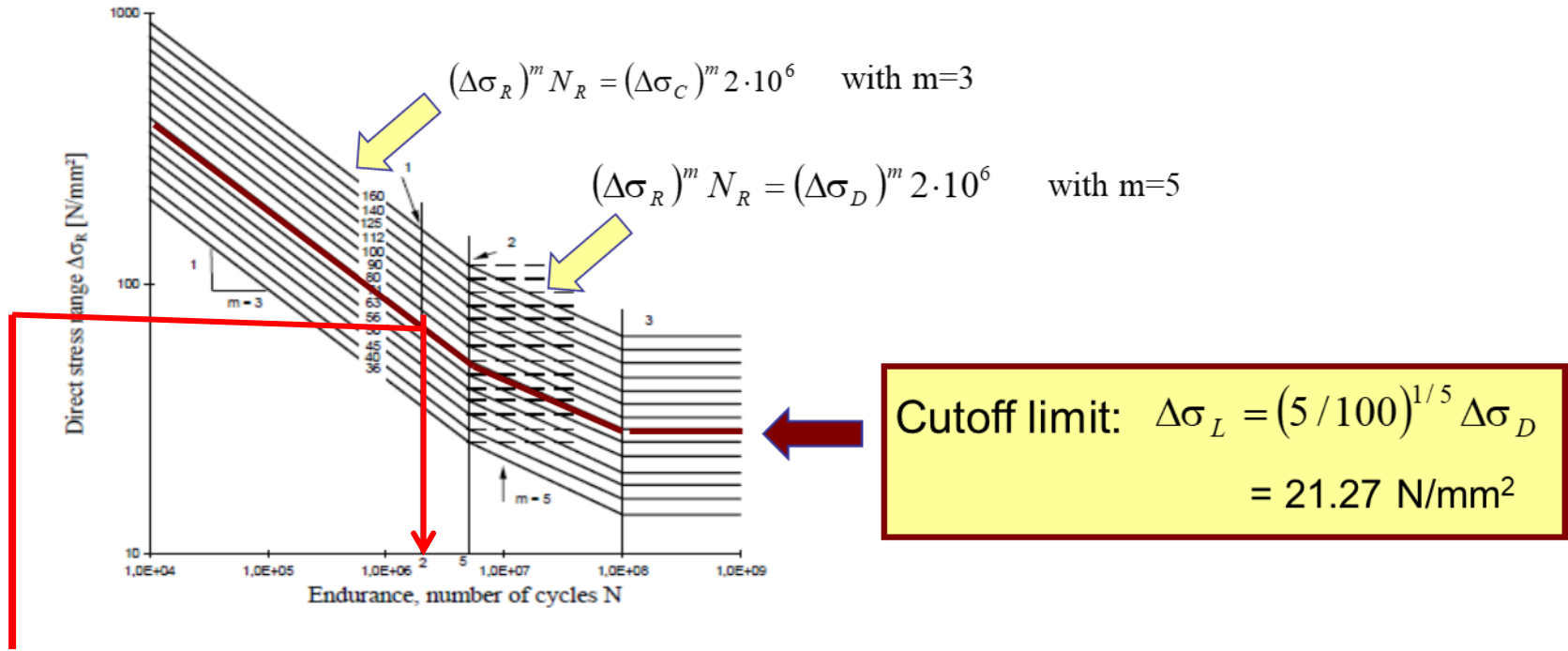
6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC



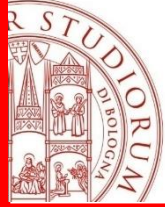
STEP 4 – ANALISI DI FATICA SUI COMPONENTI RILEVANTI E VITA UTILE

Analisi a fatica secondo Eurocode 3



Collegamenti rivettati:
 $\Delta\sigma_C = 71 \text{ N/mm}^2$

Vita utile a fatica -> 2 milioni di cicli



Monitoraggio on-site

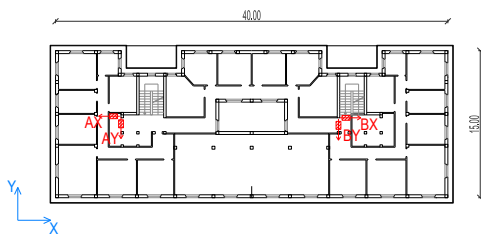


6 / 13
OTTOBRE
2024

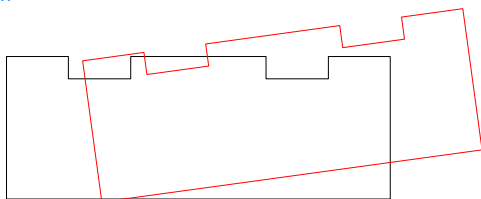
#settimanadiPC

APPLICAZIONI

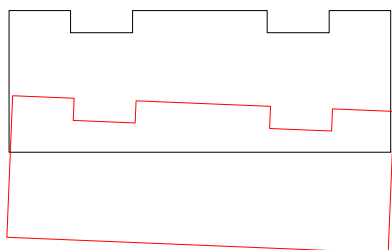
Monitoraggio vibrazionale di condomini in calcestruzzo armato



