La sicurezza delle infrastrutture di trasporto: tecnologie per il monitoraggio e la manutenzione

Michela Basili

Professoressa Associata
Scienza delle Costruzioni
Universitas Mercatorum

Webinar 10 giugno 2025

FdP 2023-24: Programma Infrastrutture

PROGRAMMA INFRASTRUTTURE

CAMERA DI COMMERCIO DELLA BASILICATA

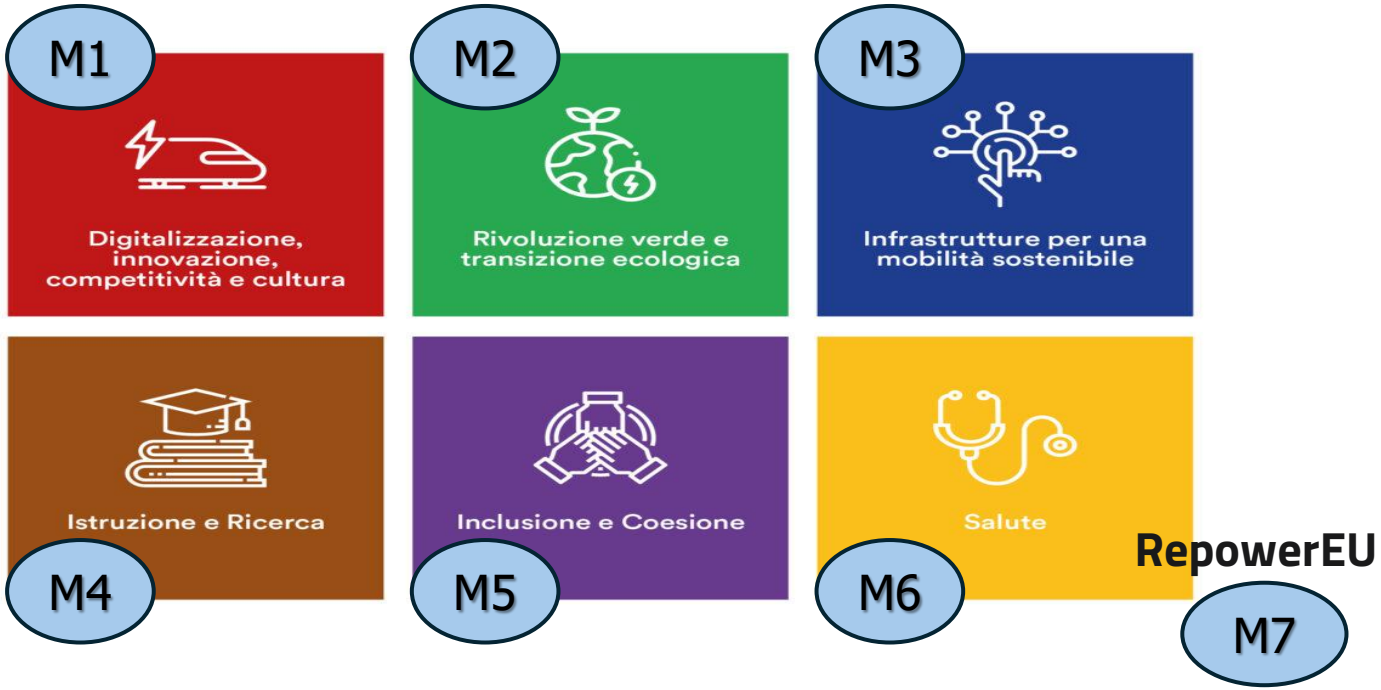
ASSET BASILICATA

UNIONTRASPORTI

Contenuti

- La missione 3 del PNRR
- Le infrastrutture di trasporto
  - qualche numero
  - focus sulle opere d'arte: ponti e viadotti
  - degrado e danneggiamento
- Normativa di riferimento
- Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative
- Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità
- Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni
- Digitalizzazione: piattaforme BMS, integrazione di modelli BIM-IoT, creazione di Digital Twin per la gestione e manutenzione sostenibile
- Settori di sviluppo possibili per la filiera

La missione 3 del PNRR



Intervento 1.2: Sicurezza Stradale 4.0
2.1: Trasferimento della titolarità delle opere d'arte (ponti, viadotti e cavalcavia) relative alle strade di secondo livello ai titolari delle strade di primo livello (autostrade e strade extraurbane principali)
2.2: Attuazione delle **Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti** (D.M. 578 del 17 dicembre 2020)

Missione 3-obiettivo: rendere, entro il 2026, il sistema infrastrutturale più **moderno**, **digitale** e **sostenibile**, in grado di rispondere alla sfida della decarbonizzazione e di ridurre i divari presenti sul territorio nazionale.

Missione 3-C1

- **Intervento 1.1 - Rete ferroviaria**
  - Ridurre divario infrastrutturale tra diverse Regioni italiane
  - Migliorare qualità dei servizi e ridurre tempi di percorrenza
  - Promuovere un'ottica green e digitale
- **Intervento 1.2 - Sicurezza Stradale 4.0**
  - Incrementare la sicurezza stradale

Infrastrutture di trasporto

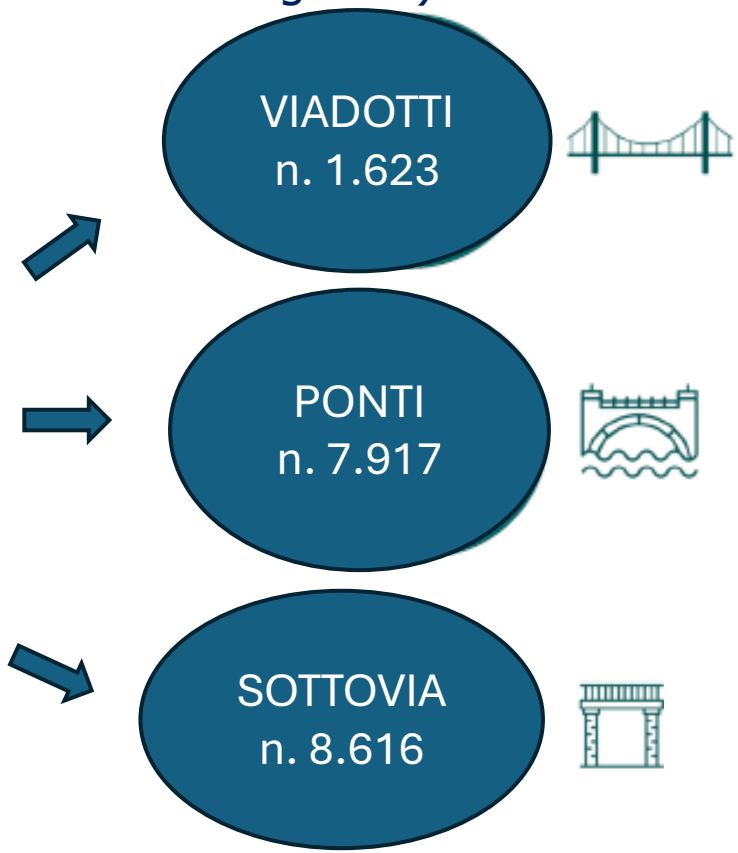
Le infrastrutture di trasporto:

- Corridoi di mobilità di persone e merci nelle connessioni tra centri urbani e logistici lontani tra loro
- Strategiche e necessarie in eventi di emergenza
- Fondamentali per lo sviluppo dell'economia e per la crescita della società

Infrastrutture di trasporto

RETE FERROVIARIA ITALIANA (RFI)

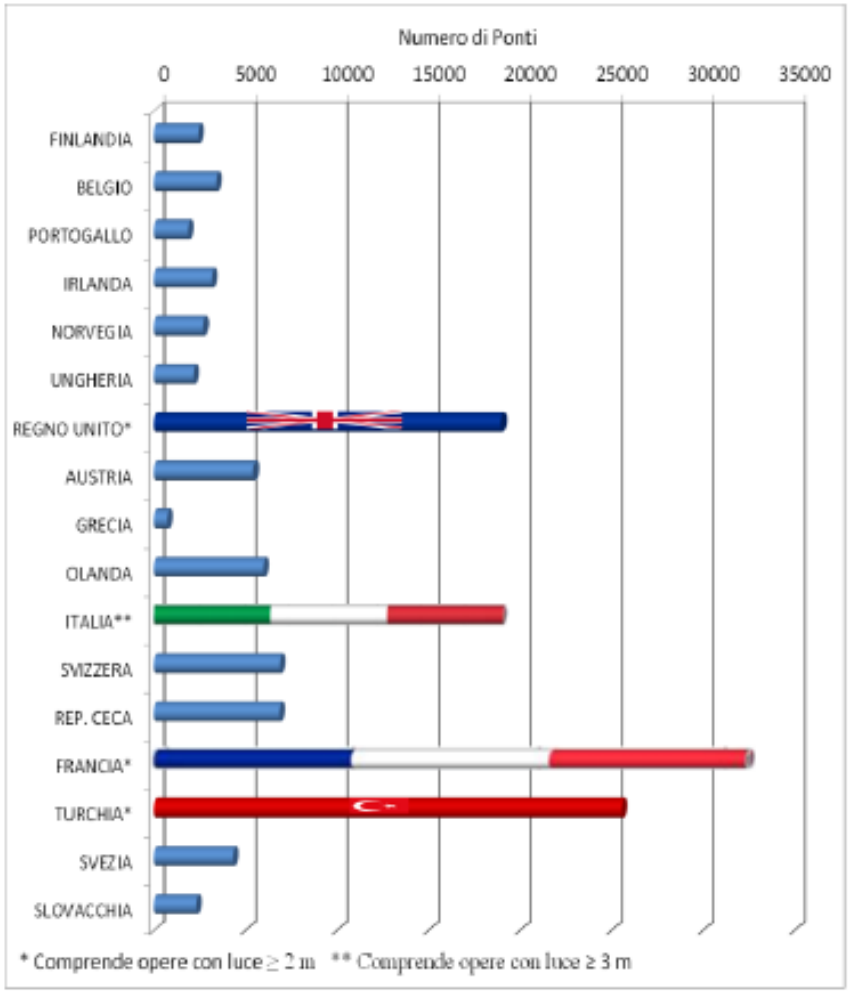
Ferrovie (nazionali e regionali): 17.530 km



