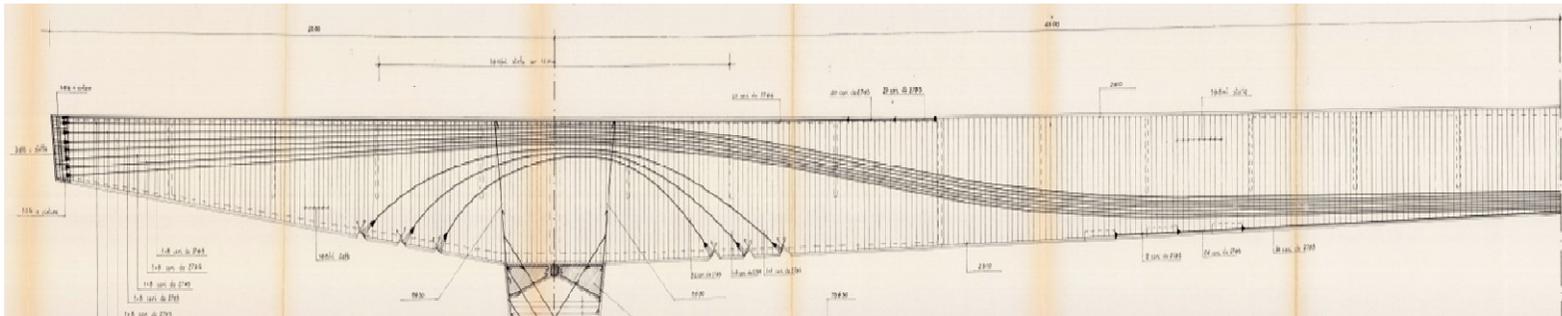


# LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI

## L'applicazione delle linee guida: il caso studio del ponte di Riccardo Morandi a Benevento



**Prof. Ing. Marisa Pecce**

Direttore del Dipartimento di Ingegneria

Università del Sannio

## Riccardo Morandi è stato uno dei più grandi progettisti di strutture del secolo scorso



General Rafael  
Urdaneta Bridge,  
Maracaibo –  
Venezuela  
(1958-1962)



Amerigo  
Vespucci Bridge,  
Florence (1955-  
1957)



San Nicola  
Bridge,  
Benevento  
(1955)

Ha progettato decine di ponti in tutto il mondo utilizzando diversi schemi statici e dando forma alla tecnologia del precompresso quando era innovativa



Bisantis Bridge,  
Catanzaro (1959-  
1962)



Paul Sauer  
Bridge, Cape  
Town (1953-  
1956)



Wadi al-Kuf,  
Beida-Libia  
(1967-1971)



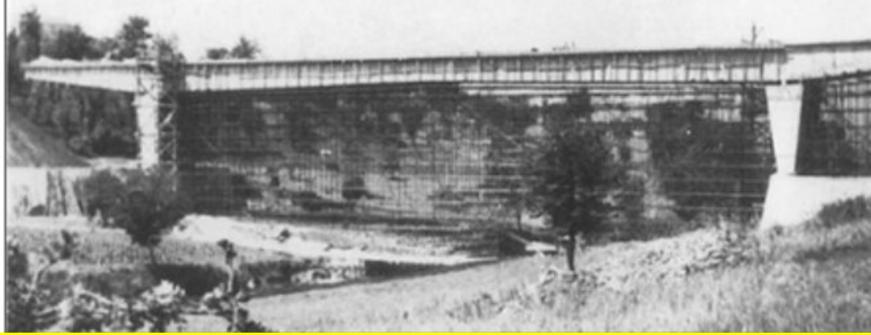
Pumarejo Bridge,  
Barranquilla,  
Colombia

### Ma non bisogna dimenticare che il suo contributo riguarda anche:

- la realizzazione di un proprio sistema di precompressione, ideato e sviluppato secondo criteri personali nell'intento di ottenere i migliori risultati nelle singole situazioni progettuali;
- lo sviluppo delle tecniche di trattamento dei getti e della prefabbricazione;
- lo studio dei diversi procedimenti di costruzione e delle corrispondenti attrezzature e tecnologie.

## Caso studio di ponte a telaio

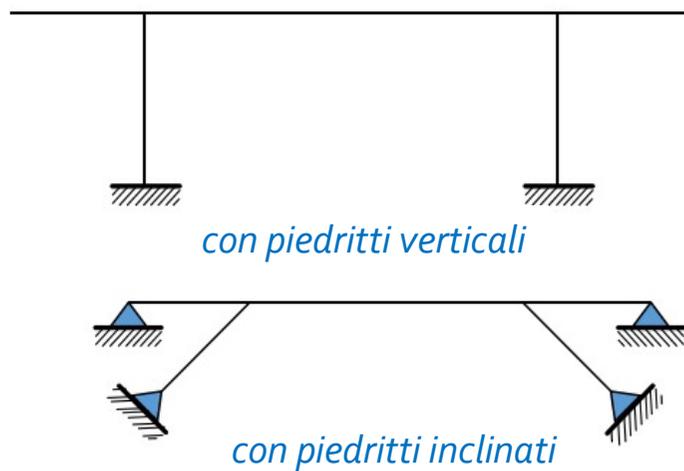
Ponte San Nicola a Benevento



Progettato nel 1952-1955

Costruito nel 1955-1958

### Ponti a telaio



### Vantaggi

- Maggiore sfruttamento dei materiali
- Maggiore capacità in campo plastico
- Limitazione dei giunti solo all'estremità

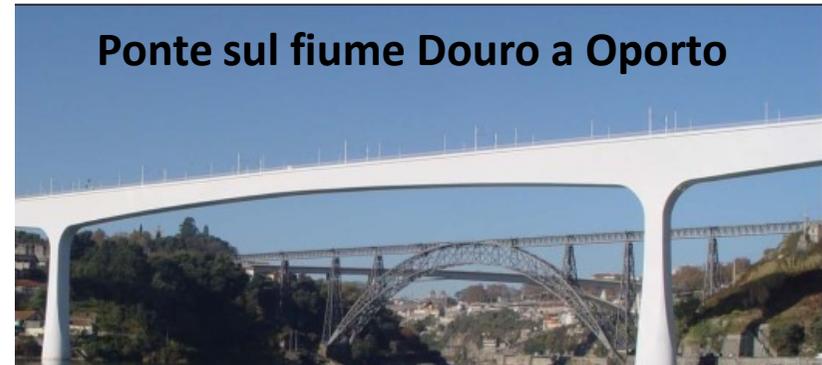
### Svantaggi

- Sollecitazioni per effetto delle distorsioni:
  - ritiro
  - viscosità
  - temperatura
- Complessità di modellazione

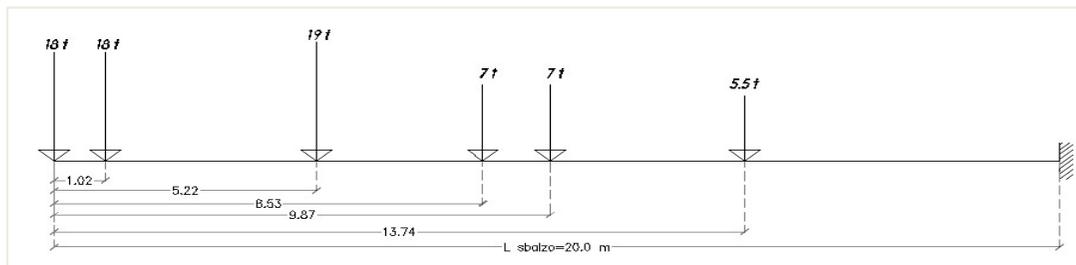
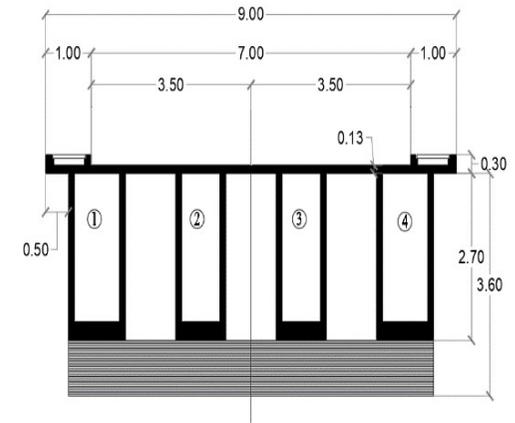
Viadotto a Tia di cadore sul fiume Piave, Belluno



