

# Sulla efficacia del monitoraggio del comportamento dinamico dei ponti

---

*Settimo Martinello – Direttore Generale della 4 EMME Service Spa*

*Gennaio 2020*

## **Introduzione**

In seguito ai recenti eventi che hanno portato al collasso di alcuni ponti, si è presa in considerazione l'idea di progettare un monitoraggio strumentale che produca un allarme automatico atto a prevenire effetti catastrofici.

Da parte di alcuni Enti gestori, è stata avanzata la proposta di impiegare la caratterizzazione dinamica sperimentale, solitamente impiegata nell'ambito diagnostico, come strumento di monitoraggio. La proposta prevede di effettuare delle misure correlabili con le condizioni statiche, attraverso il monitoraggio del comportamento dinamico del ponte sotto il profilo delle frequenze proprie e delle forme modali. La logica è quella di porre sulle strutture, tipicamente sulle travi principali, una rete di sensori che misurino le accelerazioni e che, collegati con un sistema di acquisizione in remoto, restituiscano in tempo reale dei valori rappresentativi del comportamento dell'opera. Si vorrebbe che nel software, che effettua l'analisi e l'elaborazione dei dati, fossero implementati metodi automatici, in grado di eseguire l'identificazione dinamica delle proprietà della struttura e di valutarne il cambiamento nel tempo. Una volta identificate le caratteristiche modali dell'opera, si vorrebbe procedere al monitoraggio dei dati in tempo reale per confrontarli con le condizioni di riferimento e, qualora ci fossero degli spostamenti significativi, procedere ad una specifica verifica ispettiva.


La presente memoria vuole analizzare e discutere l'efficacia di tale proposta, attraverso la valutazione numerica delle variazioni dei parametri modali come conseguenza dell'avanzamento di potenziali fenomeni di degrado.

A questo scopo, prenderemo in esame il controllo del comportamento di due casi semplici, valutando la variabilità delle loro caratteristiche dinamiche: un singolo tirante, elemento strutturale fondamentale per la statica di un ponte, e un ponte con struttura a travi in calcestruzzo armato.

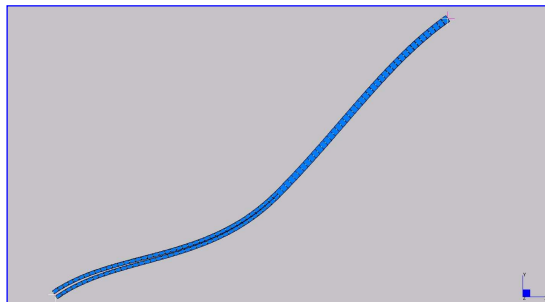
### Studio di un tirante

Il tirante è costituito da una serie di cavi in acciaio armonico protetti da un rivestimento in calcestruzzo. Il tirante, a partire dalla metà della sua lunghezza, si divide in due parti che vanno ad ancorarsi su una trave trasversale di sostegno dell'impalcato. Le guaine in calcestruzzo sono poste in compressione attraverso cavi d'acciaio.

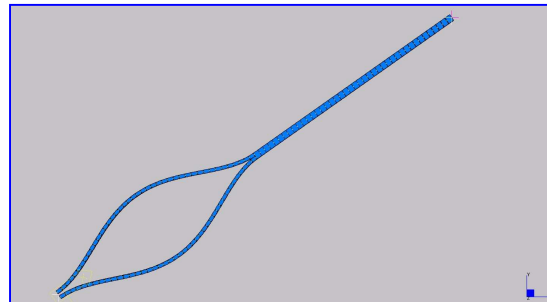
Le caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali sono così identificate:

Lunghezza tirante $L$	84,7 m	
Altezza sezione $h$	122 cm	
Larghezza sezione $b$	98 cm	
Area cavi $A_{cavi}$	587 cm <sup>2</sup>	
Area calcestruzzo $A_{cls}$	11.369 cm <sup>2</sup>	
Peso unitario $P_l$	296 N/cm	
Momento di Inerzia $J$	14.829.425 cm <sup>4</sup>	
Modulo elastico $E$	38.000 N/mm <sup>2</sup>	
Precompressione $S$	2.000 kN	