≅18.000 Opere con luce >3 m corrispondenti a 570 km di linea

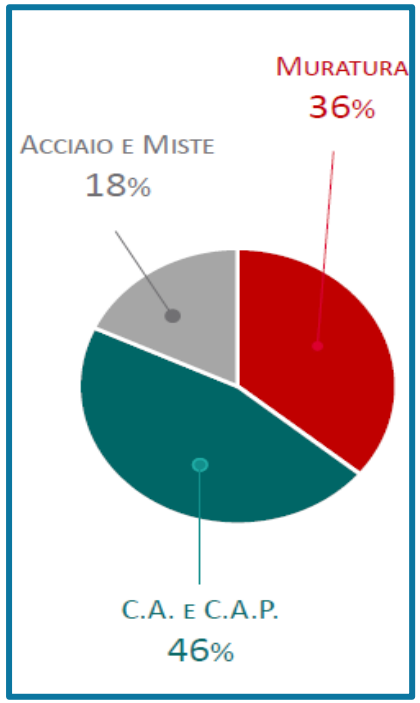
Fonte RFI

Infrastrutture di trasporto



I Ponti gestiti da RFI costituiscono uno tra i patrimoni di gran lunga più cospicuo tra tutte le nazioni europee

MATERIALI



Fonte RFI

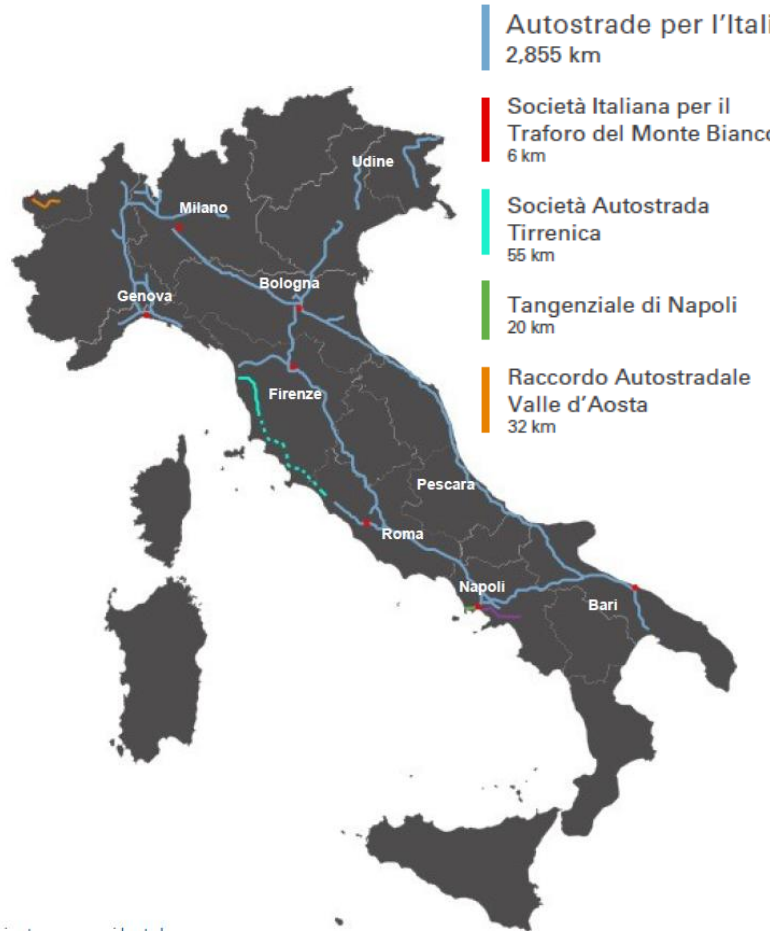
Infrastrutture di trasporto

RETE AUTOSTRADALE E STRADALE

2.855 km – Rete Autostrade (ASPI)
32.340 km- Rete strade statali e autostrade (ANAS)

RETE ANAS

RETE ASPI



Fonti ANAS e ASPI

Infrastrutture di trasporto

Opere d'arte sulla rete Stradale e Autostradale

Gestore	Km tratte	Gallerie		Ponti e Viadotti		Cavalcavia	
		nr	km	nr	km	nr	km
Concessioni Autostradali	8.004	1.318	1.051	8.199	1.474	3.846	-

Gestore	Km tratte	Gallerie		Ponti e Viadotti		Cavalcavia	
		nr	km	nr	km	nr	km
Strade Statali ANAS	27.259	861	708	12.873	1.355	2.474	-

21.072

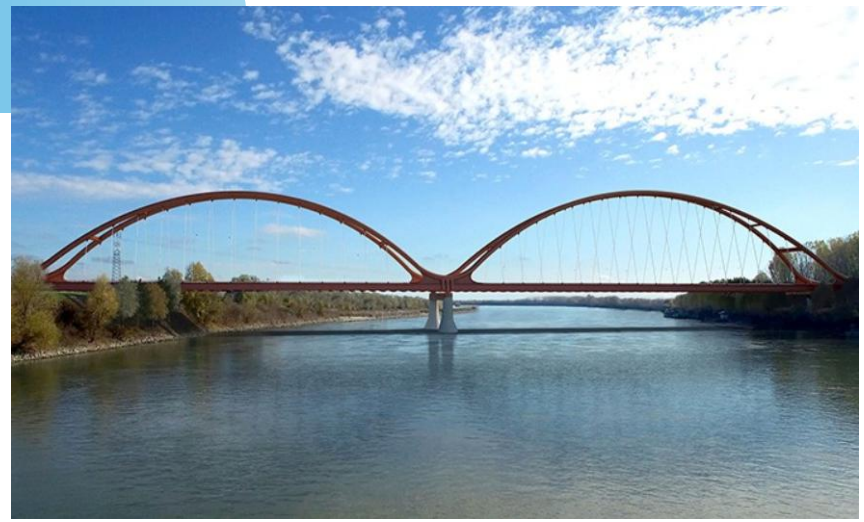
Fonte ANSFISA

Infrastrutture di trasporto: opere d'arte

Ponti: «..opere necessarie per superare fiumi, canali, bracci di mare, ecc.»

Viadotti: «opere rese necessarie dalla morfologia del terreno che impedisce alla strada (o alla ferrovia) di poggiarsi sulla sede naturale anche per lunghi tratti»

La valutazione della loro sicurezza e la riduzione del rischio costituisce un obiettivo di primaria importanza



Ponte sul Po

Viadotto Sente, Belmonte del Sannio e Castiglione Messer Marino

**M.P. Petrangeli, Progettazione e costruzione di ponti, Casa Editrice Ambrosiana.*

Infrastrutture di trasporto: opere d'arte

Le opere d'arte presenti nel nostro Paese sono caratterizzate da **significativa vetustà**:

Elevata percentuale di realizzazione negli anni 50-70

⟹ Norme, progetti, materiali e tecniche costruttive datati!

⟹ Valutazione della sicurezza (del rischio!) dei ponti e viadotti della rete stradale/ferroviaria italiana è diventata di primaria importanza

Tale valutazione, riferita all'esistente, non può prescindere dalla **fase della conoscenza**

Infrastrutture di trasporto: degrado e danneggiamento

Qualsiasi struttura è destinata a **degradarsi** nel tempo in tempi più o meno brevi a seconda della sua **durabilità**

Durabilità: Capacità di una struttura di mantenere inalterate nell'arco della vita di progetto i livelli prestazionali per i quali è stata progettata tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione

Capacità di una struttura	
In fase inziale	dipende da una **corretta progettazione** e una **buona costruzione**
Nel tempo	dipende da una **corretta manutenzione** costante ed efficiente

Scarsa manutenzione → degrado e danni strutturali → influenza su durabilità e sicurezza

E' importante conoscere le **cause** che generano **degrado/danno** e saper riconoscere gli **effetti** che producono sulle opere

Infrastrutture di trasporto: degrado e danneggiamento

Cause degrado materiale/componente:

- **FISICHE**: variazioni termiche naturali, cicli di gelo e disgelo (genera fessurazione cls e distacchi), e artificiali (incendio), ritiro da essiccamento e scorrimento viscoso (fessurazione cls, variazioni tensionali armature, allentamento bulloni..)
- **CHIMICHE**: attacco solfatico, reazione alcali-aggregati, attacco con anidride carbonica, attacco da acque di mare/sostanze acide. (generano fessurazione/distacchi/espulsione cls, corrosione armature e acciaio), carbonatazione
- **MECCANICHE**: abrasione/erosione, urti…
- **STRUTTURALI:** sovraccarichi eccessivi, assestamenti, carichi ciclici (fatica)
- **ERRORI DI PROGETTAZIONE/COSTRUZIONE:** errori di progetto, carenze di progetto della armature, sottodimensionamento, scarsa qualità delle materie prime, inefficienza degli appoggi, …

Fessurazione

Deterioramento materiale

Infrastrutture di trasporto: degrado e danneggiamento

- **Degrado di parti strutturali e o fondazionali**
- Impalcato
- Pile
- Spalle
- Fondazioni

- **Degrado per dissesti idrogeologici**
- Idraulico
- Da frana

- **Degrado per sisma e eventi catastrofici**

Erosione e scalzamento

Cedimento differenziale

Normativa di riferimento

Quadro normativo di riferimento per le opere d'arte esistenti

(rif. ponti e viadotti)

2018

- **NTC 2018:** Il § 8 disciplina la valutazione della sicurezza e la progettazione, esecuzione e collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti.

2019

- **CIRCOLARE ALLE NTC18**: al § C8.8 fornisce specifiche indicazioni per le opere d'arte esistenti.

2020

- Il CCSSLP approva con parere n. 88/2019 del **17/04/2020** le **Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.**

2022

- MIMS Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili - **Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti**, D.M. 01/07/2022, G.U. n. 196 23/08/2022
- Aggiornamento delle LG 2020 e detta le tempistiche per azioni che porteranno alla conoscenza di tutti i ponti e viadotti esistenti e delle condizioni in cui versano

Normativa di riferimento

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti

SCOPO

- Affrontare il problema della gestione dei ponti esistenti, ai fini di prevenire livelli inadeguati di danno, rendendo accettabile il rischio.