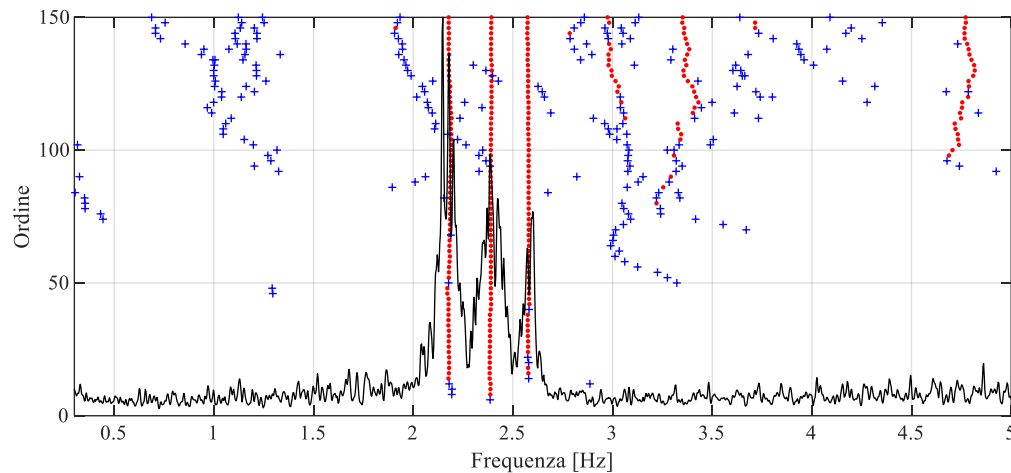
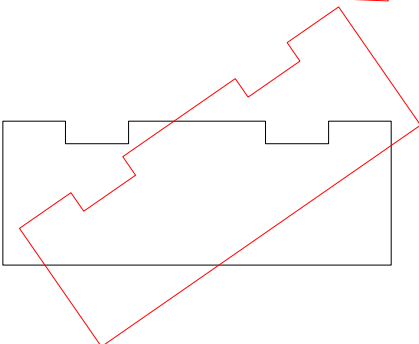
Modo 1

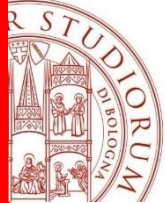


Modo 2

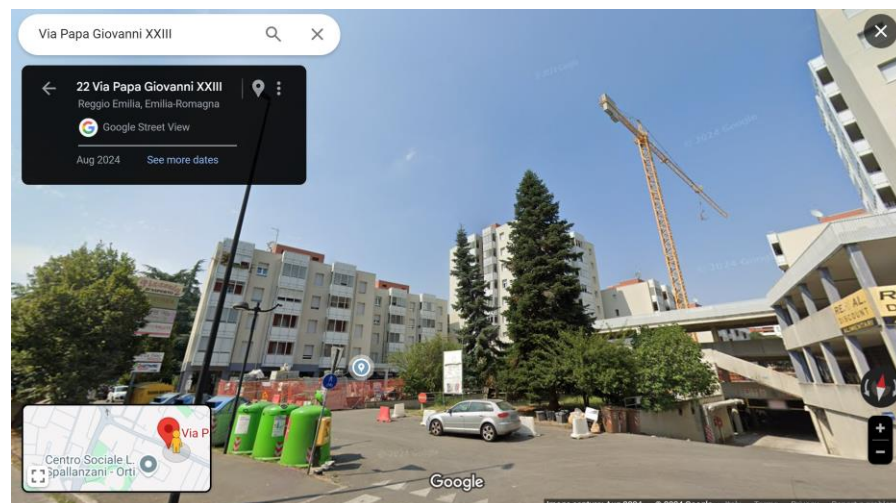
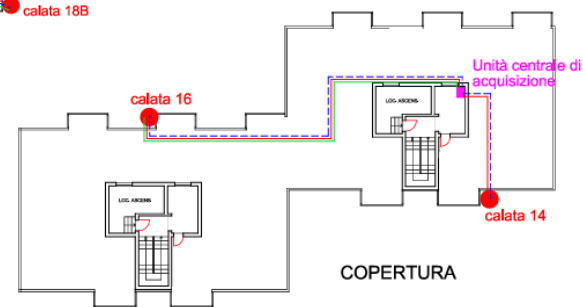
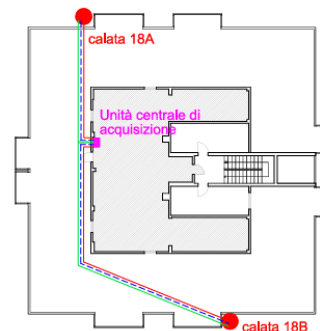
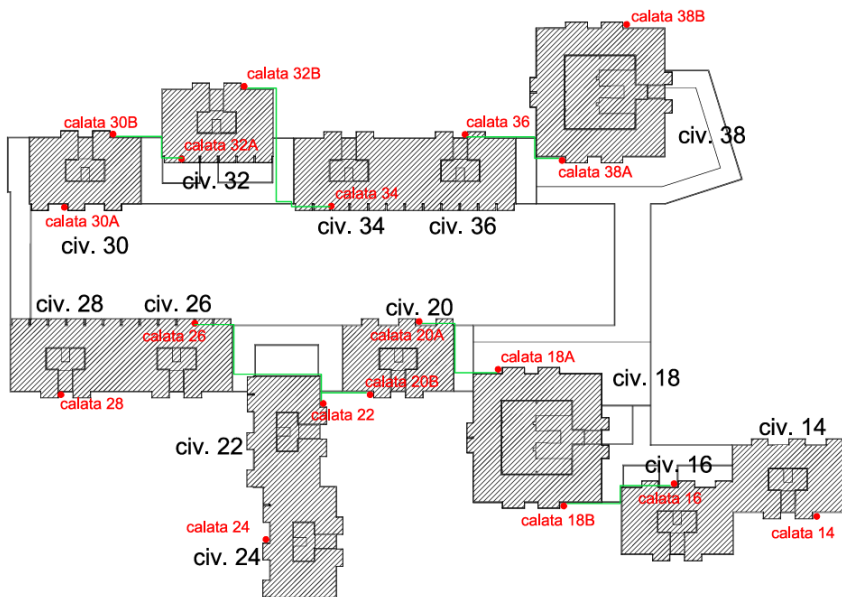