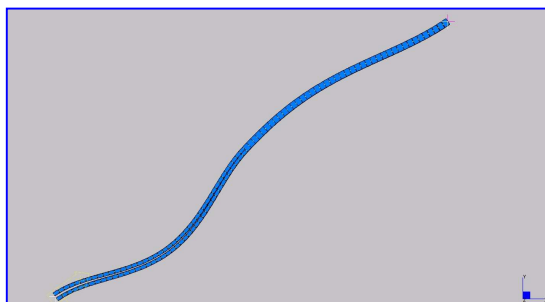
Elaborando questi parametri attraverso un modello agli elementi finiti si ottengono le forme modali riportate a seguito.



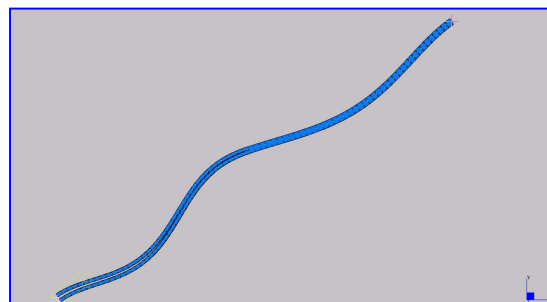
I Modo  $f_1 = 0,47$  Hz



II Modo  $f_2 = 1,36$  Hz



III Modo  $f_3 = 1,38$  Hz



IV Modo  $f_4 = 2,46$  Hz

Se ora ipotizziamo che la precompressione si riduca del 50%,  $S = 1000$  kN, le frequenze libere cambiano come riportato nella successiva tabella.

Modo	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)	$f_4$ (Hz)
$S = 2.000$ kN	0,47	1,36	1,38	2,46
$S = 1.000$ kN	0,45	1,33	1,35	2,43

La piccola variazione del valore delle frequenze, dovuta all'ipotesi di dimezzamento dello stato pretensionale dei cavi, è comprensibile osservando la formula che permette di calcolare le frequenze libere per le travi a sezione costante [1]:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{g \frac{S + K^2 n^2 \pi^2 EJ / L^2}{P_t}}$$

dove  $n$  rappresenta la numerazione delle frequenze modali e  $K$  la costante di vincolo che nel caso dell'incastro è pari a:

Modi	I	II	III	IV
$K$	2,27	1,56	1,36	1,26

Se infatti sostituiamo, sotto la radice, i valori geometrici e meccanici del tirante in oggetto, osserviamo che la seconda parte è 20 volte più grande di  $S$  (tiro di precompressione), ad indicare il suo piccolissimo contributo sul formarsi delle frequenze.

### Studio di un impalcato in calcestruzzo

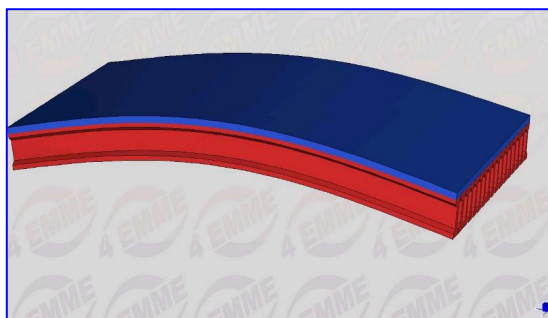
Prendiamo in esame un impalcato classico, costituito da una struttura a travi in calcestruzzo normalmente armato.

L'impalcato ha le seguenti caratteristiche:

Impalcato	travi c.a.p.
Luce campata	21,0 m
Larghezza impalcato	8,7 m
Larghezza <b>carreggiata</b>	6,4 m
Numero Travi	17
Nr. corsie	2



Elaborando questi parametri attraverso un modello agli elementi finiti si ottengono le frequenze e forme modali riportate a seguito.