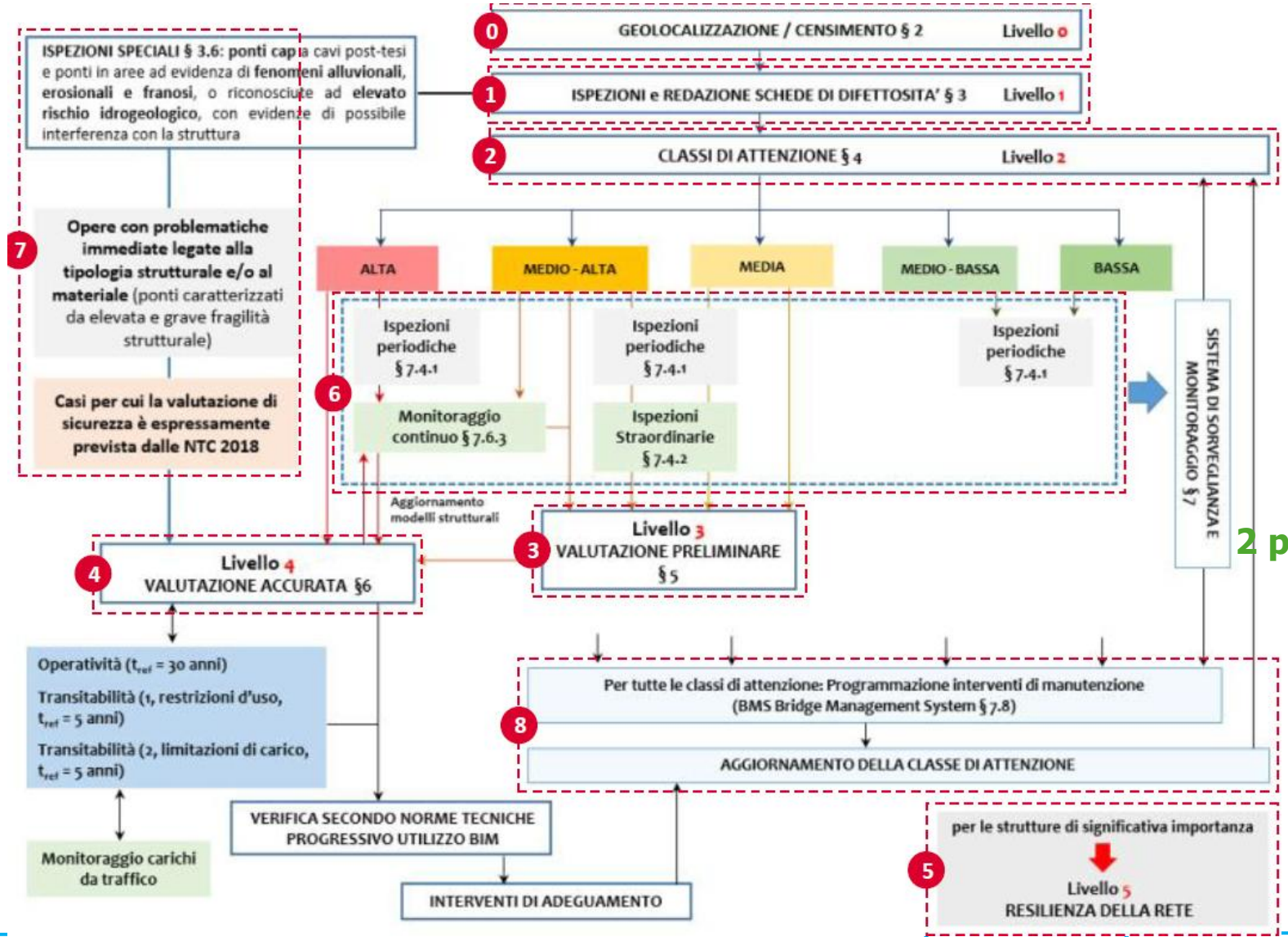
CAMPO DI APPLICAZIONE

- Riguardano tutti i gestori di ponti
- Ponti e viadotti con luce complessiva superiore ai 6.0 m
- Prima edizione maggiormente focalizzata ed aderente all'ambito stradale

Divisa in 3 parti:

1. Censimento e la classificazione del rischio
2. Verifica della sicurezza
3. Sorveglianza e monitoraggio

Normativa di riferimento



1 parte

0- Livello 0: Censimento (All. A linee guida)

1- Livello 1: Ispezioni (All. B-C linee guida)

2- Livello 2: Analisi dei rischi rilevanti e classificazione

3- Livello 3: Valutazione preliminare dell'opera

2 parte

4- Livello 4: Valutazione accurata della sicurezza

5- Livello 5: Resilienza della rete

6- Ispezioni e sistemi di monitoraggio

7- Casi di particolare attenzione: All. D linee guida

8- Sistema BMS/Modelli di degrado

3 parte

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

Ispezioni visive (Livello 1)
Strumenti di misura per eseguire il rilievo geometrico della struttura+ strumenti fotografici per l'esecuzione di rilievi fotografici anche a distanza

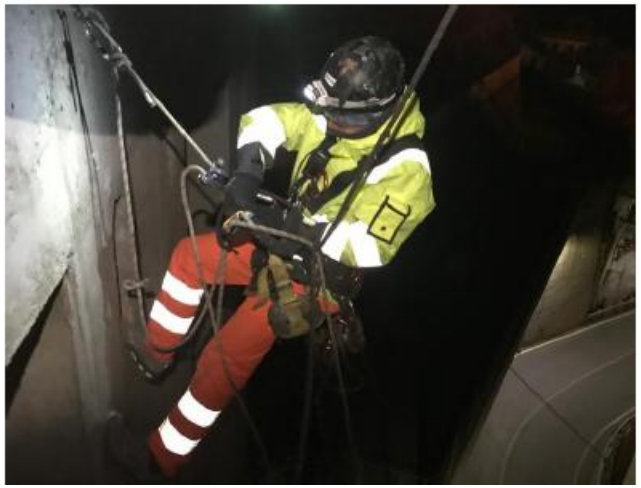
Strumenti tradizionali

Fessurimetro
Calibro
Metro
Distanziometro laser
Martello/Mazza
Fotocamera
Sclerometro
Filo a piombo
Binocolo
…

Strumenti innovativi

Drone: rilevamenti aerei, consente di effettuare ispezioni visive remotizzate, dotato di fotocamere ad alta risoluzione + sensori LiDAR. Per misurare aree difficilmente accessibili
Laser scanner 3D: Acquisizione di dati relativi all'opera per rilevare e registrare le caratteristiche tridimensionali e creazione modello geometrico 3D attraverso la nuvola di punti generata dalla scansione
Strumenti GPS/GNSS: Per posizionamento e georeferenziazione struttura. Dati ponte integrati con modelli territoriali e cartografie esistenti
Sensori integrati per monitoraggio: accelerometri, inclinometri, strain gauges…

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

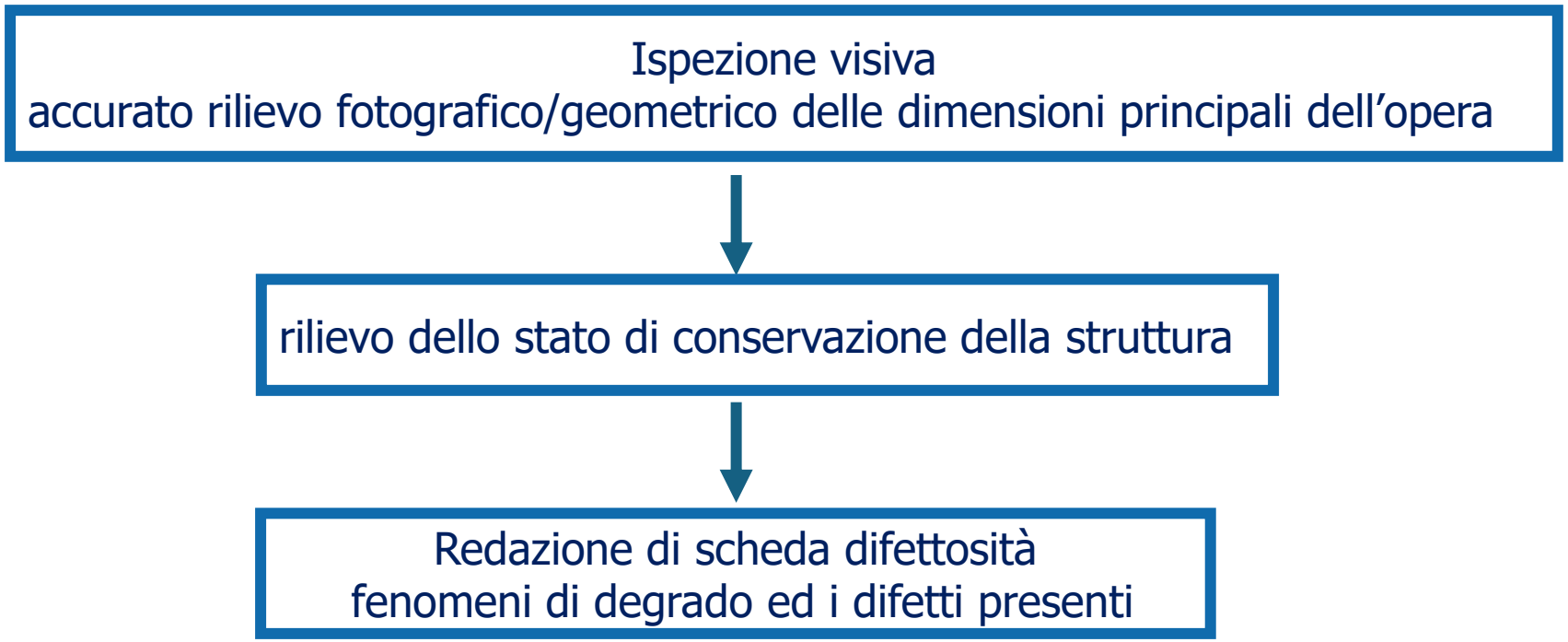


Mezzi per ispezioni in componenti strutturali difficilmente accessibili

- by-bridge
- cestelli negativi
- skywalker
- supporto di tecnici rocciatori specializzati, con personale di sorveglianza addetto a intervenire con tecniche alpinistiche e posizionamento mediante funi

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

Redazione schede di difettosità (Livello 1)



La compilazione di schede permette di indicare la presenza di specifici fenomeni di degrado e l'intensità e l'estensione con cui essi si manifestano.