Ponte sul fiume Douro a Oporto



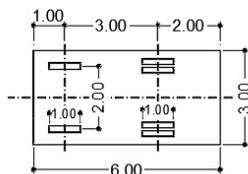
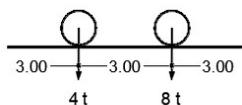
**Linee Guida :**  
**Par.5. Livello 3: Valutazione preliminare dell'opera**



Carico militare sullo sbalzo

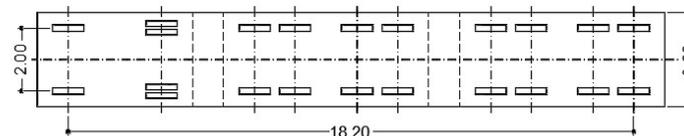
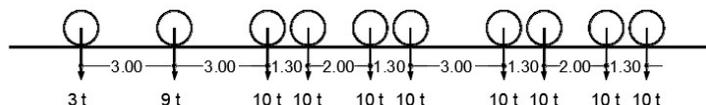
Schema 1°

Colonna indefinita di autocarri del peso di 12 tonn



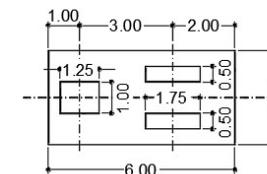
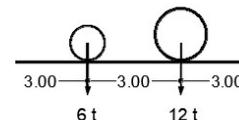
Schema 2°

Traino con veicoli del peso massimo di 40 tonn



Schema 3°

Rullo compressore da 18 tonn

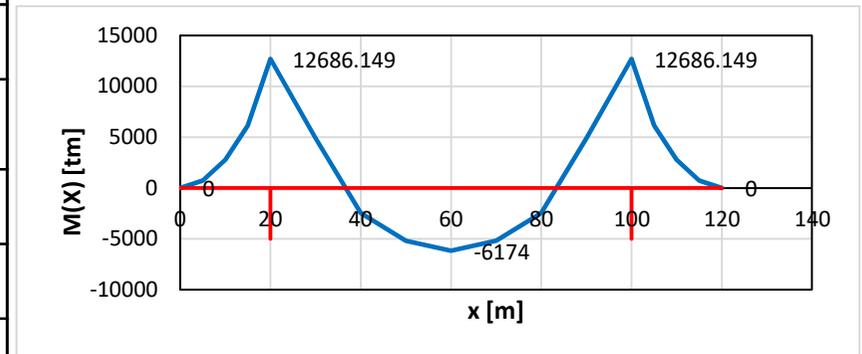


Norma n. 8 del 1933

## Linee Guida :Par.5. Livello 3: Valutazione preliminare dell'opera

Assumendo, salvo evidenti indicazioni contrarie che evidenzino macroscopici errori progettuali, che il progetto del ponte sia stato redatto in conformità alle indicazioni normative vigenti all'epoca della sua realizzazione e ottimizzato per far fronte ai corrispondenti carichi da traffico, ciò può essere eseguito valutando **il rapporto tra la domanda indotta sui vari elementi che compongono il ponte** (solette, traversi, travi e/o strutture principali, pile, spalle, apparecchi di vincolo e fondazioni) **dai carichi da traffico previsti dalle norme dell'epoca** (intesa quindi in questa valutazione come minima capacità garantita dalla norma di progettazione originaria) **e la domanda ottenuta utilizzando i modelli di traffico previsti dalle norme attualmente vigenti.**

Confronto dei momenti flettenti				
	Modello NTC2018		Valori di progetto	
	$M_{max}^+$ [tm]	$M_{max}^-$ [tm]	$M_{max}^+$ [tm]	$M_{max}^-$ [tm]
$G_{k1}$	8034	-3486	7566	-3110
Zavorra	-4795		-4786	
$G_{k2}$	769	-1351	1080	-270
$G_{k1}+G_{k2}+zavorra$	4008	-9632	3590	-8167
$Q_k$	2672	-4060	2584	-4520
$G_{k1}+G_{k2}+zavorra+ Q_k$	<b>6680</b>	<b>-13692</b>	<b>6174</b>	<b>-12687</b>



**Sollecitazioni NTC2018 : 7-8% in più rispetto alla normativa dell'epoca del progetto**



**E' importante passare alla verifica accurata della sicurezza e valutare bene i fattori che possono incidere sulle verifiche anche del 5-10%**

### 6.1.2 IL RUOLO FONDAMENTALE DELLA CONOSCENZA

Le informazioni sui dettagli costruttivi e sulle proprietà dei materiali si possono ricavare **dall'esecuzione di campagne conoscitive successive**, di volta in volta caratterizzate da maggior dettaglio, pianificate sulla base delle indicazioni ricavate da una valutazione preliminare di sicurezza che permette l'individuazione delle criticità e la messa a punto dei diversi piani di indagine. L'approfondimento delle indagini sulla base dei risultati ottenuti dalle verifiche preliminari consente di incrementare e dettagliare la conoscenza in maniera organica e critica, focalizzando l'attenzione laddove necessario. L'approfondimento progressivo delle indagini garantisce l'elaborazione di modellazioni strutturali caratterizzate da crescente accuratezza e pertanto l'esecuzione di valutazioni di sicurezza più attendibili e meglio rappresentative del reale comportamento strutturale del manufatto, nonché l'impiego, opportunamente motivato, di fattori di confidenza e fattori parziali, ove possibile, via via minori. **Nel § 6.2, in particolare, sono illustrati il processo conoscitivo e le operazioni da svolgere in funzione del livello di conoscenza perseguibile.** Nel § 6.3, relativo alle modalità operative di verifica, sono proposti metodi di **calibrazione dei coefficienti parziali di sicurezza** in funzione del livello di conoscenza raggiunto e della conseguente riduzione delle incertezze.

**Obiettivo principale aumentare l'affidabilità dei dati in modo da perdere una minore parte di capacità del ponte nei fattori di sicurezza finalizzati proprio a coprire le incertezze.**

**La conoscenza non governa solo i Fattori di Confidenza ma anche i fattori parziali di sicurezza  $\gamma$  che riducono la resistenza dei materiali o amplificano i carichi**

**I fattori  $\gamma$  hanno una base probabilistica e quindi possono essere modificati assumendo altre ipotesi sulla probabilità dei fenomeni**

### 6.2.1 IL PERCORSO **ITERATIVO** DELLA CONOSCENZA

... A tal fine, la veridicità del materiale originario di progetto, se presente, può essere verificata in situ mediante saggi a campione finalizzati a valutare la rispondenza tra quanto ipotizzato in fase di progetto e quanto realizzato in fase di esecuzione...

Al contrario, nel caso in cui la rispondenza tra stato di fatto e stato di progetto sia assente o parziale, le informazioni reperite possono comunque consentire una valutazione di sicurezza preliminare basata **sull'assunzione di schemi strutturali semplificati anche al fine di indirizzare le indagini sperimentali verso le zone o elementi più critici rispetto al comportamento globale.**

Nel caso invece in cui non sia stato reperito il materiale originario di progetto, l'analisi della sicurezza statica e della vulnerabilità sismica è preceduta da una preventiva campagna conoscitiva 'diffusa' sull'intero manufatto, consistente in un numero limitato di indagini su elementi strutturali e dettagli costruttivi...