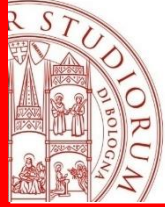
Modo 3





Monitoraggio delle accelerazioni in un complesso residenziale di 11 condomini





Monitoraggio on-site



6/13
OTTOBRE
2024

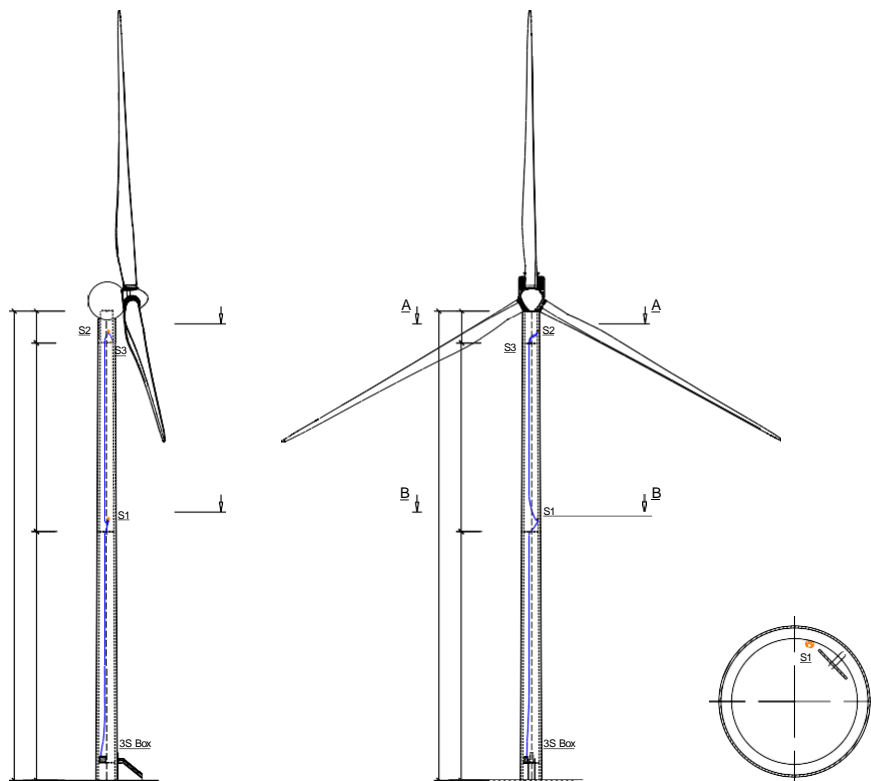
#settimanadiPC

APPLICAZIONI

Monitoraggio vibrazionale di turbine eoliche

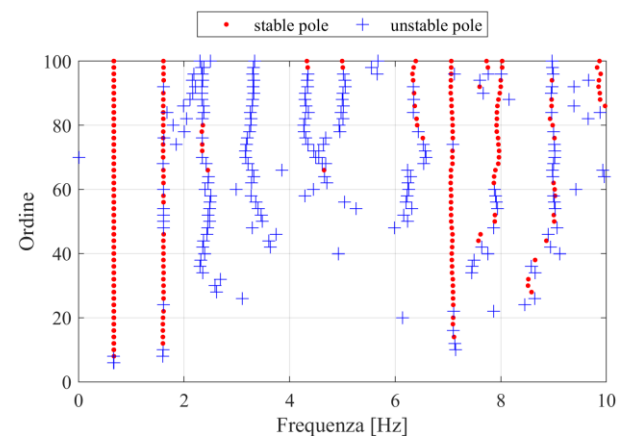
Monitoraggio finalizzato alla valutazione dello stato delle strutture di fondazione