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

Tipologie di difetto censibili sulle opere d'arte riportate nel Catalogo dei Difetti

Singoli difetti illustrati in schede monografiche

Ogni scheda di difettosità riporta un elenco dei difetti tipici di quell'elemento e di quel determinato materiale

Difetti
(in funzione della frequenza di insorgenza riscontrata nella pratica di sorveglianza)

- comuni
- rari

Ogni difetto è caratterizzato attraverso **tre** parametri:

- ✓ **U - ubicazione**, che tiene in conto, se presente, del posizionamento del difetto su componenti strutturali diverse o su parti di componenti specifiche
- ✓ **I - intensità**, che misura lo stadio del difetto e la sua possibile evoluzione
- ✓ **E - estensione**, che misura lo sviluppo del difetto sul componente ed è valutata, il più delle volte, tramite un rapporto tra superfici o lunghezze

Ad ogni difetto e associato un peso (G): da 1 a 5 ↑
difetti meno gravi peso=1, difetti più gravi peso= 5

Il **giudizio di difettosità** assume, per ciascuna ubicazione, una **forma matriciale**:

U_1		INTENSITÀ		
		BASSA	MEDIA	ALTA
ESTENSIONE	BASSA	C2	C1	C1
	MEDIA	C1	C1	B4
	ALTA	C1	B4	B4

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

Esempio scheda difettosità

Schede difettologiche — **N° difetto: c.a./c.a.p._3**

Calcestruzzo dilavato/ammalorato

Peso del difetto

G = 1 | G = 2 | **G = 3** | G = 4 | G = 5

Estensione k_1	**0,2** (appena presente)	**0,5** (~50% superficie)	**1** (~tutta la superficie)
Intensità k_2	Sempre = 1		

Descrizione

Il dilavamento e/o l'ammaloramento del calcestruzzo sono dovuti alla percolazione di acque superficiali e si manifesta prevalentemente sulle superfici verticali e inclinate degli elementi

Per **dilavamento** frequente di ac
rigonfiamento su

Cause

Tali fenomeni s
particolarmente
Generalmente il
delle acque met
corti o danneggi
Il degrado per
armature (carbo
legati alle caratte

Fenomeni di deg

I fenomeni di di
delle **macchie c**
riduzione della
strutturali prima

Scheda Ispezione Ponti di Livello 1

1 — **Spalle** N ____ Strada di appartenenza: _____ Progressiva km: _____ — **Calcestruzzo** Tecnico rilevatore: _____ Data ispezione: __/__/____

Mims — Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili

Codice difetto	Descrizione difetto	visto	G	Estensione K1			Intensità K2			N° foto	PS	NA	NR	NP	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1						
c.a/c.a.p._1	Macchie di umidità passiva	☐	1	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
c.a/c.a.p._2	Macchie di umidità attiva	☐	3	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Dif. Gen_1	Tracce di scolo	☐	3	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._3	Cls dilavato / ammalorato	☐	3	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
Dif. Gen_2	Ristagni d'acqua	☐	2	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._4	Vespai	☐	2	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._5	Distacco del copriferro	☐	2	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._6	Armatura ossidata/corrosa	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._7	Lesioni a ragnatela modeste	☐	1	☐	☐	☐			☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._8	Fessure orizzontali	☐	2	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._9	Fessure verticali	☐	2	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._10	Fessure diagonali	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._11	Lesioni attacco pilastri (spalle a telaio)	☐	3	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._12	Riprese successive deteriorate	☐	1	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
Dif. Gen_3	Danni da urto	☐	4			☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Dif. Gen_6	Fuori piombo	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Ril/Fond_1	Scalzamento	☐	5			☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Ril/Fond_2	Dilavamento del rilevato	☐	1			☐			☐			☐	☐	☐	
Ril/Fond_3	Dissesto del rilevato - deformazioni	☐	2			☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
Ril/Fond_4	Dissesto del rilevato - stabilità	☐	4			☐			☐		☐	☐	☐	☐	
Ril/Fond_5	Movimenti di fondazione	☐	5	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
c.a./c.a.p._13	Lesioni da schiacciamento	☐	4			☐	☐	☐	☐		☐	☐	☐	☐	
Dif. Gen_4	Lesioni caratteristiche zone appoggio	☐	3	☐	☐	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
Eventuali note															

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

A. Brajon et al. The IRRADIA research project for the advanced management of infrastructures, Procedia Structural Integrity 62 (2024) 32–39

a)

MATERIAL	N° Class	ADD_B CLASS	CLASS DESCRIPTION	COLOR
Reinforced Concrete & Prestressed Reinforced Concrete	1	CL_a	Cracking	
	2	CL_b	Efflorescence	
	3	CL_c	Infiltrations and washouts	
	4	CL_d	Execution defects	
	5	CL_e	Deterioration	
	6	CL_f	Exposed reinforcements	
	7	CL_g	Deteriorate successive repairs	

b)

MATERIAL	N° CLASS	ADD_B CLASS	CLASS DESCRIPTION	COLOR
Masonry	1	CL_a	Cracking	
	2	CL_b	Efflorescence	
	3	CL_c	Infiltrations and washouts	
	4	CL_d	Scaling and disintegration	
	5	CL_e	Loss of material in the joints	
	6	CL_f	Broken or missing elements	
	7	CL_g	Patinas and plants	
	8	CL_h	Deteriorated successive repairs	

Fig. 1. Description of defect classes for ADD_B © software: (a) RC and PRC; (b) masonry.

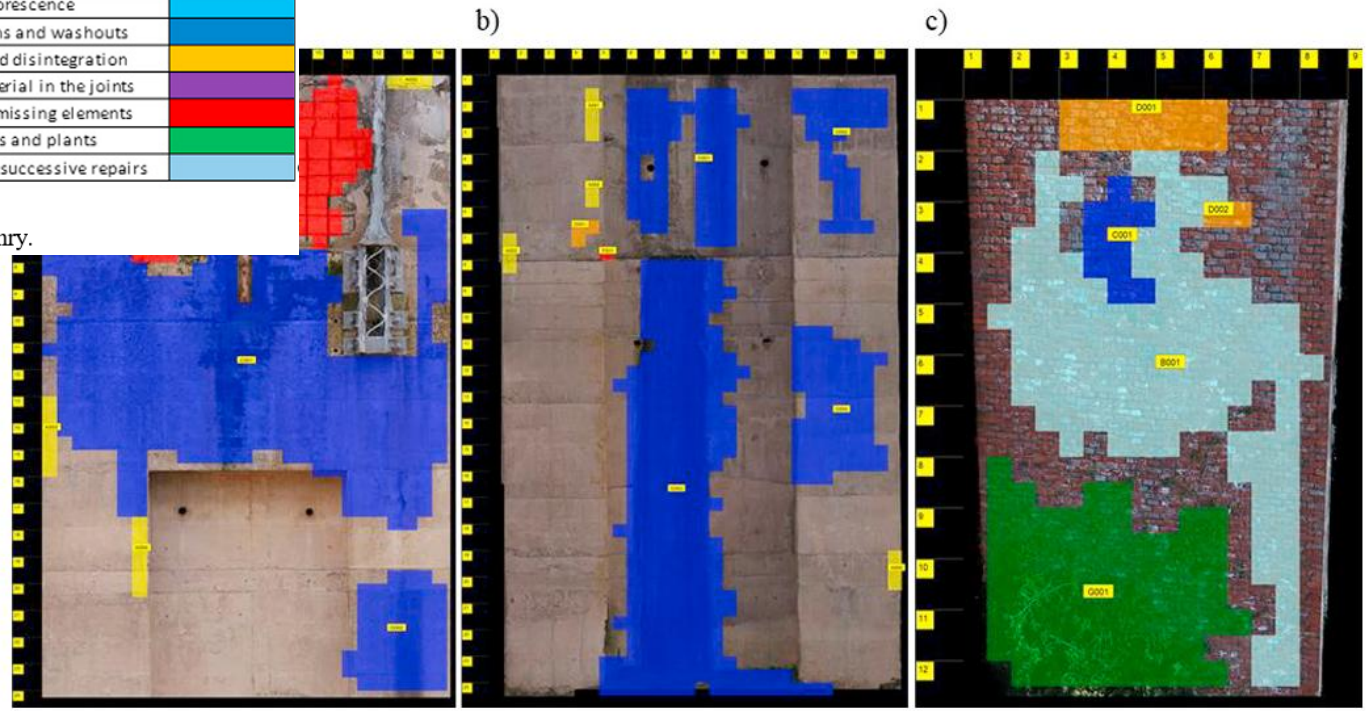


Fig. 4. Automatic defect recognition through the use of ADD_B ©: (a) quadrant 12 of pier 4, case study 1; (b) quadrant 11 of pier 9, case study 1; (c) quadrant 11 of pier 2, case study 2.

Tecnologie e strumentazioni tradizionali e innovative

VALUTAZIONE DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELLE OPERE

IERI

ISPEZIONE VISIVA
secondo procedure e in caso di eventi eccezionali (sisma)

Sistemi strumentali di monitoraggio su condizione
opere con caratteristiche strutturali particolari opere con stato di conservazione particolare

OGGI

ISPEZIONE VISIVA
integrata all'occorrenza da indagini strumentali e prove

+ DRONI

Sistemi strumentali di monitoraggio su condizione
opere con caratteristiche strutturali particolari opere con stato di conservazione particolare

DOMANI

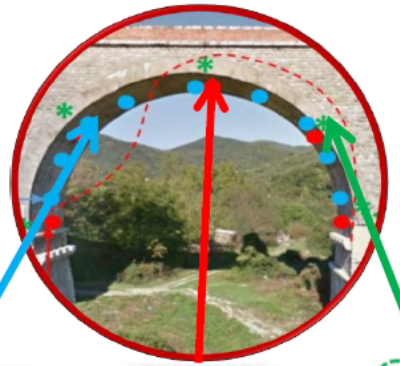
ISPEZIONE VISIVA

+

DRONI

+

Sistemi Strumentali di Monitoraggio su logiche IoT



Inclinometri

Accelerometri

Sensori di deformazione

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

È importante rilevare i danni il prima possibile, sia per motivi di sicurezza sia per ragioni di costi

Strategie e politiche di manutenzione

- Manutenzione correttiva o al guasto
- Manutenzione ciclica o programmata
- Manutenzione su condizione
- Manutenzione predittiva

PREVENTIVE

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Manutenzione correttiva o al guasto

Infrastruttura/suoi componenti rimangono in servizio fino al punto in cui uno di essi si guasta

Ha vantaggi limitati ed è altamente rischiosa, soprattutto per infrastrutture critiche come i ponti

⇑ Applicabile ad elementi non strutturali

⇓ Costi di riparazione post-guasto molto elevati

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Manutenzione ciclica o programmata

Manutenzione effettuata a intervalli di tempo regolari, indipendentemente dallo stato effettivo dei componenti

⇑ Manutenzione regolare, previene guasti imprevisti, utile per componenti con una vita utile stimata (giunti di dilatazione, strati d'usura dell'asfalto, sistemi di drenaggio…)

⇓ Potrebbe comportare interventi non necessari (ad esempio, sostituire un componente ancora in buone condizioni)

⇓ Non sempre efficace nel prevenire guasti improvvisi su componenti strutturali critici che si deteriorano in modo non lineare (es. corrosione accelerata delle armature)

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Manutenzione su condizione

Presuppone un monitoraggio continuo/periodico

Prevede interventi solo quando le condizioni reali dell'opera indicano che è necessario intervenire