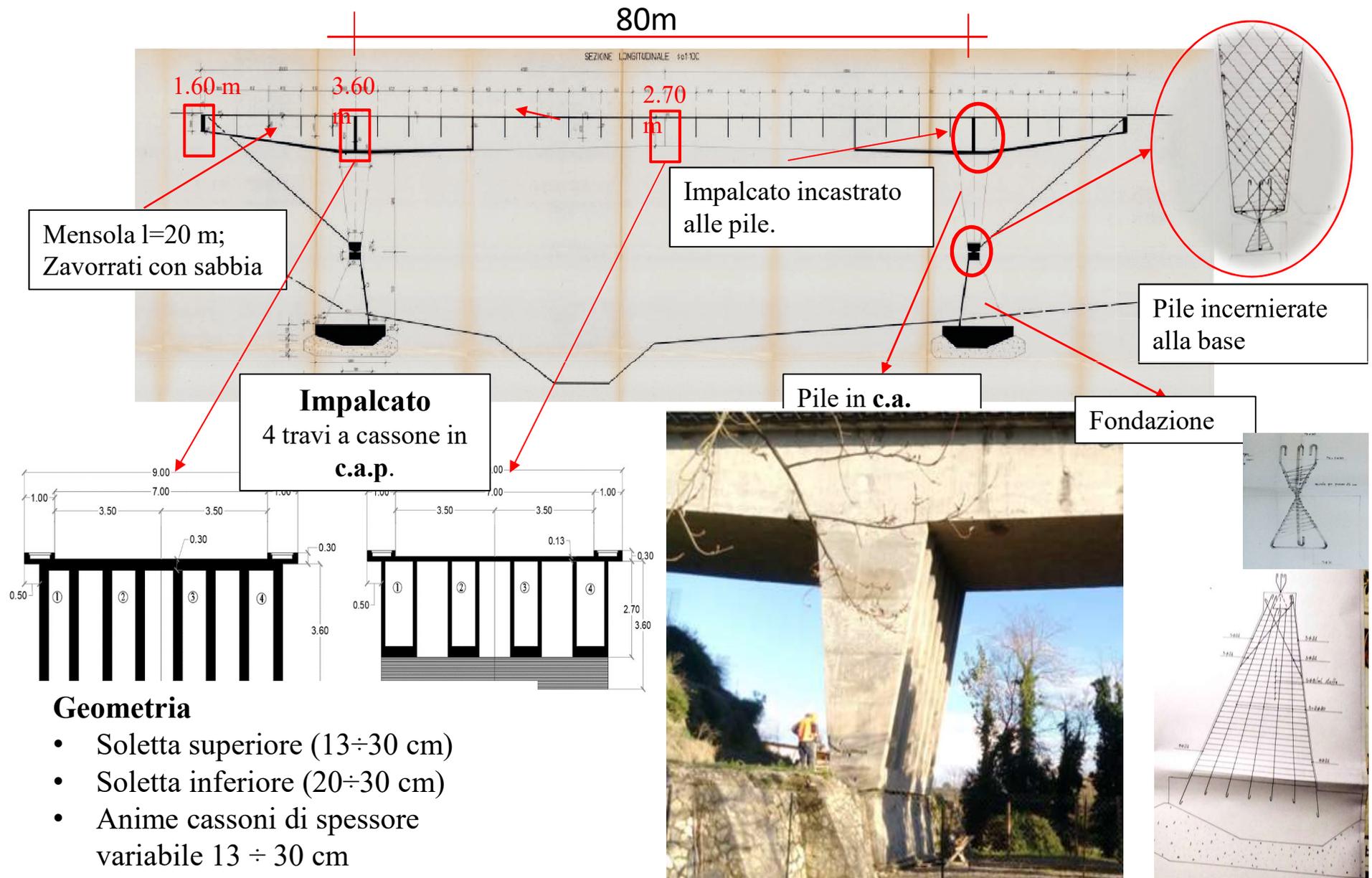
**...L'approfondimento progressivo delle indagini garantisce l'elaborazione di modellazioni strutturali caratterizzate da crescente accuratezza e pertanto l'esecuzione di valutazioni di sicurezza più attendibili** e meglio rappresentative del comportamento strutturale del manufatto, nonché **l'impiego, opportunamente motivato, di fattori di confidenza e fattori parziali via via minori.**

**Il primo gruppo di indagini generalmente non è sufficiente perchè le informazioni iniziali sono insufficienti per stabilire i punti critici o le eventuali difformità dal progetto da approfondire o l'importanza di alcuni dettagli sul modello di analisi**

# Ponte in c.a.p. realizzato negli anni '50 a Benevento: Progetto di Riccardo Morandi

## Par. 6.1.2. Il ruolo fondamentale della conoscenza

## Par. 6.2. La conoscenza del ponte: L'ANALISI DEL PROGETTO ORIGINARIO



# Sistema di precompressione del Ponte San Nicola

## Par. 6.2. La conoscenza del ponte: L'ANALISI DEL PROGETTO ORIGINARIO

252 cavi in totale, ciascuno costituito da 27 fili  $\Phi 5$  e ancorati in differenti sezioni mediante piastre



60 cavi dritti per lato da 32m

7 cavi curvi da 120 m nelle 8 anime

3 cavi curvi da 30 m  
nelle 8 anime

36 cavi dritti inferiori da 50m

Uno dei primi ponti precompressi in Italia  
audace per lunghezza e spessori sottili dei cassoni



Le fasi e modalità costruttive influenzano:  
L'attuale deformata  
La risposta statica e dinamica

## Le modalità costruttive, i dettagli e la durabilità

Realizzato in conci di circa 2m a pie d'opera con giunti di circa 15cm montati su centina in tubi innocenti e poi precompressi

nei giunti la guiana è sostituita da un lamierino piegato ma sono punti deboli per la corrosione dei cavi



**Linee Guida :Par. 7.4.3.3. Allontanamento delle acque di piattaforma**

- ✓ Cassoni ispezionabili attraverso appositi chiusini sulla strada
- ✓ Molta acqua all'interno dei cassoni
- ✓ Inefficace smaltimento delle acque interne: l'acqua cerca di uscire dalle sezioni di giunto e ripresa getti: tra i conci e in corrispondenza delle piastra di ancoraggio inferiori

## Indagini

**Le tabelle presenti nella Circolare 2019 non sono evidentemente applicabili ai ponti esistenti. Il numero complessivo e la localizzazione delle indagini sugli elementi sono quindi calibrati dal tecnico incaricato in relazione alle informazioni reperite sul manufatto ed ai risultati ottenuti dalle eventuali valutazioni preliminari della sicurezza.** Essi possono pertanto essere 'modulati' in virtù del livello di conoscenza che si vuole raggiungere e di quanto già si conosce.

**...È quindi chiarito che si possono utilizzare livelli di conoscenza differenziati, approfondendo la conoscenza delle parti della struttura per le quali la verifica risulta più delicata, senza necessariamente estendere tale livello di conoscenza all'intera struttura, comprese parti difficili e costose da analizzare e che sono in sicurezza anche perseguendo livelli meno accurati.**

### Le indagini sui cavi da precompressione

#### Par. 7.4. Le Ispezioni

##### Par. 7.4.3.1. Strutture pre-compresse a cavi post-tesi

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

E' necessario individuare il tracciato dei cavi: **nel caso del Ponte San Nicola progetto e saggi**  
Indagare testate dei cavi, e iniezione dei cavi con saggi diretti.

## Indagini sugli ancoraggi

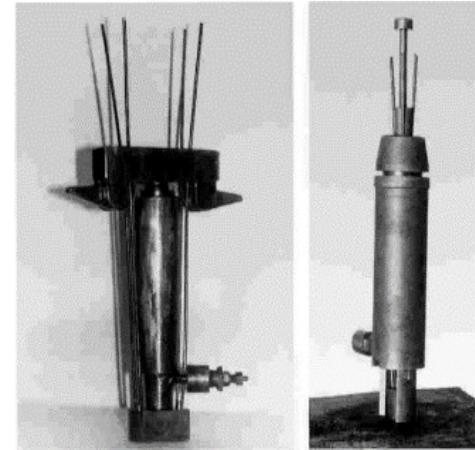
Il cavo è composto da 27 fili

Boccole che fissano 3 fili



ancoraggio di un cavo

brevetto



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

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



## Misure con il corrosimetro



Cavo	Letture (mV)
1	-115
2	-130
3	-152
4	-157
5	-296
6	-88
7	-205



Cavo	Letture (mV)
1	-205
2	-110
3	-102
4	-203
5	-137
6	-190
7	-134

Valore di Potenziale mV	Probabilità di Corrosione	Degrado
Compreso tra -400 mv e -300 mv	Alta probabilità di corrosione	Indotto dalla corrosione avanzata
Compreso tra -300 mv e -200 mv	Alta probabilità di corrosione	Stato di degrado medio
Compreso tra -200 mv e -100 mv	Media probabilità di corrosione	Livello di degrado iniziale
Compreso tra -100 mv e 0 mv	Bassa probabilità di corrosione	Livello di corrosione non significativo
Compreso tra 0 mv e 100 mv	Probabilità di corrosione molto bassa	Livello di corrosione nullo e passività delle armature

## Indagini sui cavi (21 saggi)

**Linee Guida:** I saggi devono essere condotti nelle sezioni critiche o nelle zone dove si sono manifestati difetti tipici: è una indicazione, bisogna adottare il metodo più adatto per ogni specifico caso

➤ Cavi non sempre bene iniettati soprattutto in corrispondenza delle zone curve

➤ Anche in assenza di malta i cavi non sono corrosi perchè la quantità di aria non è sufficiente per attivare il processo

➤ Corrosione soprattutto nei cavi delle anime disposti più in basso dove l'acqua è presente ciclicamente e in corrispondenza delle riprese di getto dei conci