Schema di monitoraggio previsto per i generatori eolici indagati



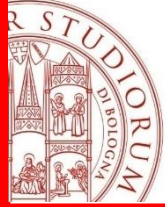
Le proprietà dinamiche del campione analizzato sono state utilizzate per una prima valutazione del comportamento delle strutture di fondazione

Output di analisi comparativa in frequenza per alcune delle strutture analizzate



| Vibrazioni Ambientali - metodo SSI | | | | |
|------------------------------------|--------------|---------------------|------------------|------------------------|
| | Freq (Hz) | Std freq (Hz) | CoefVa r freq | Indice Smorz (%) |
| 01 | 0.6724 | 0.0006 | 0.09% | 1.15 |
| 03 | 0.6782 | 0.0012 | 0.17% | 0.83 |
| 07 | 0.6789 | 0.0030 | 0.44% | 0.42 |
| 08 | 0.6724 | 0.0018 | 0.28% | 0.62 |
| 11 | 0.6804 | 0.0002 | 0.02% | 0.31 |
| 13 | 0.6780 | 0.0005 | 0.07% | 0.36 |
| 18 | 0.6747 | 0.0022 | 0.33% | 0.73 |
| 20 | 0.6841 | 0.0005 | 0.08% | 0.67 |
| 24 | 0.6775 | 0.0010 | 0.15% | 0.27 |
| 27 | 0.6816 | 0.0008 | 0.12% | 0.28 |





Monitoraggio on-site



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

ALTRE TECNICHE PER IL MONITORAGGIO (STATICO E) DINAMICO

Application of computer vision techniques to structural monitoring

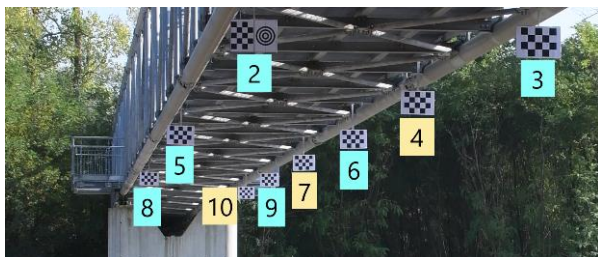


- Truss-girder structure
- 3 spans (45 m + 70 m + 45 m)
- Slender and lightweight
- Direct evaluation of displacements
- Multipoint monitoring with a single camera
- Camera on the riverbed
- Target on the structure and on the riverbed