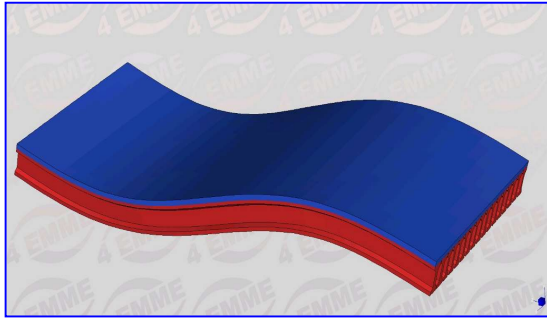
I Modo  $f_1 = 5,72 \text{ Hz}$



II Modo  $f_2 = 6,43 \text{ Hz}$

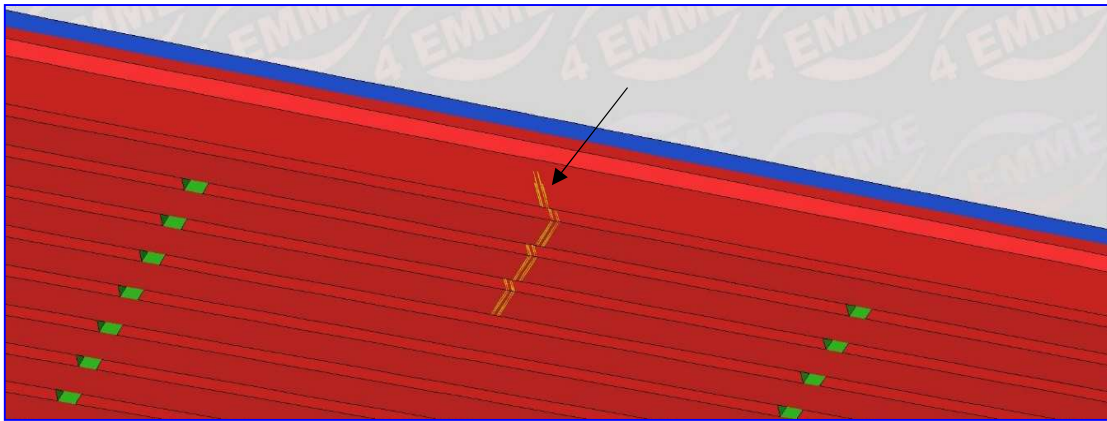


III Modo  $f_3 = 21,48 \text{ Hz}$



IV Modo  $f_4 = 21,68 \text{ Hz}$

Immaginiamo una condizione di grave dissesto che metta a repentaglio la sicurezza dell'opera. Si ipotizza una fessurazione posta nella mezzeria di tre travi di bordo e che raggiunga il 50% dell'intera sezione.

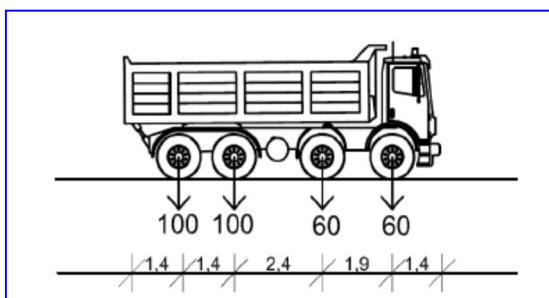


Configurazione con tre travi fessurate per una altezza pari al 50% della sezione

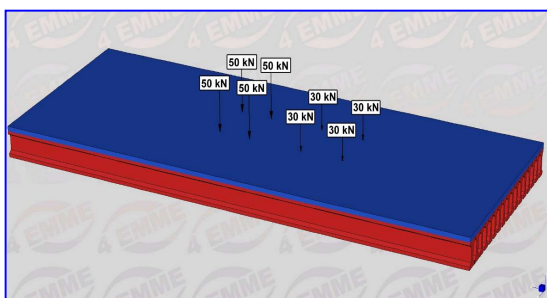
Le frequenze libere cambiano come riportato nella successiva tabella.

Modo	$f_1 \text{ (Hz)}$	$f_2 \text{ (Hz)}$	$f_3 \text{ (Hz)}$	$f_3 \text{ (Hz)}$
Struttura integra	5,72	6,43	21,48	21,68
3 travi fessurate	5,69	6,40	21,44	21,64

Per meglio comprendere la portata di queste variazioni di frequenza, proviamo a calcolare le frequenze nel caso in cui sul ponte transiti un autocarro da 320 kN considerando solo l'effetto statico della massa e non quello dinamico del sito.