Si basa su misure dirette

⇑ Migliora la sicurezza rilevando il degrado in fase iniziale, riduce costi di manutenzione a lungo termine, intervenendo solo quando necessario

⇓ Richiede l'installazione di sensori avanzati e un'infrastruttura di monitoraggio (costosa da implementare), necessita di personale tecnico specializzato per analizzare i dati raccolti, monitoraggi frequenti, non predice il futuro

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Manutenzione predittiva

Presuppone un monitoraggio continuo

Si basa sull'analisi dei dati storici e in tempo reale per prevedere quando si verificherà un degrado o un guasto, permettendo di intervenire prima che ciò accada

Utilizza modelli matematici/algoritmi di AI o machine learning per prevedere il comportamento futuro

⇑ Massima ottimizzazione della manutenzione, riduce costi di manutenzione a lungo termine, aumenta la sicurezza

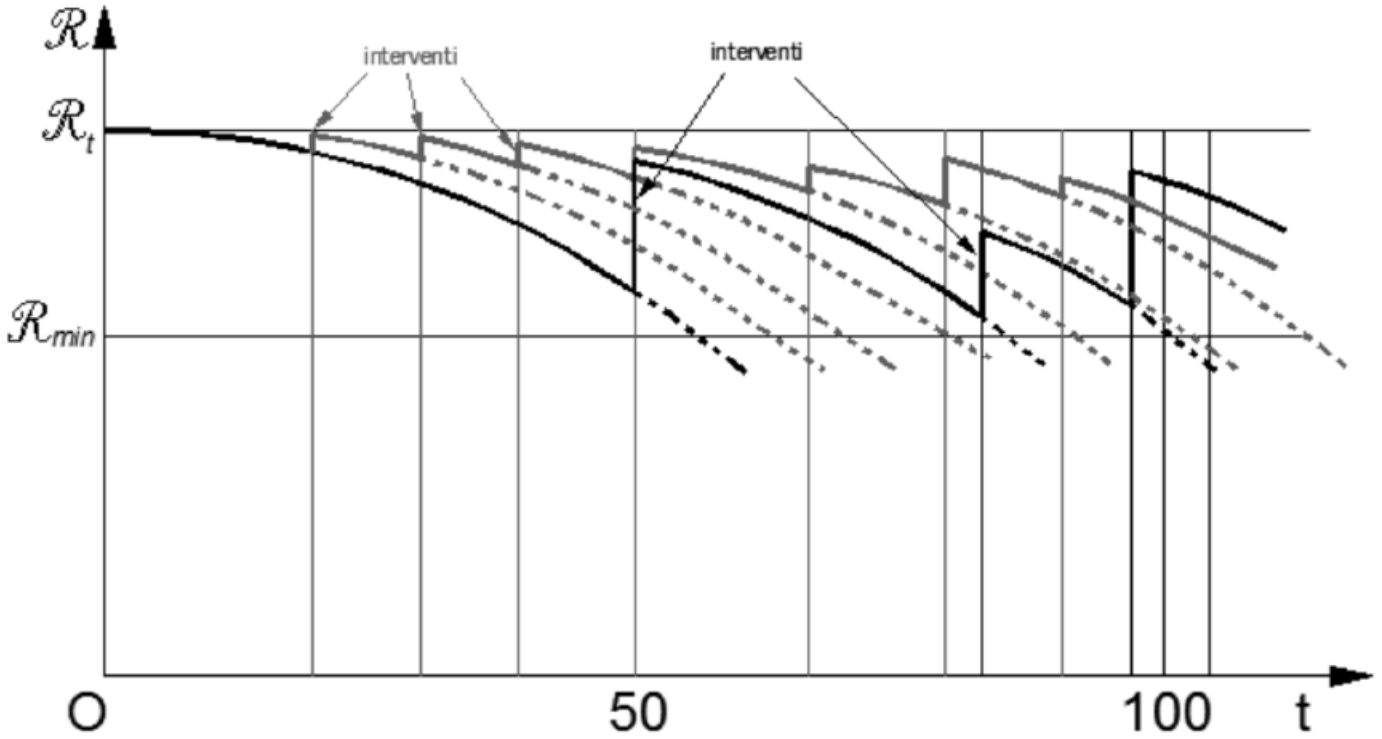
⇓ Necessita di molti dati e modelli affidabili

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Strategia di manutenzione	Definizione	Vantaggi	Svantaggi
Manutenzione correttiva o al guasto	Intervento dopo il guasto o danno	Nessun investimento preventivo	Elevato rischio, costi imprevedibili, non adatta a infrastrutture critiche
Manutenzione ciclica o programmata	Intervento a intervalli regolari pianificati	Prevedibilità dei costi, riduzione rischi improvvisi	Possibili interventi inutili o tardivi
Manutenzione su condizione	Intervento in base alle condizioni reali rilevate	Miglior rapporto costi-benefici, interventi mirati	Dipendenza dalla qualità del monitoraggio
Manutenzione predittiva	Intervento previsto sulla base di modelli predittivi e monitoraggio continuo	Ottimizzazione degli interventi, riduzione drastica dei rischi	Costi iniziali elevati, necessità di tecnologie avanzate

Manutenzione di un'infrastruttura: sicurezza e sostenibilità

Evoluzione dell'indice di affidabilità R e della vita utile di un'opera in funzione degli interventi



Circolare Ministeriale 21 gen. 2019

Interventi con manutenzione predittiva nelle prime fasi di degrado strutturale permettono di incrementare notevolmente la vita utile dell'opera ottimizzando i costi di intervento

Interventi di riparazione o/manutenzione straordinaria permettono un recupero del valore dell'indice di affidabilità ed allungamento della vita utile dell'opera

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Structural Health Monitoring (SHM): to *monitor* the *health* of a *structure*

- To monitor: L'utilizzo di dispositivi che possono essere integrati nella struttura o aggiunti (su base temporanea o permanente) e che misurano quantità indicative delle prestazioni della struttura (ad esempio, spostamento, temperatura) in qualsiasi punto nel tempo e nello spazio è stato reso possibile grazie ai progressi nelle tecnologie informatiche, dei sensori e dei materiali.
- Health of a structure: Equivalente a 'condizioni di una struttura', o meglio, 'condizioni operative di una struttura'.

$\Longrightarrow$ implica la conoscenza del corretto comportamento della struttura oggetto di indagine.

Se la struttura si comporta come previsto al momento della sua progettazione, allora può essere considerata in 'condizioni sane'.

Se non lo fa, allora possiamo affermare che qualcosa è accaduto alla struttura e che le sue condizioni non sono 'sane'

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Processo dello SHM per rilevamento salute/danni di un opera, al fine di determinare se essa soddisfa i requisiti operativi.

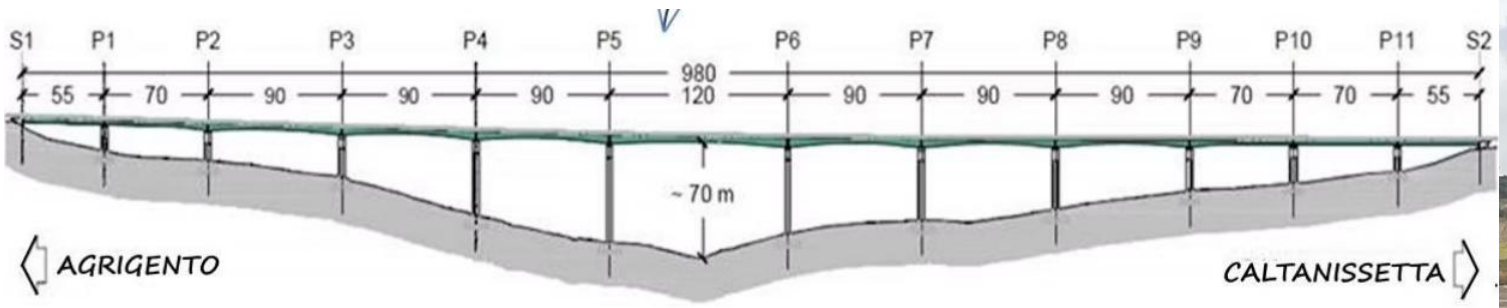
Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Valutazione operativa

Analisi preliminare della struttura per comprendere le vulnerabilità del sistema e le impostazioni operative del progetto di monitoraggio. Si decide: tipo di sensori utilizzare, dove posizionarli, quali sono le condizioni esterne da considerare durante la raccolta dei dati, ecc.

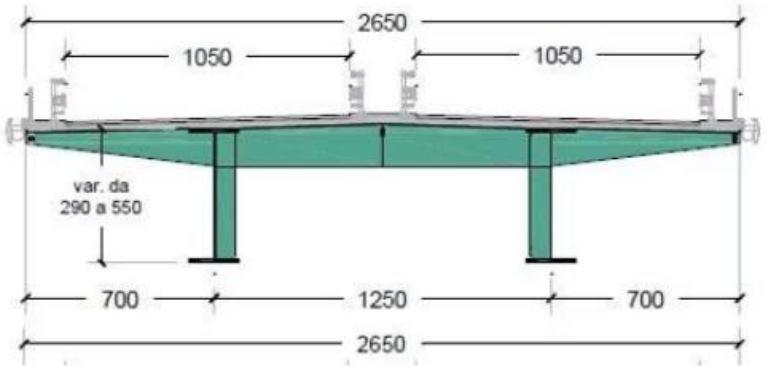
Definizione caratteristiche morfologiche dell'opera:

- n. campate (12)
- n. pile (11)

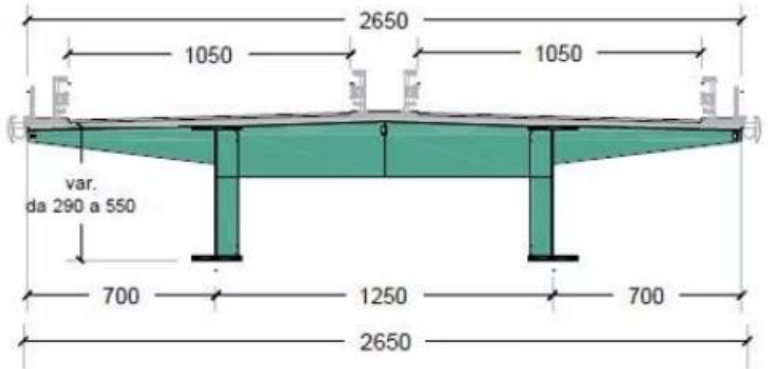


https://dewesoft.com/blog/viaduct-operational-modal-analysis

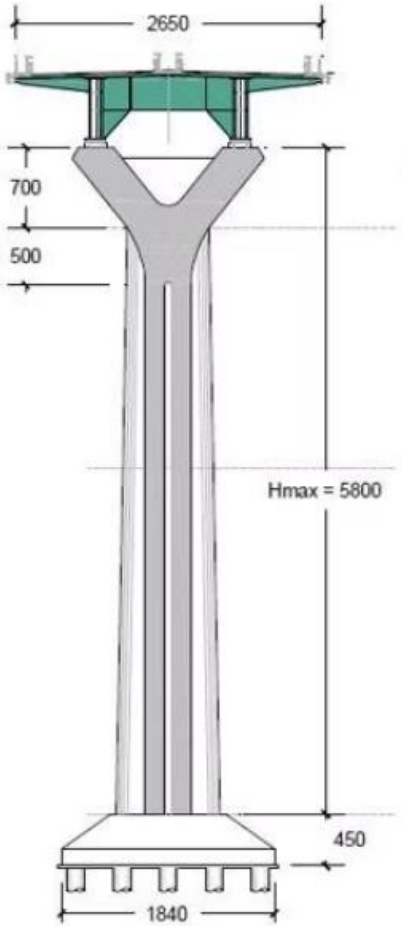
Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni



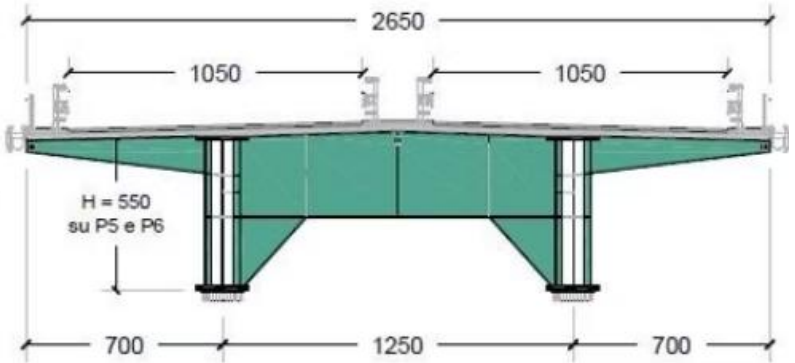
CURRENT CROSS SECTION



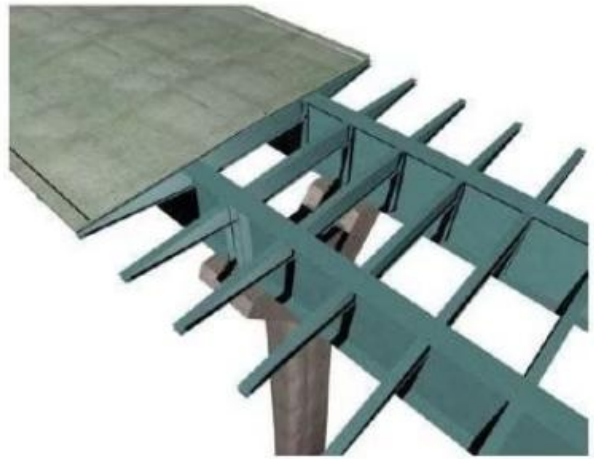
CROSS SECTION NEAR THE SUPPORTS



PILE



CROSS SECTION AT THE SUPPORTS



METALLIC STEEL DECK

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Sensore: dispositivo che rileva una grandezza fisica o chimica (temperatura, pressione, deformazione, accelerazione, umidità, ecc.) e la converte in un segnale elettrico/ottico/digitale, utilizzabile per misurazione, monitoraggio o controllo.
Il segnale generato può essere elaborato, visualizzato o trasmesso per ulteriori analisi o azioni automatizzate.

Estensimetri (Strain gauges): misurazioni di deformazioni

LVDT (Linear Variable Differential Transformer): misurazioni di spostamento o posizione lineare su distanze brevi

Accelerometri: misurazioni di accelerazioni (indirette: velocità, spostamenti)

Inclinometri: misurazioni di rotazioni

Sensori di temperatura: misurazioni di temperatura

Sensori acustici: Rilevano microfratture o cedimenti interni

Sensori di corrosione: Monitorano lo stato delle armature interne.

…

Strain gauge

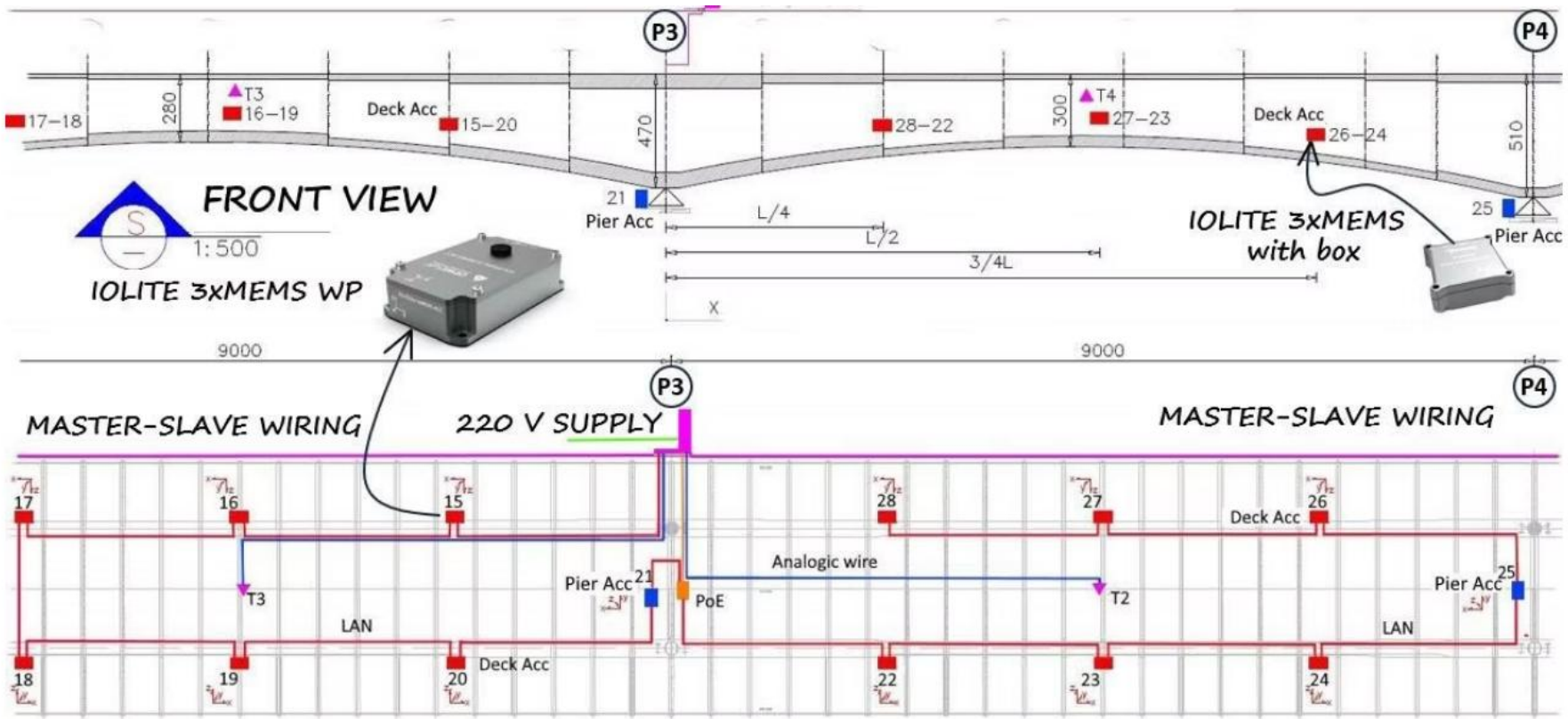
Accelerometro

LVDT

Sensore temperatura

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

INSTALLAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO



85 Accelerometri triassiali IOLITE 3xMEMS distribuiti

- 2 accelerometri a terra per misurare il moto sismico di ingresso e la PGA;
- 11 sensori posizionati centralmente sulla sommità di ciascun pila;
- 72 accelerometri (12x6) collocati sull'anima delle due travi in acciaio del ponte composito
- 12 sensori di temperatura su ogni campata

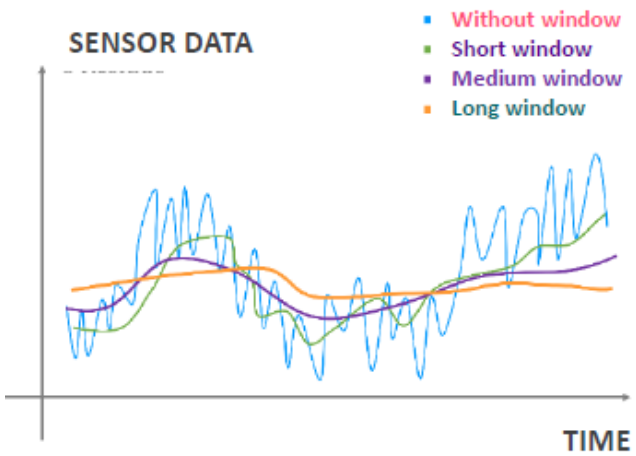
Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Misurazione delle storie temporali della risposta mediante i sensori posizionati sulla struttura.

In questa fase sono necessarie operazioni di:

- Pulizia e normalizzazione dati
- Eliminazione rumore



Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Necessità di ottenere **informazioni compatte rappresentative** del comportamento strutturale dalle misurazioni effettuate

Denominate **caratteristiche** (*features*)

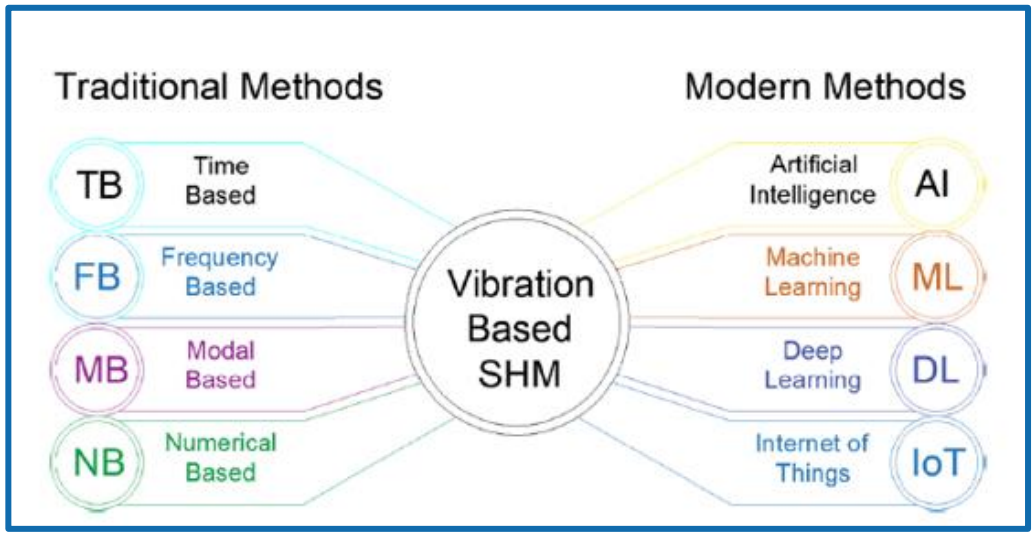
COSA PRENDERE:
Storie temporali? No, troppo lunghe!
(1 ora campionata ogni 0,01 s contiene $3{,}6\times10^5$ punti)

Grandezze direttamente misurate? Accelerazioni, deformazioni, rotazioni….
Grandezze derivate? Spostamenti, frequenze…

Le **caratteristiche** devono essere **sensibili** ai **danni**

Un **metodo standard** per ottenere caratteristiche idonee consiste nell'assumere un modello dinamico del sistema e identificare i parametri dinamici che lo definiscono a partire dalla risposta misurata
I parametri identificati permettono di costruire un modello rappresentativo della struttura:
Il modello costruito utilizzando le caratteristiche estratte dalla risposta del sistema in condizioni integre o iniziali è detto modello di riferimento (**reference model**).