➤ Cavi in soletta superiore non corrosi

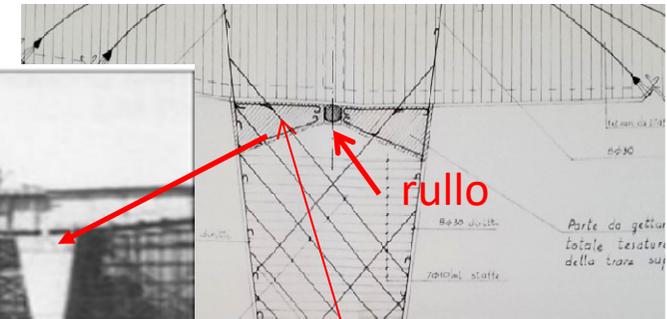
➤ Cavi in soletta inferiore non corrosi pur essendo immersi in acqua

**Distinguiamo le osservazioni dalla loro influenza sulla sicurezza. In questo caso il degrado non inficia in modo significativo la sicurezza ma può pregiudicare nel tempo**



## La tecnica di costruzione

**Mensole zavorrate con sabbia nei cassoni per ridurre il momento positivo in campata**



prove sul calcestruzzo  
In questa zona

Conci prefabbricati a terra (2 m di lunghezza ciascuno) con predisposizione delle guaine  
Montati su tubi innocenti e poi precompressi

### **2 fasi di costruzione per evitare l'effetto della precompressione sullo schema iperstatico**

La precompressione sullo schema iperstatico avrebbe prodotto una spinta pari a circa il 40% di quella prodotta dal traffico

#### **1) Impalcato isostatico semplicemente appoggiato**

Vincoli temporanei (cilindri in acciaio come rulli)  
Applicazione della precompressione

#### **2) Schema di telaio**

Collegando le pile e l'impalcato con un getto di calcestruzzo



### 6.1.3 LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E RELATIVI PROVVEDIMENTI

*“Nel caso di azioni variabili caratterizzate da distribuzioni dei valori estremi dipendenti dal tempo, si assume come valore caratteristico quello caratterizzato da un assegnato periodo  $d$  di ritorno. Per le azioni ambientali (neve, vento, temperatura) il periodo di ritorno è posto uguale a 50 anni, corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 2% su base annua; per le azioni da traffico sui ponti stradali il periodo di ritorno è convenzionalmente assunto pari a 1000 anni.”*

**Le verifiche del ponte devono essere inquadrare in una delle 3 situazioni seguenti**

**ADEGUATO**, un ponte esistente per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite secondo le Norme Tecniche utilizzando i carichi e i fattori parziali in esse previsti. **La sola variazione in diminuzione ammessa è quella del fattore parziale relativo ai carichi permanenti, qualora se ne verifichino le ipotesi come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche. (riduzione  $\gamma_G$ )**

**OPERATIVO**, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite utilizzando i principi esposti nelle Norme Tecniche ma facendo riferimento nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali ad un tempo di riferimento ridotto. Il valore del tempo di riferimento,  $t_{ref}$ , **convenzionalmente assunto a livello indicativo nelle presenti Linee Guida è pari a 30 anni.** Nel calcolo del fattore parziale relativo ai carichi permanenti è ovviamente ancora possibile prevedere la diminuzione come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche, qualora se ne verifichino le ipotesi. Il ponte e gli esiti delle verifiche devono essere segnalati in banche dati istituzionali regionali e nazionali.

**TRANSITABILE**, un ponte per cui siano soddisfatte le verifiche eseguite su un orizzonte temporale ridotto, entro il quale si progettino e realizzino lavori di adeguamento o operatività, adottando i provvedimenti: (a) “limitazione dei carichi consentiti” o (b) “restrizione d’uso del ponte”. La programmazione temporale dettagliata (crono programma) dei lavori deve essere reso noto e trasferito a banche dati istituzionali regionale e nazionali. Nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali si adotta quindi un tempo di riferimento ridotto che nelle presenti Linee Guida è assunto non maggiore di  $t_{ref} = 5$  anni. Nel calcolo del fattore parziale relativo ai carichi permanenti è ovviamente ancora possibile prevedere la diminuzione come previsto nel § 8.5.5 delle Norme Tecniche, qualora se ne verifichino le ipotesi.

## I livelli di verifica

	Obiettivi	Carichi da traffico	$t_{ref}$
<p style="text-align: center;"><b>COMPLETA ADEGUATEZZA</b></p> <p style="text-align: center;">Valutazione del livello di sicurezza secondo le norme attuali (NTC 2018)</p>	<p>Valutazione del livello di sicurezza strutturale, sismico e idraulico (alluvioni e frane) come previsto dalle NTC 2018, con eventuale riduzione fattori parziali carichi permanenti</p>	<p>Schemi convenzionali previsti dalle NTC 2018</p>	<p style="text-align: center;">Come da NTC 2018</p>

<b>OPERATIVITA'</b>	<p>Valutazione del livello di sicurezza strutturale con <math>t_{ref}</math> ridotto e fattori parziali ridotti</p>	<p>Schemi da NTC 2018, con fattori parziali ridotti</p>
<b>TRANSITABILITA' NTC 2018 (Immediata transitabilità 1)</b>	<p>Valutazione del livello di sicurezza strutturale con <math>t_{ref}</math> ulteriormente ridotto imponendo restrizioni all'uso del ponte e relativi fattori parziali ridotti</p>	<p>Schemi da NTC 2018, con restrizioni di uso e relativi fattori parziali ridotti</p>
<p style="text-align: center;"><b>TRANSITABILITA' CdS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PESANTE</li> <li>• INTERMEDIA</li> <li>• LEGGERA</li> <li>• AUTOVEICOLI</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>(Immediata transitabilità 2)</b></p>	<p>Valutazione del livello di sicurezza strutturale con <math>t_{ref}</math> ulteriormente ridotto, imponendo limitazione dei carichi secondo CdS e con relativi fattori parziali ridotti</p>	<p>Schemi da CdS con relativi fattori parziali ridotti</p>

## VERIFICA PER PONTE ADEGUATO: ANALISI PER AZIONI GRAVITAZIONALI

### 6.1.5 LIVELLI DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Il livello di sicurezza è quantificato, assumendo per ogni livello di analisi il tempo di riferimento e i carichi da traffico previsti per esso, attraverso i parametri di verifica  $\zeta_E$  e  $\zeta_{V,i}$  definiti nel capitolo 8.3 delle Norme Tecniche:

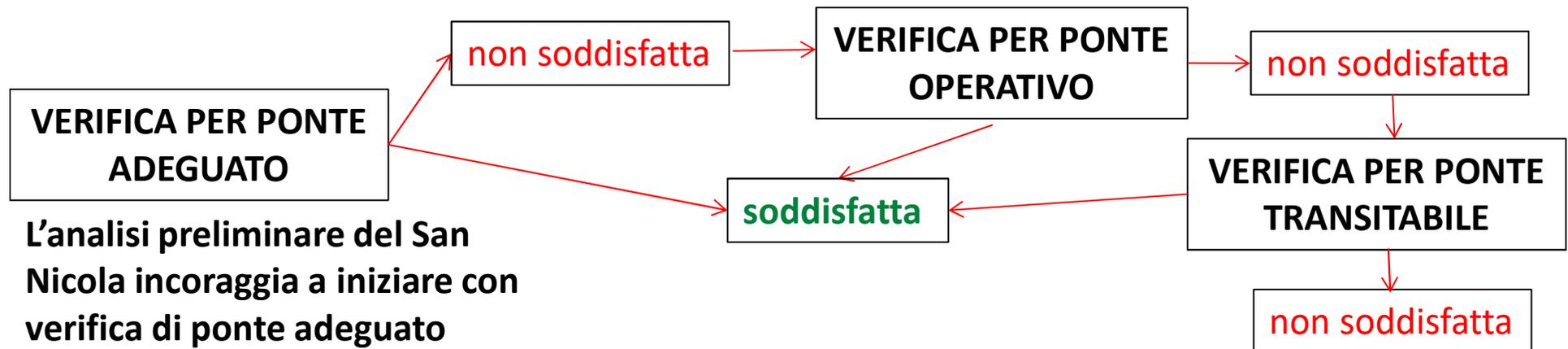
#### NTC2018

La restrizione dell'uso può mutare da porzione a porzione della costruzione e, per l'*i*-esima porzione, è quantificata attraverso il rapporto  $\zeta_{V,i}$  tra il valore massimo del sovraccarico variabile verticale sopportabile da quella parte della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione”.

#### Circolare 2019

$\zeta_{V,i}$  definito come il rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte *i*-esima della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione.”