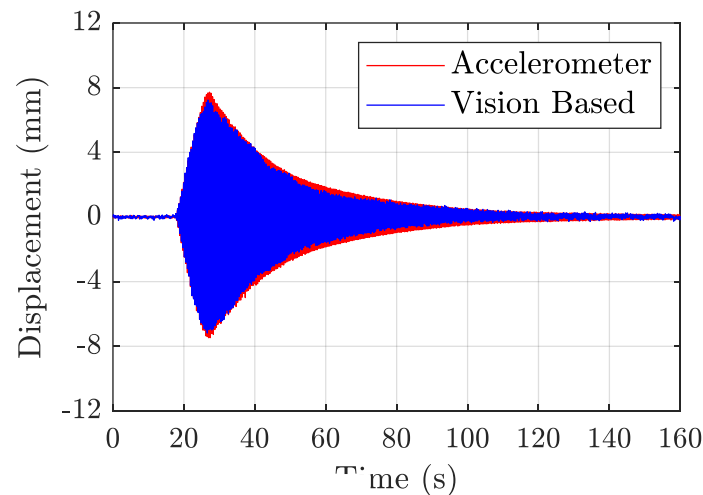


Jumping
excitation

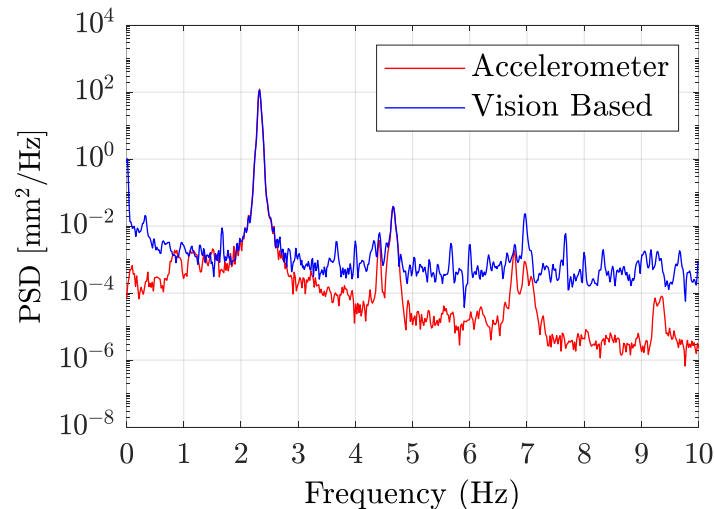
TARGET ID 2



Esempio di accelerazioni

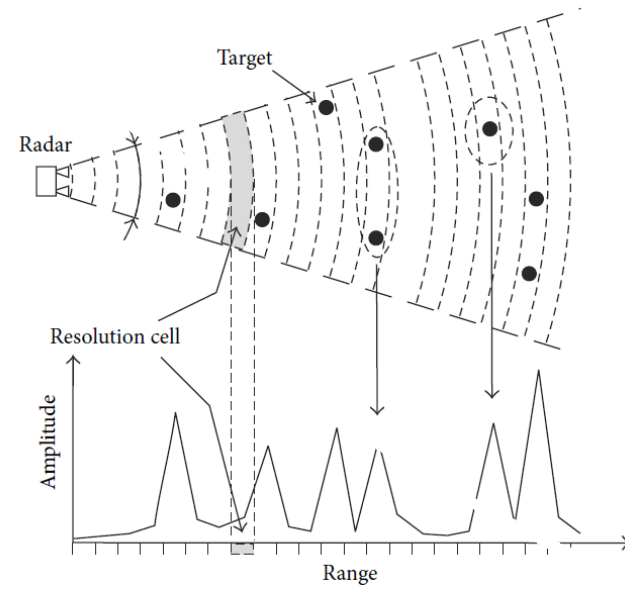
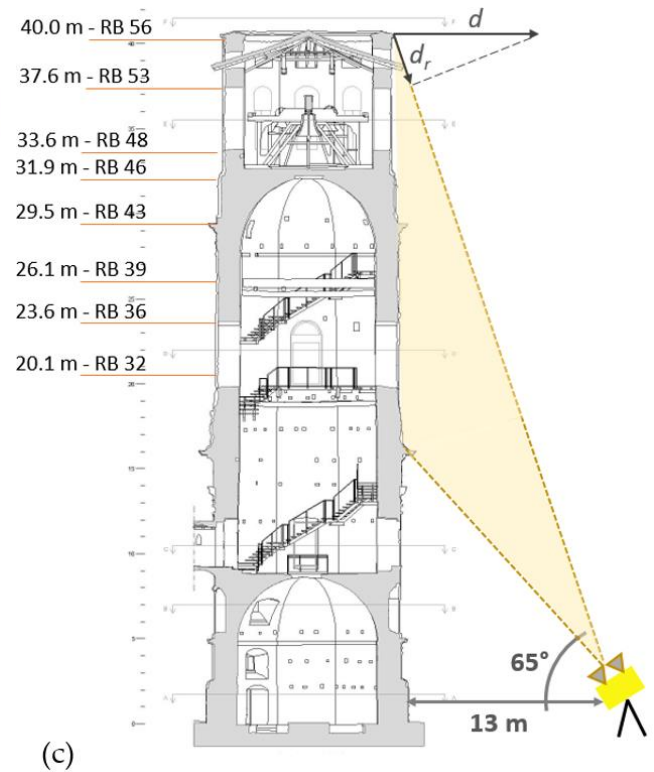
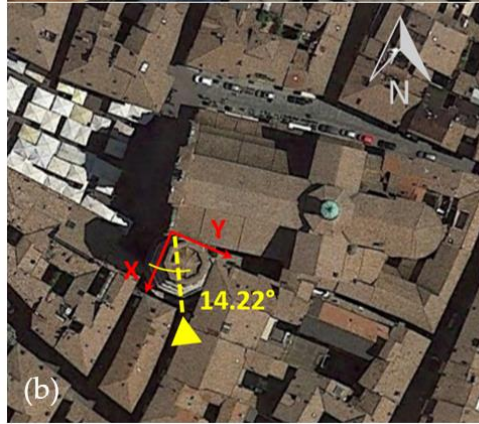