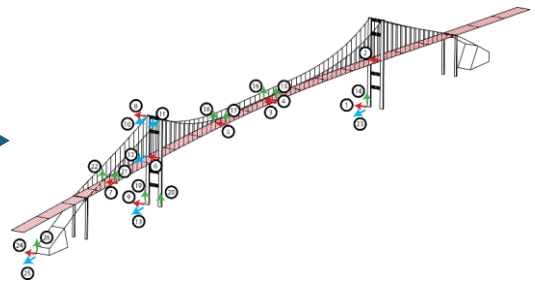
Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni



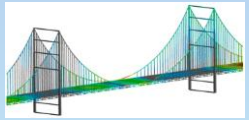
- **Model-based approaches:** metodi basati su un modello (fisico o numerico) della struttura
- **Data-based approaches:** metodi che modellano le caratteristiche come variabili aleatorie e definiscono il modello di riferimento stimando la distribuzione di probabilità delle caratteristiche

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Gli input applicati alla struttura sono ignoti o solo parzialmente noti



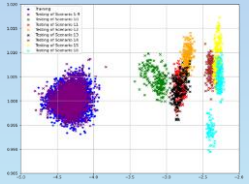
Mathematical-Physics-Based Models



$[M], [C], [K]$
$[A], [B], [C], [D]$
$\omega, \zeta, [\phi]$

- Modello utilizzabile per previsioni future
- Problema di ottimizzazione iterativo
- Calcoli intensivi (non adatto per una valutazione rapida del danno)
- Non richiede una grande quantità di dati
- Necessaria competenza nella modellazione

Data-Based Models



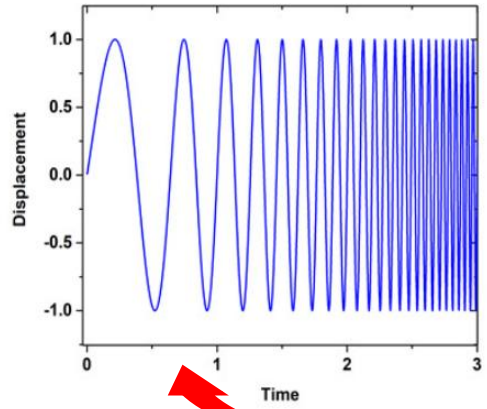
μ, σ

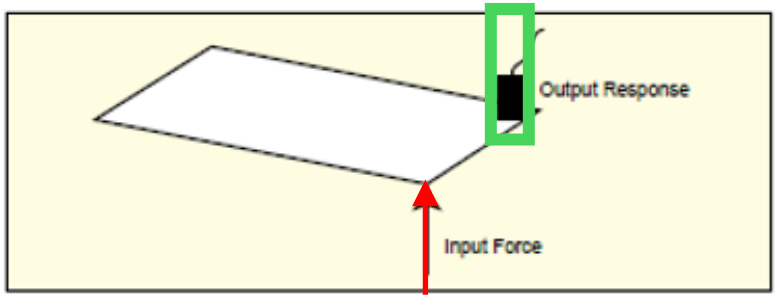
Statistical Pattern Recognition

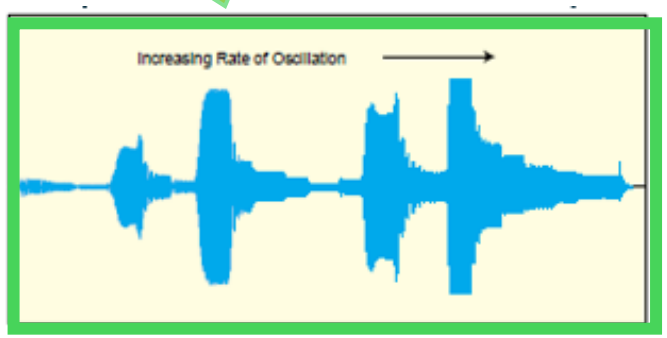
- Si basa solo sui dati
- Necessaria una grande quantità di dati per l'addestramento
- Adatto per una valutazione rapida del danno
- Non è richiesta competenza nella modellazione
- Ideale per l'apprendimento automatico (Machine Learning)

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

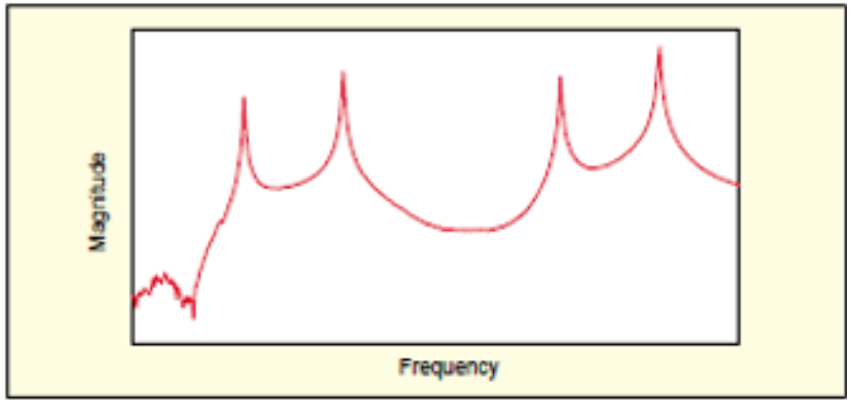
Piastra con un attuatore che applica una forza sinusoidale ad ampiezza costante e frequenza crescente



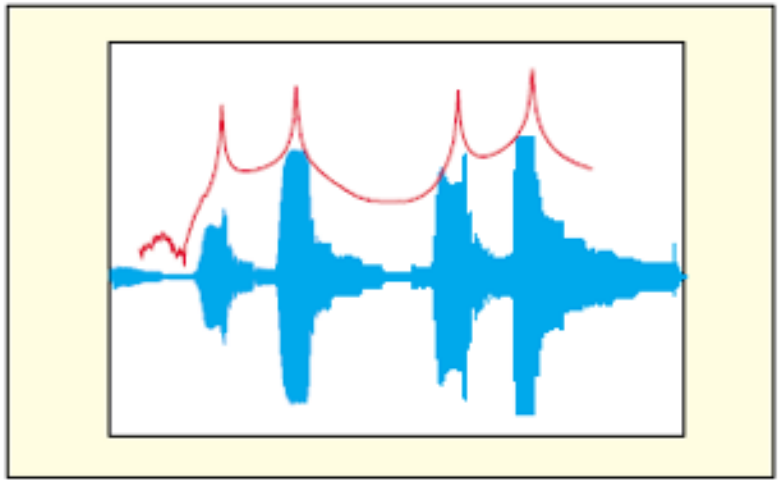




Risposta nel dominio del tempo



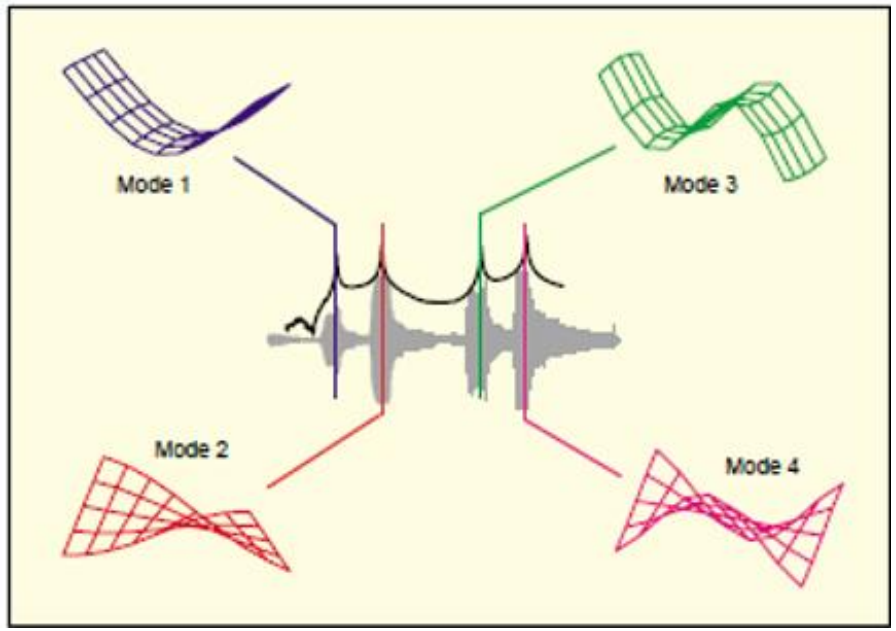
Risposta nel dominio della frequenza



Fonte: Vibration-based Structural Health Monitoring and Damage Assessment for Civil and Mechanical Systems, Prof. Betti, Columbia University.

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

First bending mode



Second bending mode

First torsional mode

Second torsional mode

Fonte: Vibration-based Structural Health Monitoring and Damage Assessment for Civil and Mechanical Systems, Prof. R.Betti, Columbia University.