Si precisa che dopo avere adottato i provvedimenti e le calcolazioni descritte nelle presenti linee guida, tutti i valori aggiornati di  $\zeta_{V,i}$  devono essere non inferiori all'unità, nei limiti dei valori dei carichi e dei fattori parziali assunti.



## I fattori parziali di sicurezza dei carichi

### I carichi permanenti

#### 8.5.5. AZIONI

I valori delle azioni e le loro combinazioni da considerare nel calcolo, sia per la valutazione della sicurezza sia per il progetto degli interventi, sono quelle definite dalla presente norma per le nuove costruzioni, salvo quanto precisato nel presente capitolo. Per i carichi permanenti, un accurato rilievo geometrico-strutturale e dei materiali potrà consentire di adottare coefficienti parziali modificati, assegnando a  $\gamma_G$  valori esplicitamente motivati. I valori di progetto delle altre azioni saranno quelli previsti dalla presente norma.

**Come si stabilisce il valor di  $\gamma_G$ ?**

**Le linee guida ci indicano come procedere considerando che la riduzione dipende da:**

- 1) conoscenza e affidabilità dei carichi permanenti: misure geometriche, caratteristiche dei materiali, modellazione strutturale
- 2) accuratezza ed affidabilità del modello: modello 3D agli elementi finiti, identificazione dinamica, prova statica

**$\gamma_G$  può essere ridotto da 1,35 fino ad 1,1 anche nel caso di verifica di ponte adeguato**

**Nel caso del ponte San Nicola la sollecitazione flettente dovuta al traffico è circa il 44% di quella dovuta al peso proprio:**

**La riduzione del coefficiente parziale dei carichi permanenti è preziosa**

**Linee guida Par. 6.3.3.2. Fattori parziali di sicurezza dei carichi permanenti**

## Controllo misure geometriche, materiali, dettagli

In questo paragrafo si elencano tutti i rilievi effettuati per verificare eventuali difformità della struttura con quanto indicato nel progetto originario disponibile.

**Lunghezza degli sbalzi e della campata della trave:** le misure globali del ponte sono corrispondenti con quelle del progetto.

**Larghezza della carreggiata e della parti laterali:** La carreggiata ha larghezza di 7 m (3,50 m per corsia di marcia). La larghezza degli sbalzi è di 1 m.

**Misura della posizione dei pozzetti di ispezione:** Dal rilievo geometrico è emerso che a partire dalla Pila 2 (Lato Rotonda delle scienze) la prima fila di pozzetti è a 12,60 m; la seconda a 27,60 m; la terza a 53,30 m; la quarta a 68,20 m.

**Altezza delle sezioni delle travi:** Sono state effettuate misure a campione dell'altezza della trave.

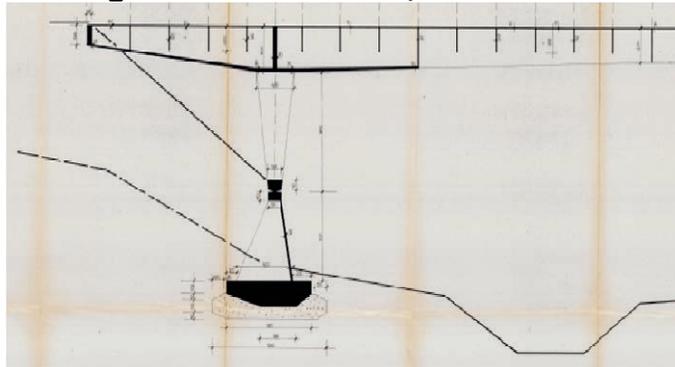
**Rilievo geometrico soletta superiore:** Nell'allegato A sono riportati gli spessori della soletta riscontrati durante le indagini. In particolare in prossimità del giunto (Lato Capodimonte) lo spessore è risultato di 20 cm. In corrispondenza dei chiusini vi è un ringrosso dello spessore della soletta, che raggiunge i 30 cm. Nella zona di momento positivo lo spessore è variabile tra 13 e 15 cm, come testimoniato dalle microcarote prelevate.

**Rilievo geometrico soletta inferiore:** Per quanto riguarda la soletta inferiore, nell'allegato A si riportano i valori degli spessori rilevati.

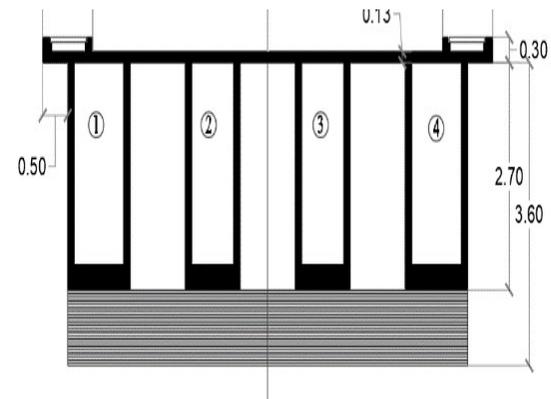
**Rilievo geometrico anime esterne/interne:** Le anime dei cassoni, interne ed esterne, laddove sono state eseguite le carote MC1, MC2, MC5, C2, C3, C9, mostrano spessori compresi tra 14 e 18 cm e quindi sufficientemente corrispondenti ai valori riportati in progetto (vedi allegato A).

**Lunghezza del tratto di cassone inferiore chiuso:** Il tratto di cassone chiuso inferiormente è di circa 15 m.

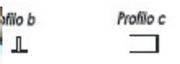
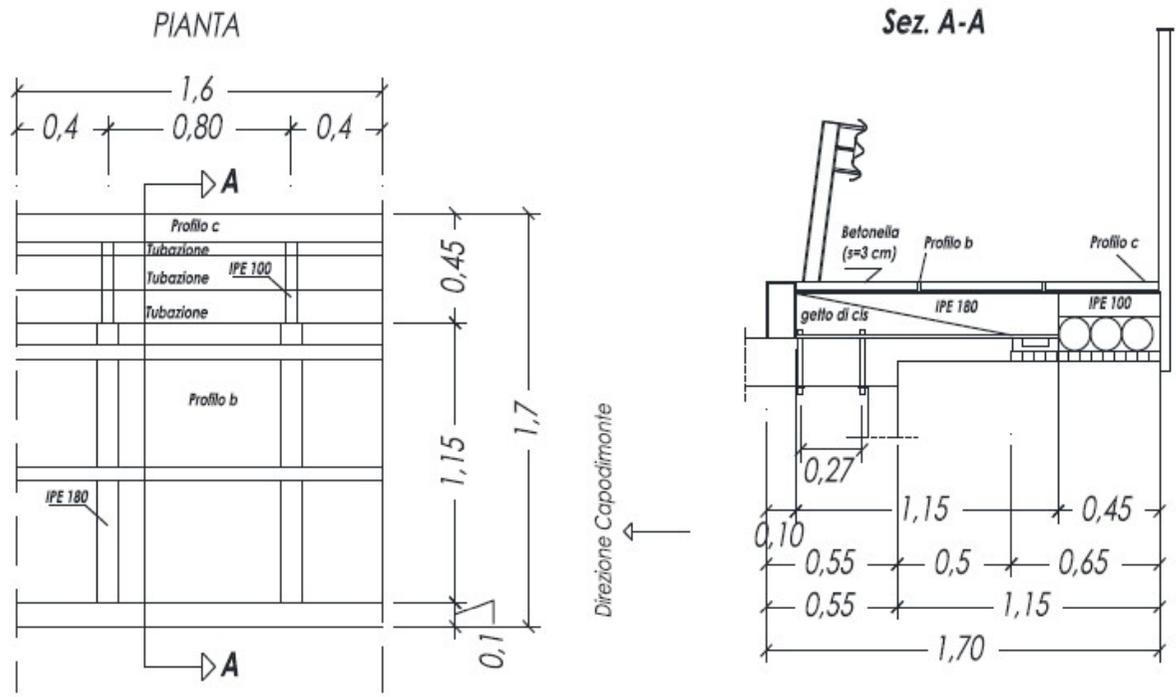
**Rilievo geometrico traversi; Dimensione delle pile.**