Autocarro previsto dal Codice della Strada



Applicazione delle masse sul modello

Le frequenze cambiano come riportato nella successiva tabella, dalla quale si evince che la variazione di frequenza dovuta ad un mezzo in transito è maggiore di quella legata ad un danneggiamento grave, ancorché parziale.

Modo	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)	f3 (Hz)
Struttura pura	5,72	6,43	21,48	21,68
Struttura + autocarro	5,25	6,31	20,94	21,12

### Considerazioni tecniche e discussione

Va innanzitutto evidenziato che, per quanto riguarda i ponti in calcestruzzo, i principali fenomeni di degrado che possono potenzialmente determinare una riduzione della capacità portante, in ordine di importanza sono <sup>[2]</sup>:

- la corrosione delle armature con riduzione della sezione resistente e riduzione dell'aderenza ferro-calcestruzzo;
- la riduzione dello stato tensionale dei cavi di pre o post compressione;
- l'abbassamento di una pila in conseguenza alla perdita di portanza dei pali di sottofondazione.

Di seguito si riportano delle immagini significative relative alla corrosione delle armature in un caso ed al cedimento di una pila nell'altro.



Se analizziamo i risultati dei calcoli effettuati sui modelli presentati, ci accorgiamo che le variazioni delle frequenze libere sono irrilevanti, anche a fronte di fenomeni di degrado molto evidenti.

Prendiamo il caso del tirante.

La frequenza del I modo, a struttura integra, è pari a 0,47 Hz. Abbiamo visto che ipotizzando una riduzione dello stato tensionale dei cavi di precompressione, addirittura del 50%, la frequenza varia solo di 0,02 Hz.

Inoltre, dobbiamo considerare la difficoltà del misurare e interpretare questa variazione di frequenza. E' necessario infatti depurare il dato della misura dovuta alla corrosione dei cavi e alla diminuzione dell'aderenza, da quella dovuta al passaggio del traffico. Infatti, eventuali strumenti accelerometrici posizionati sul tirante, misurerebbero, oltre alle vibrazioni del tirante stesso, anche le vibrazioni dei due punti di vincolo sull'impalcato e sulla punta della torre. Punti che col semplice passaggio del traffico si muovono uno in senso verticale e l'altro in senso orizzontale.

Si può quindi comprendere che depurare le accelerazioni dei sensori posti sui tiranti dagli effetti del vincolo è un'impresa ardua, per non dire impossibile, considerando che la discriminante è pari a 0,02 Hz.

Prendiamo ora il caso dell'impalcato in calcestruzzo a struttura a travi.

E' altrettanto emblematico, in quanto la riduzione significativa della capacità portante di 3 travi produce una riduzione della frequenza del I modo di soli 0,03 Hz. Valore che è difficile distinguere dal semplice passaggio di un autocarro che provoca una differenza, sulla prima forma modale, di ben 0,47 Hz.

### **Conclusioni e suggerimenti**

Partendo dal presupposto che la caratterizzazione dinamica sperimentale sia efficace per la calibrazione dei modelli numerici e pertanto non sia messo in discussione il suo valore dal punto di vista diagnostico, in questo articolo si è discussa la sua efficacia quale sistema di controllo delle condizioni di "sicurezza" dell'opera o di "allarme" di una situazione di degrado da considerarsi preoccupante.

**In conclusione, attraverso le elaborazioni riportate, si è dimostrato scientificamente che i parametri dinamici non possano rappresentare una valida indicazione dello stato di degrado.**

Questo fatto non deve però scoraggiarci. Ci sono altri parametri, per altro più semplici da rilevare, che possono fornirci un sistema di controllo nel tempo.

Questi parametri sono quelli deformativi.

Cosa succede ad una trave la cui armatura, per effetto della corrosione, vede ridurre il suo contributo di resistenza a trazione? Succede che progressivamente aumenta la deformazione della zona tesa di calcestruzzo all'estradosso, progressivamente alla riduzione di aderenza.