MEMS sensor for comparison



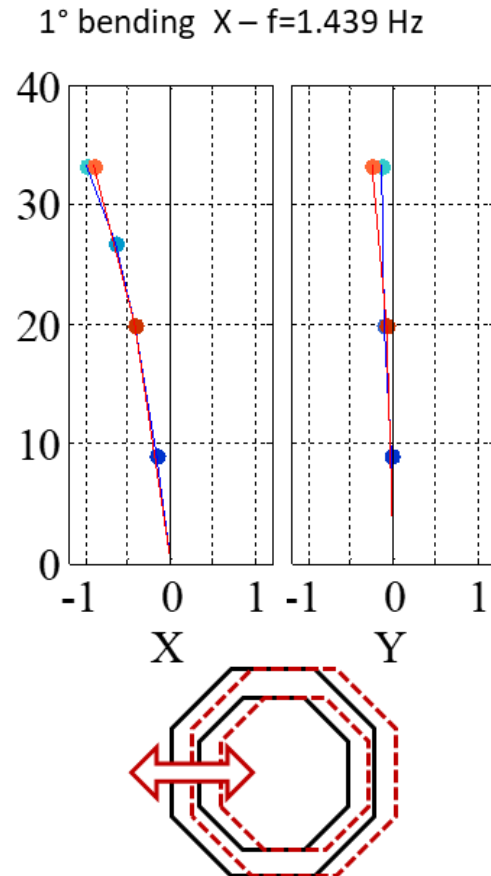
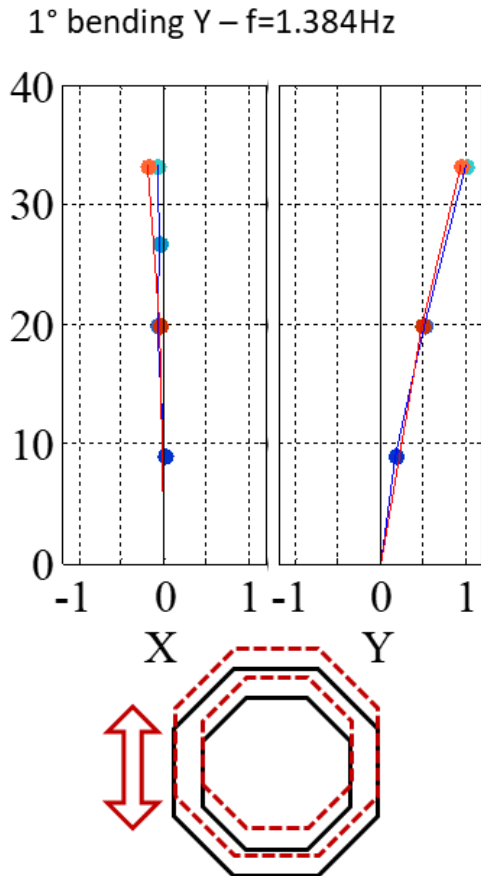
| Mode nr. | f (Hz) | Mode shape |
|----------|--------|------------|
| 1 | 2.32 | I bending |
| 2 | 4.43 | Torsional |
| 3 | 4.65 | II bending |

Interferometria radar

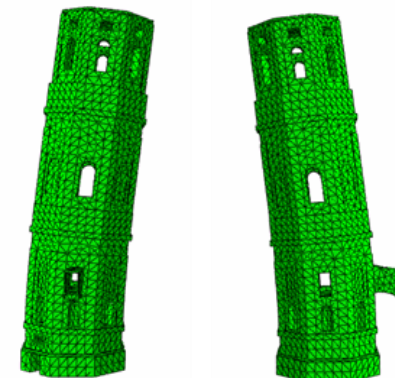


Interferometria radar

The San Prospero bell tower
Dynamic identification – EFDD method

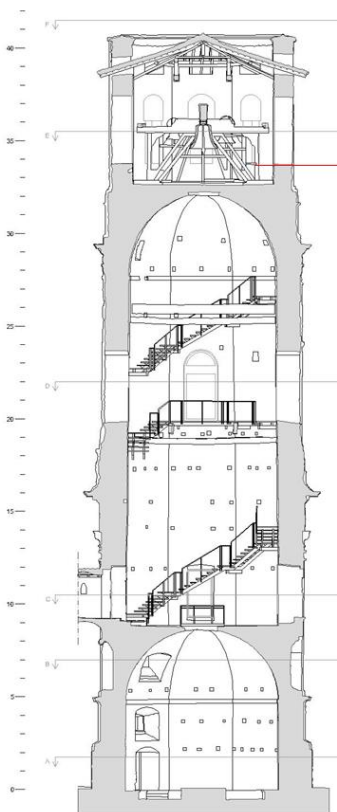


| Mode | Frequency [Hz]: |
|--------------|-----------------|
| 1° bending Y | 1.384 |
| 1° bending X | 1.439 |
| 1° torsional | 4.267 |
| 2° bending Y | 5.310 |
| 2° bending X | 5.355 |
| 2° torsional | 9.798 |
| 3° torsional | 13.15 |