**Posizione cavi ,  
ancoraggi e armature  
soletta mediante 36  
saggi**

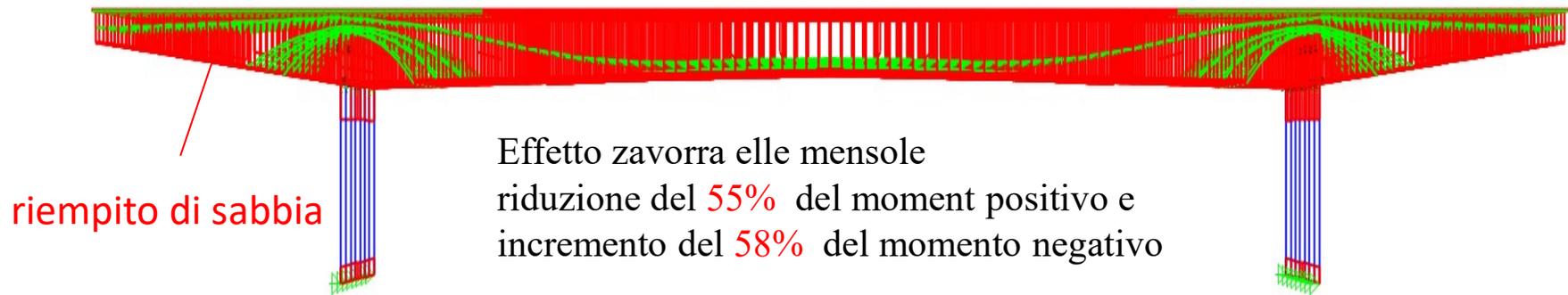


# Dettagli marciapiedi, guard rail e parapetto

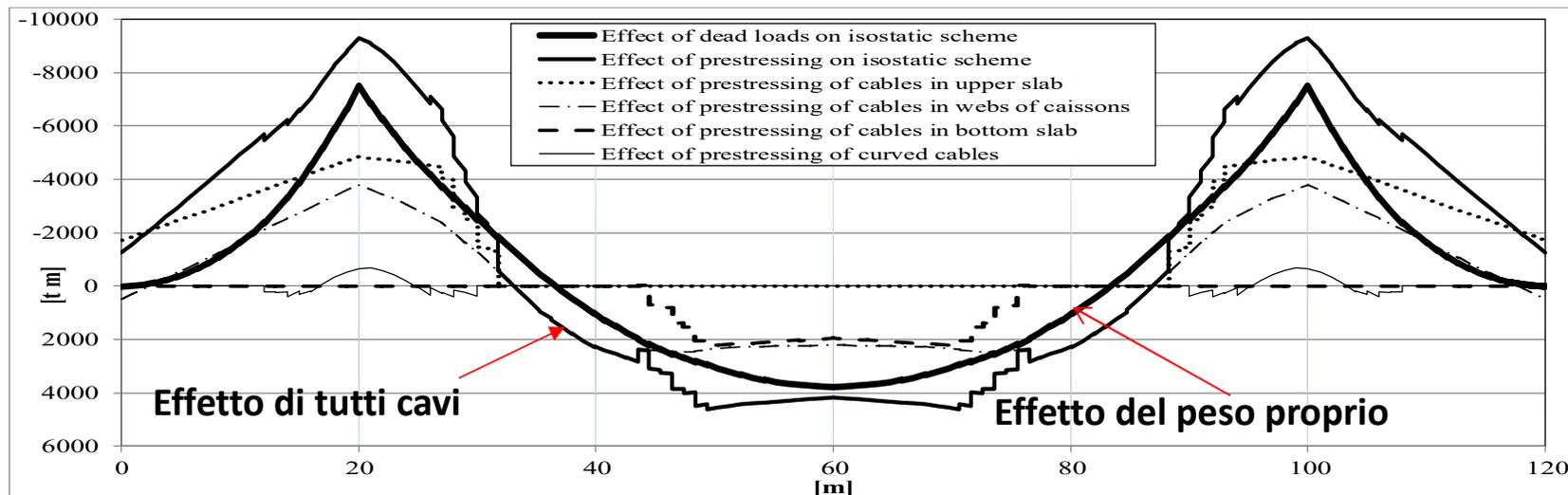


marciapiede aggiunto negli anni '80

## Modello accurato



**Inserimento della precompressione nel modello in modo da poterla considerare attiva o non anche nei diversi cavi**



**La precompressione annulla l'effetto del peso proprio sullo schema di trave appoggiata**

**La riduzione di  $\gamma_G$  da 1,35 a 1,1 rappresenta una possibilità di incremento del carico da traffico di circa 9-10%**

**E' necessario sviluppare un modello affidabile**

# LE PROVE SULLA STRUTTURA

## Linee Guida:

**l'identificazione dinamica, in unione alla riproduzione delle prove di collaudo dell'epoca, ove disponibili, o con prove di carico progettate ad hoc, consentono di calibrare opportunamente i modelli numerici**

L'identificazione strutturale è un processo che si sviluppa definendo il comportamento della struttura, e quindi sviluppando un suo modello numerico, mediante prove sperimentali in sito. Se si utilizza una prova dinamica si parla di identificazione dinamica

### **La prova dinamica con vibrazioni ambientali (AVT Ambient Vibration Test) elaborata con metodi OMA (Operational Modal Analysis)**

La prova si effettua mediante accelerometri opportunamente disposti sulla base di un modello strutturale preliminare che consentono di rilevare le vibrazioni della struttura in presenza di azioni ambientali (vento, passaggio di persone, ecc...).

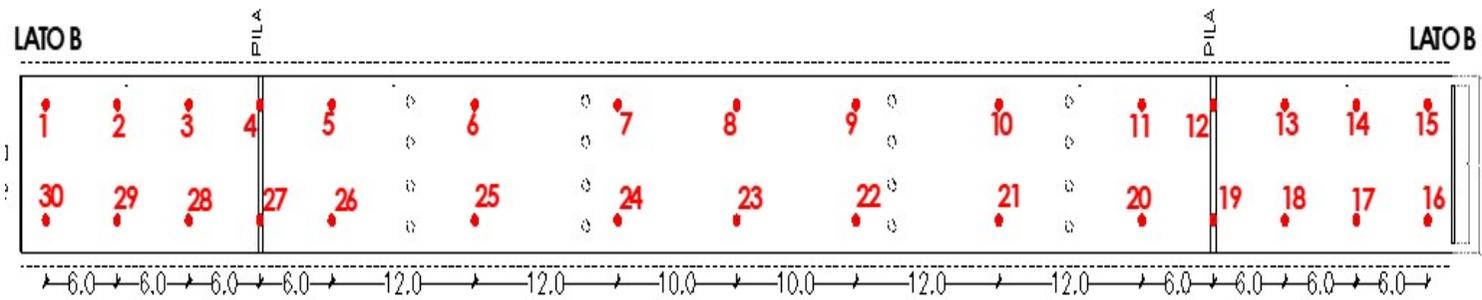
**Vantaggi:** non è necessario applicare carichi per rilevare una risposta strutturale

**Svantaggi:** i dati misurati devono essere elaborati correttamente mediante apposite procedure numeriche poichè la risposta strutturale è di tipo dinamico con azioni di modesta entità.

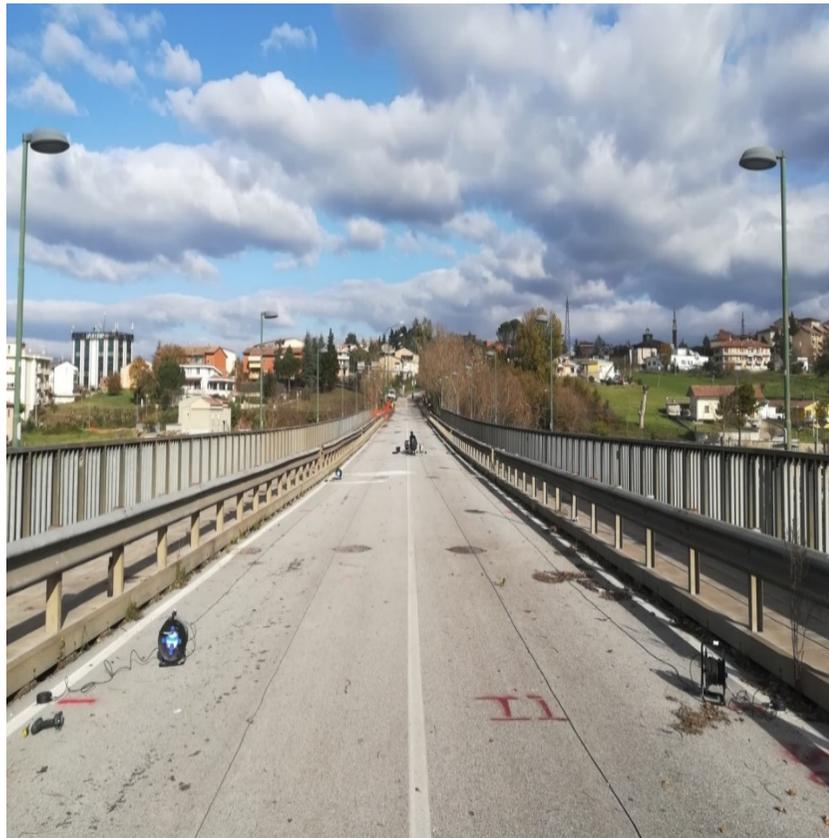
Non fornisce informazioni sulla resistenza ma solo sullo stato della struttura sempre mediante un confronto con un modello numerico affidabile