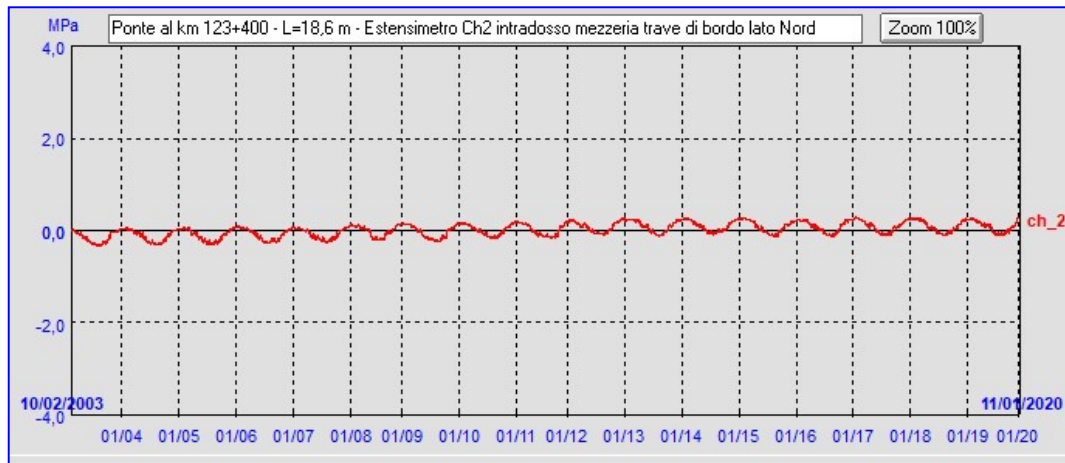
Questa osservazione ci induce a monitorare le deformazioni di intradosso nelle sezioni più significative a mezzo di estensimetri, strumenti più semplici e di cui ne esistono varie tipologie in funzione delle richieste prestazionali di precisione e di durabilità.

Misurare la deformazione relativa, ad esempio in mezzera di una trave, è estremamente più semplice che misurare una vibrazione. Tale dato, inoltre, non deve essere interpretato né tantomeno confrontato con dei parametri di riferimento. L'incremento della deformazione relativa è direttamente correlato con l'incremento dello stato tensionale, più semplice da interpretare, in quanto rappresentata da una curva nel dominio dei tempi, ed ha il vantaggio di manifestarsi fin dai primi sintomi del degrado, seguendolo fedelmente nel suo inesorabile procedere.

Infine, se per le accelerazioni, ipotizzando uno scansionamento di almeno 100 Hz (100 dati al secondo), dobbiamo accumulare 360.000 dati per ora, per la deformazione relativa è più che sufficiente 1 dato all'ora.

Di seguito si riporta un esempio di rappresentazione grafica del monitoraggio estensimetrico di un ponte a travi precomprese. Il sensore è posto nella mezzera all'intradosso della trave di bordo. Il segnale è rilevato da un acquisitore wireless a batteria, durata 1 anno, memorizzando 1 valore ogni ora con soglia di allarme posta a +2 MPa.

La lettura dell'andamento dello stato tensionale è semplice e mostra, nel corso dei 17 anni di monitoraggio, un leggero incremento del valore relativo rispetto allo "zero" imposto all'inizio del monitoraggio.



Si può concludere, che il monitoraggio delle opere d'arte è utile e possibile, purché i parametri di controllo siano facilmente interpretabili e non legati ad elaborazioni matematiche difficilmente comprensibili.

Si ribadisce infine l'importanza dell'ispezione visiva. Infatti, qualunque fenomeno di degrado mostra le sue evidenze ben prima che il fenomeno incida irreparabilmente sulla capacità portante. È quindi questa la principale strada da seguire, impiegando metodologie ispettive che rappresentino una "misura" dello stato di degrado attraverso una procedura oggettiva che non consenta interpretazioni arbitrarie [3].

Gli strumenti tecnologici di monitoraggio rappresentano un utilissimo ausilio, ma non possono sostituirsi all'opera di sorveglianza che è principalmente fatta, in campo, dall'uomo.

### **Bibliografia**

- [1] Thomson W.T. *Vibrazioni meccaniche – teoria ed applicazioni* J. Wiley & Sons 1989
- [2] *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti* – Edizione Cias 2018
- [3] *Criteri di priorità e programma di manutenzioni autostradali* – Linee Guida del Ministero delle Infrastrutture e del Trasporto, 15.10.2019