Interferometria radar

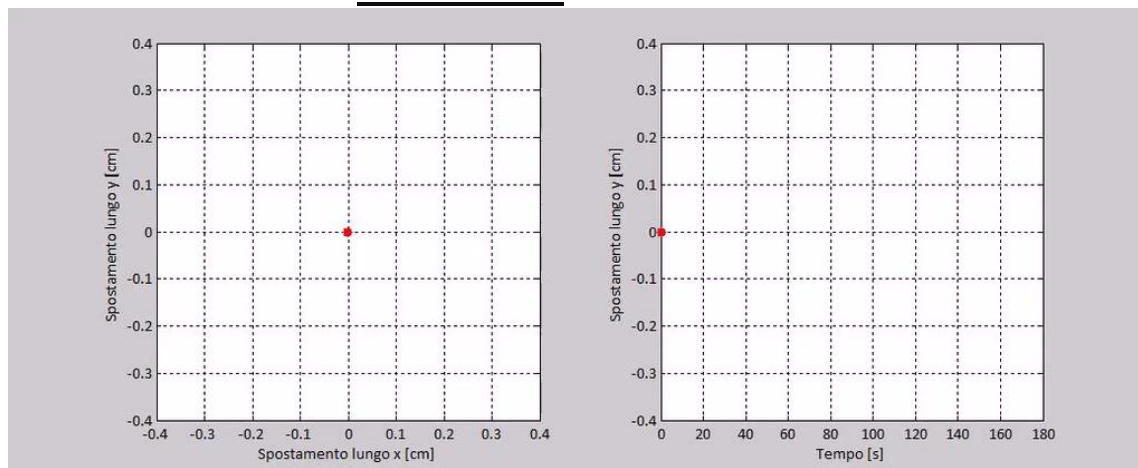
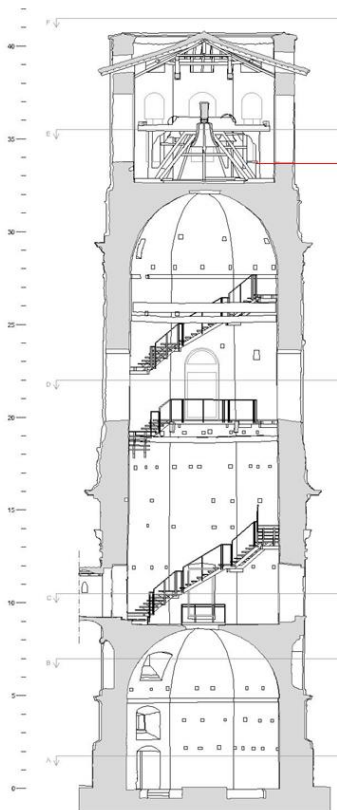
The San Prospero bell tower



Interferometria radar

The San Prospero bell tower

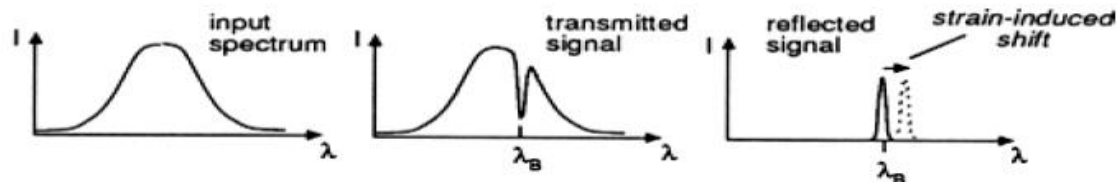
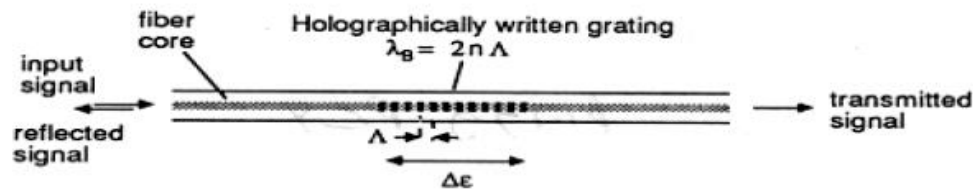
Bell concert