# PROVA DINAMICA IN SITO: Analisi Modale Operativa – OMA

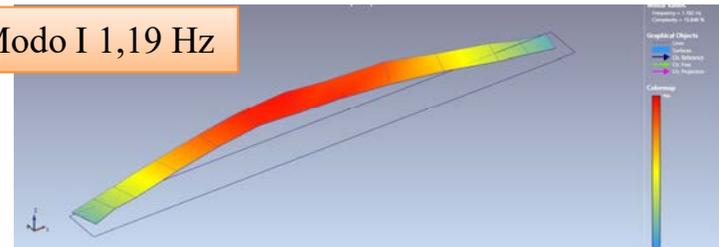
30 punti di misura



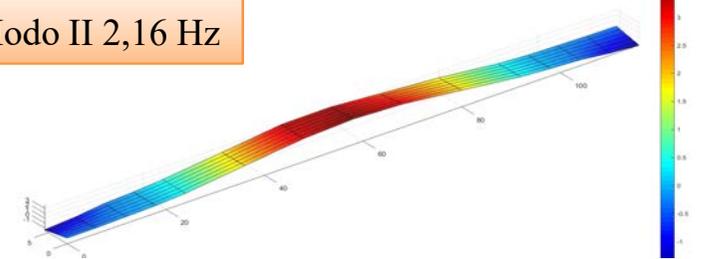
RISULTATI: Frequenze ottenute mediante FDD



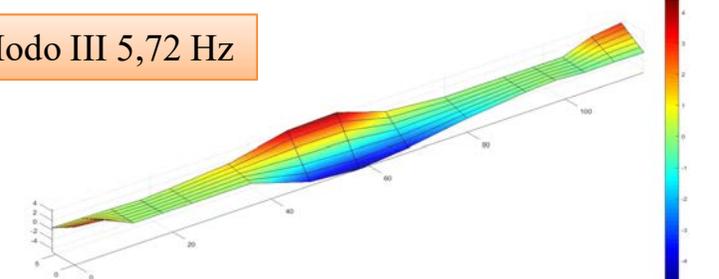
Modo I 1,19 Hz



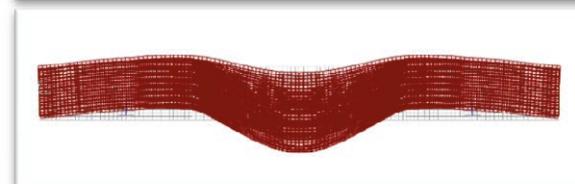
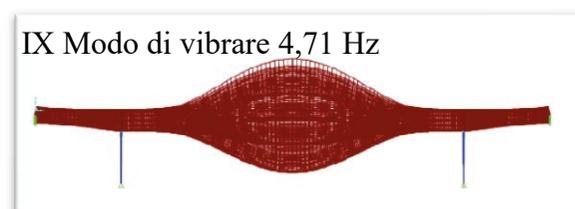
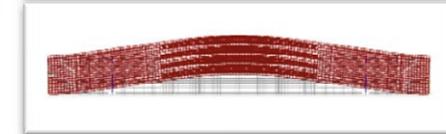
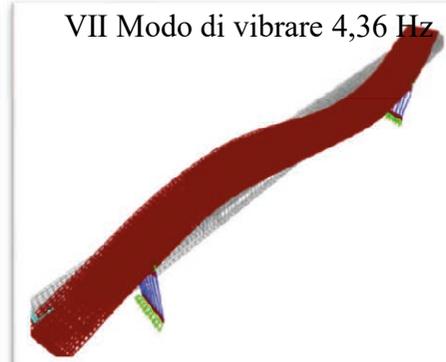
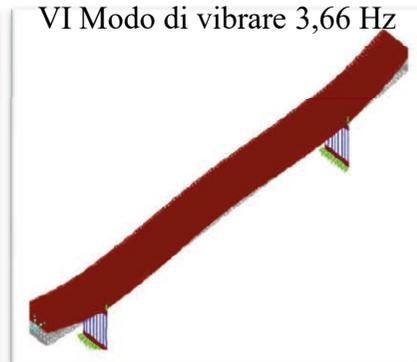
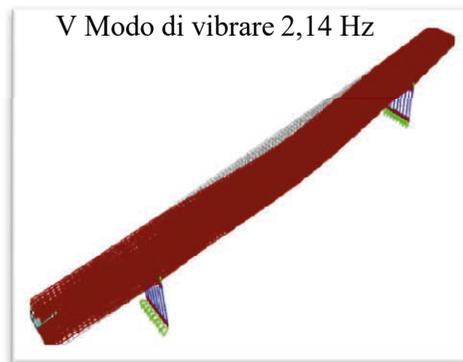
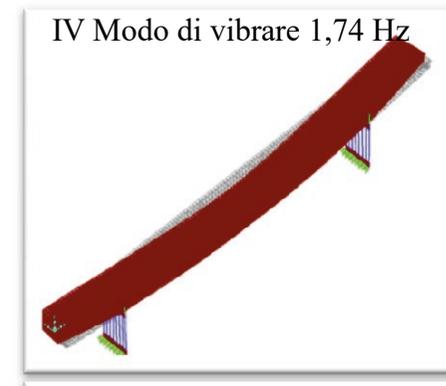
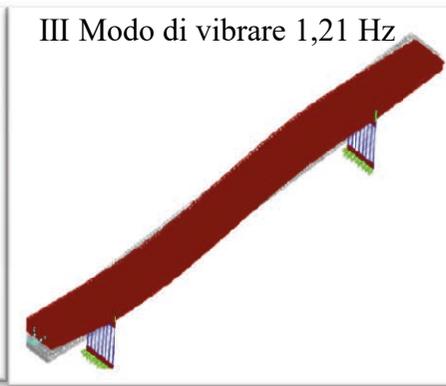
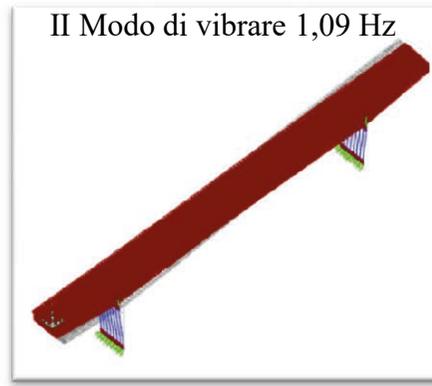
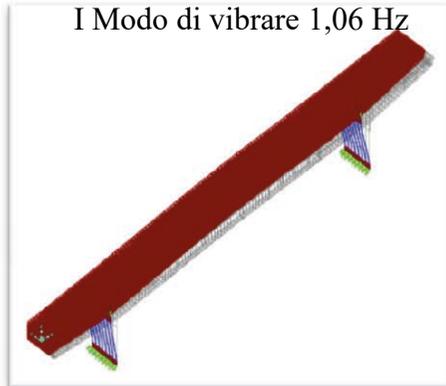
Modo II 2,16 Hz



Modo III 5,72 Hz



**ANALISI MODALE SUL MODELLO NUMERICO PRELIMINARE:  
Il modello non presenta una corrispondenza del tutto soddisfacente con la sperimentazione**