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

Conoscenza delle caratteristiche del modello di riferimento (integro)

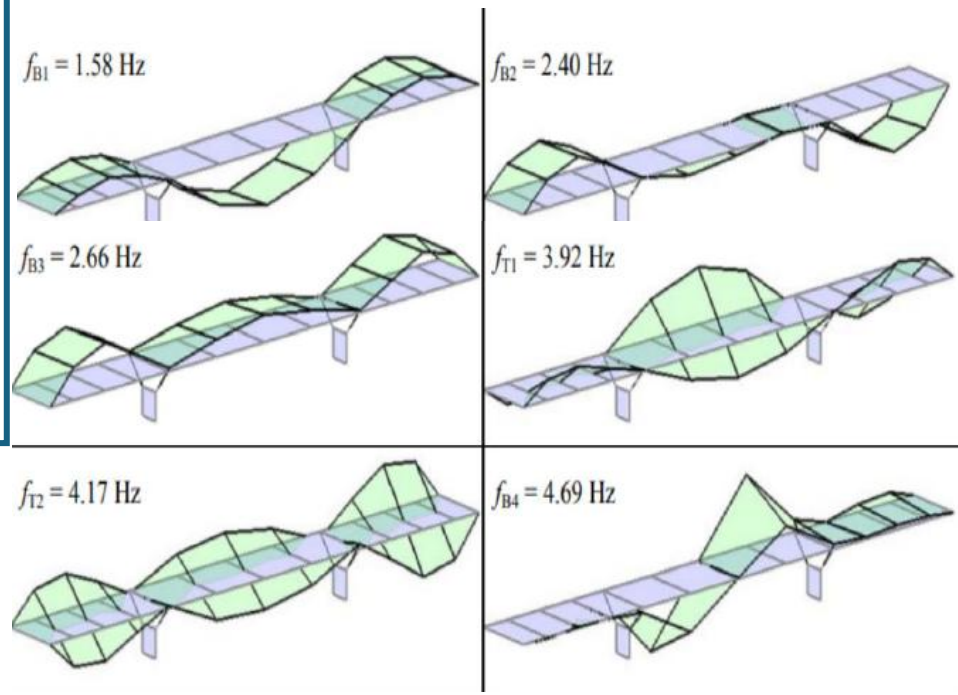
Determinazione di:
- Frequenze proprie di vibrazione
- Modi di vibrazione

$$\omega_i, \zeta_i, [\phi_i]$$

Conoscenza delle caratteristiche della struttura allo stato attuale

Determinazione di:
- Frequenze proprie di vibrazione
- Modi di vibrazione

$$\omega_a, \zeta_a, [\phi_a]$$



Confronto

Sono uguali a quelle del modello di riferimento?

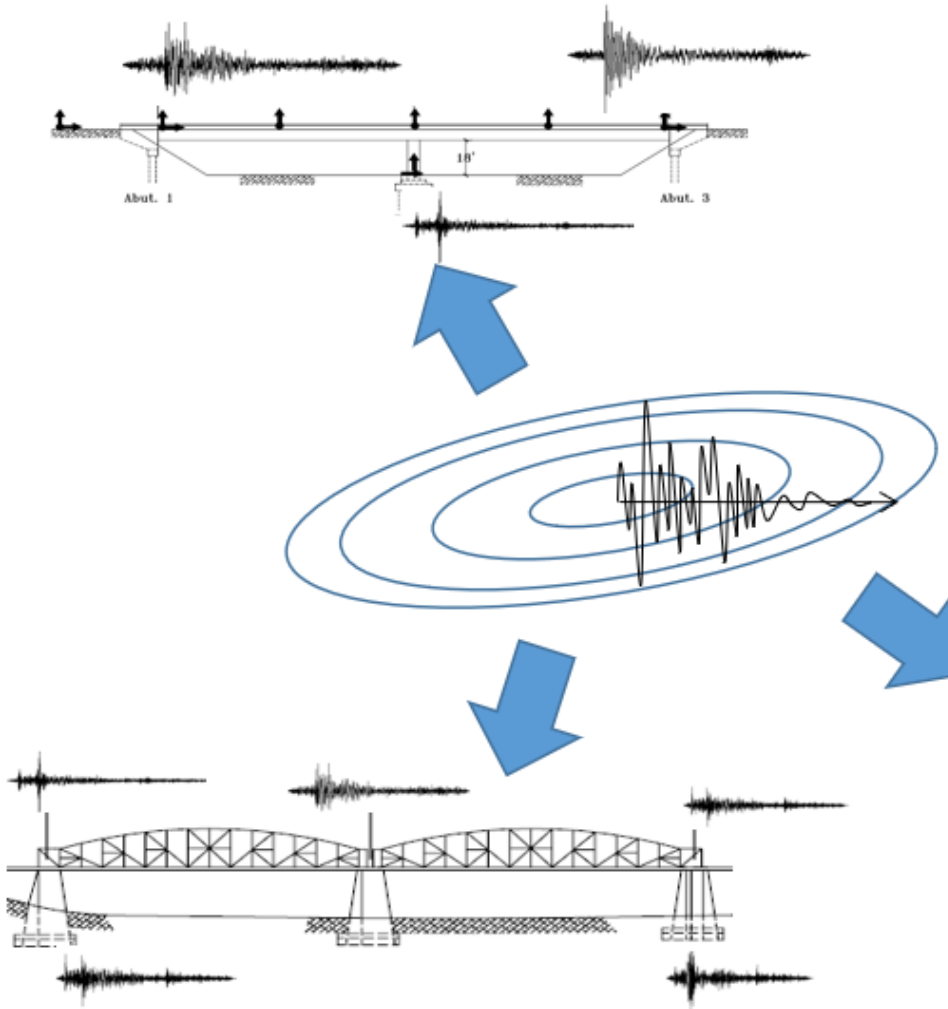
Sono cambiate?
Di quanto e in che modo?

Infrastruttura in salute
Può continuare la sua condizione di esercizio, programmazione successivo monitoraggio

Infrastruttura danneggiata
Intervenire in modo tempestivo: ispezioni in campo/ridurre condizioni di operatività/ chiusura esercizio dell'opera

Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

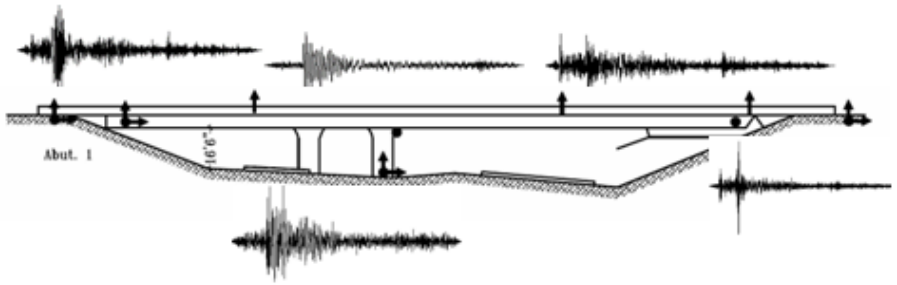
…Possibili utilizzi del SHM dopo un evento sismico
Infrastruttura su rete stradale



Sulle infrastrutture monitorate si posso rapidamente ottenere informazioni su:

1. Quale ponte è stato danneggiato
2. Se è stato danneggiato quanto è il livello di danneggiamento

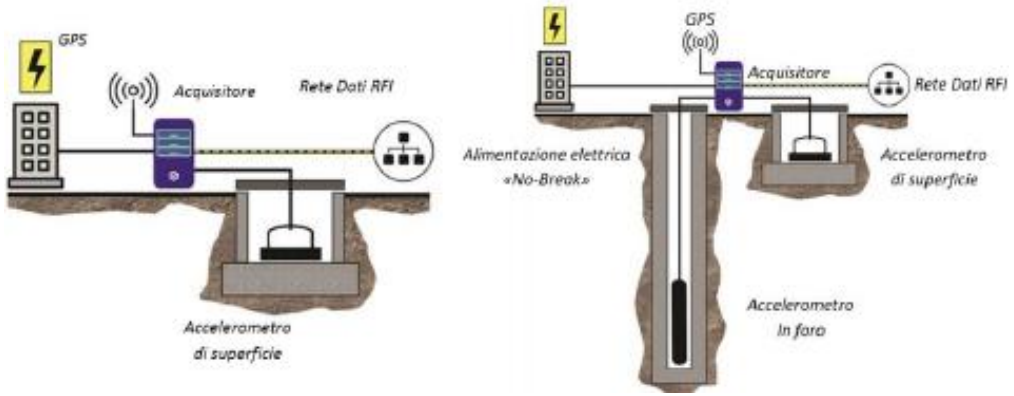
Questo permette di classificare quale ponte è sicuro per condizioni di esercizio, quale può essere utilizzato per condizioni di emergenza…



Monitoraggio strutturale basato su misure di vibrazioni

…Possibili utilizzi del SHM dopo un evento sismico
Infrastruttura su rete ferroviaria

Per il miglioramento della mitigazione del rischio sismico ➡ Implementazione e test di sistema di **Early Warning** sulla linea ad alta velocità



Previste stazioni di misura dotate di *accelerometro triassiale* installato in un pozzetto a 1m sotto il livello del suolo e, in alcuni casi, anche di un accelerometro triassiale aggiuntivo installato in foro a 20m sotto il livello del suolo.

PRINCIPIO DI FUZIONAMENTO

Stazioni accelerometriche istallate lungo la linea

Stima dell'entità del sisma a partire dal segnale registrato a partire dai primi secondi nella stazione più prossima all'epicentro

Avvio in alcuni secondi di meccanismo di frenatura di emergenza per ridurre la velocità di marcia del treno

Fonte RFI

Digitalizzazione: Piattaforma di Bridge Management System

ARGO -Piattaforma di Bridge Management System (BMS)

Inventario digitale

Gestione del **patrimonio informativo** degli asset della rete (ponti, gallerie, ..)

Processo di ispezione

Digitalizzazione del **processo di ispezione** attraverso l'utilizzo di un'app mobile sviluppata ad hoc

Monitoraggio and IoT

Rilevamento automatico dei dati da **sensori** basati sul **paradigma IoT**

Digital Twin

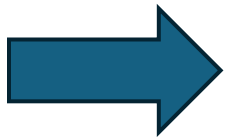
Utilizzo di Lidar, droni e fotogrammetria per ottenere un **gemello digitale dell'asset**

Fonte ASPI

Settori di sviluppo possibili per la filiera

Possibili campi/settori di sviluppo per le imprese nella filiera:

- Ispezione diagnostica e manutenzione avanzata
- Monitoraggio strutturale SHM, sensoristica e relativa tecnologia
- Piattaforme software per data collecting e analysis
- Algoritmi di AI per valutazione del danno da misurazioni di sensori
- Algoritmi di AI a supporto dell'ispezione e definizione delle schede difettosità



campi di studio, ricerca e sviluppo in continua evoluzione

Grazie per l'attenzione

michela.basili@unimercatorum.it