Monitoraggio con fibre ottiche, due tecnologie principali

Point sensing

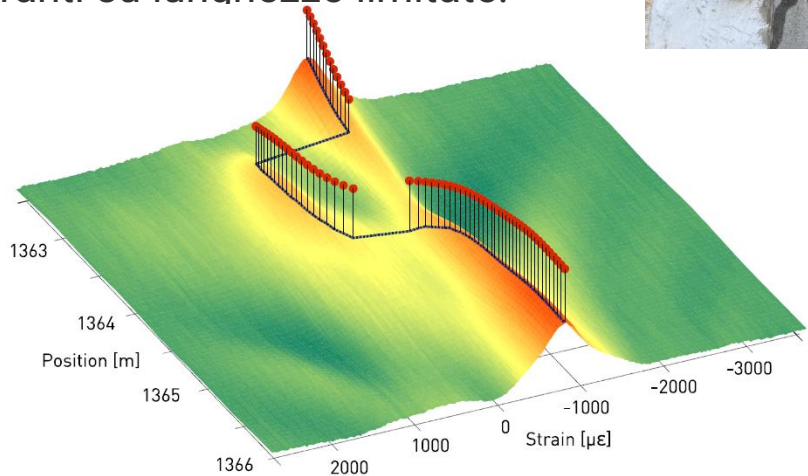
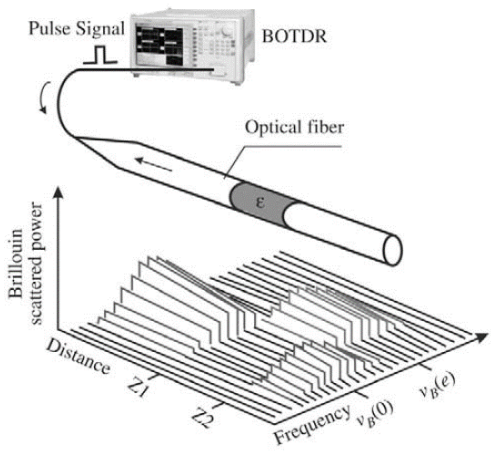
- Basato su reticolo di Bragg che deve essere impresso sulle fibre ottiche
- Il reticolo di Bragg riflette parte della luce incidente.
- Lo spettro della luce riflessa ha un picco in frequenza che cambia in funzione di temperatura e deformazione
- Esistono diversi strumenti basati sul reticolo di Bragg (misura strain, spostamento, accelerazione, temperatura)
- Misure stabili nel tempo (assolute)
- Misure statiche e dinamiche
- Possibilità di collegamento in serie di molti sensori



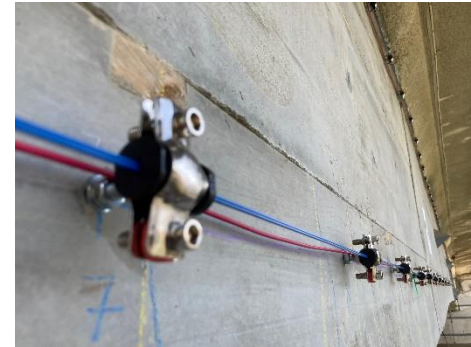
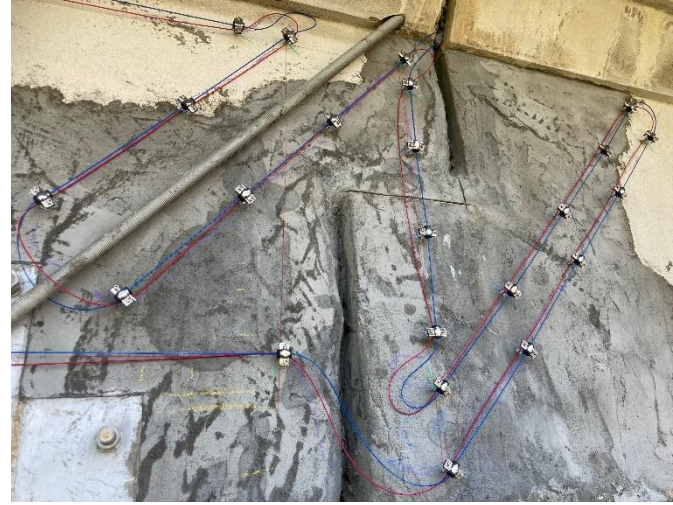
Monitoraggio con fibre ottiche, due tecnologie principali

Distributed sensing

- Basato su fenomeni ottici come Brillouin scattering. Spettro della luce si modifica in frequenza in funzione della densità della fibra ottica
- Possibilità di misurare temperatura e deformazioni su cavi anche per lunghezze di alcuni km
- Utilizzo di cavi a «basso costo»
- Misure stabili nel tempo (assolute)
- Prevalentemente per misure statiche. Esistono soluzioni per misure dinamiche operanti su lunghezze limitate.



Monitoraggio di selle Gerber



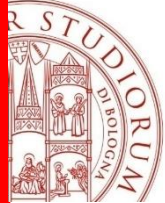
Monitoraggio con fibre ottiche, due tecnologie principali

Distributed sensing



Monitoraggio delle strutture di fondazione di pale eoliche





Monitoraggio on-site



6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC



Grazie per l'attenzione

Marco Savoia
Università di Bologna

con la collaborazione di Loris Vincenzi UniMore, Nicola Buratti e Daniele Scocciolini Unibo



SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

Il monitoraggio vibrazionale on-site e l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed opere infrastrutturali (Parte 1)

Prof. Marco Savoia – Università di Bologna