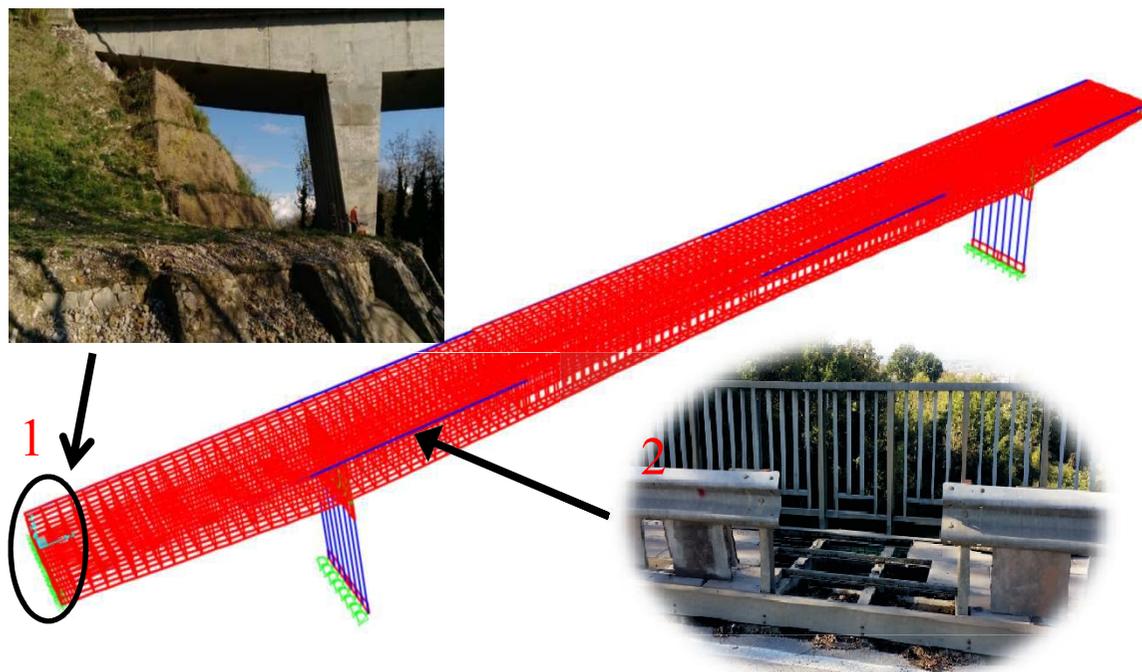
I primi modi individuano oscillazioni trasversali e longitudinali

I modi superiori individuano oscillazioni prevalentemente verticali e torsionali di impalcato

# CALIBRAZIONE DEL MODELLO

1. Vincoli fissi unilaterali longitudinali
2. Vincoli elastici verticali e trasversali agli estremi degli sbalzi per interazione con strada e opere di contenimento dei pendii;
3. Inserimento trave longitudinale con rigidità trasversale equivalente al sistema parapetto, guard-rail marciapiede

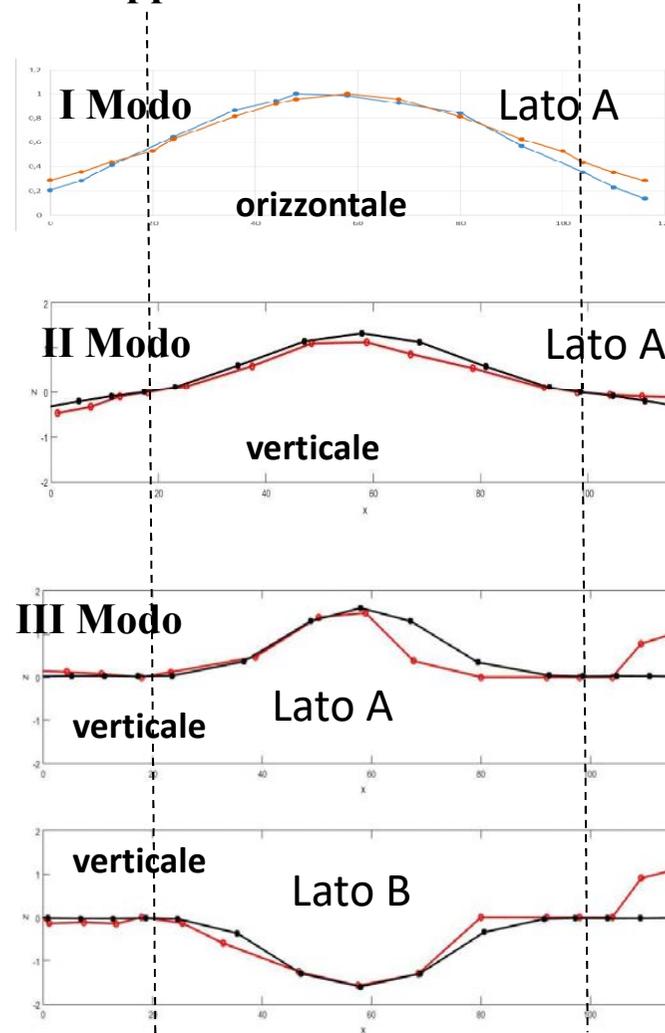
La rigidezza dell'impalcato risulta quella non fessurata



Confronto frequenze

	Frequenza Sperimentale (Hz)	Frequenza Numerica (Hz)
Modo I	1,19	1,53
Modo II	2,16	2,19
Modo III	5,72	4,86

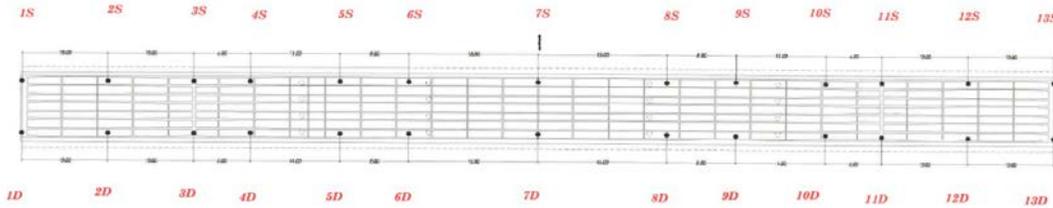
Sovrapposizione deformate modali



# PROVA DI CARICO STATICO

## 5 Fasi di carico

### 26 punti di misura



Fase di carico	
1	Carico dello sbalzo con due autocarri affiancati e scarico
2	Carico centro campata con due autocarri affiancati e scarico
3	Carico centro campata con quattro autocarri
4	Carico centro campata con sei autocarri e scarico
5	Carico dello sbalzo con due autocarri affiancati e scarico

### Misurazione degli spostamenti mediante livello ottico



### Valutazione delle rotazioni alla base, mediante inclinometro biassiale

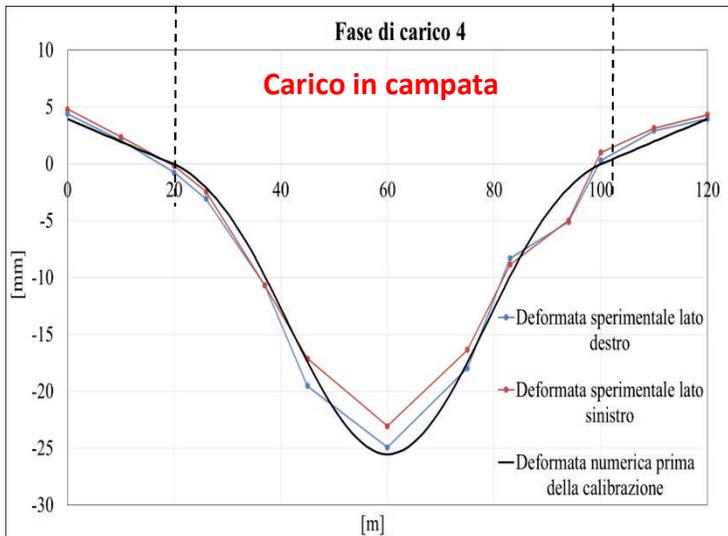
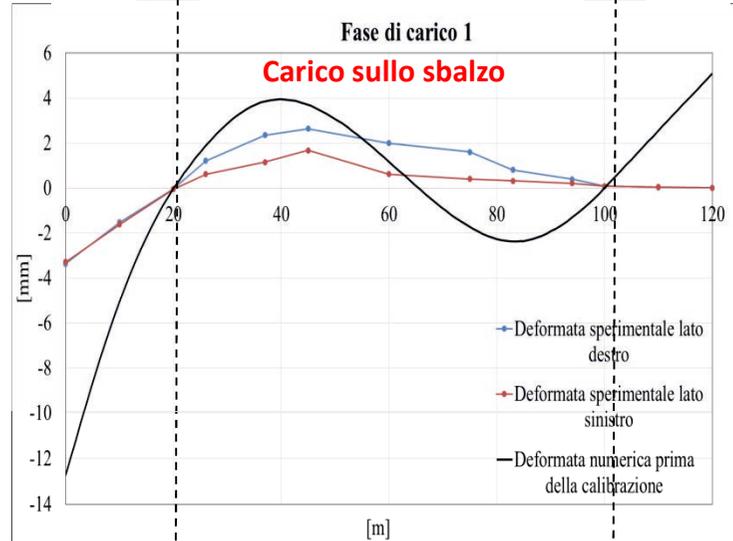


### Carico massimo da Codice della Strada

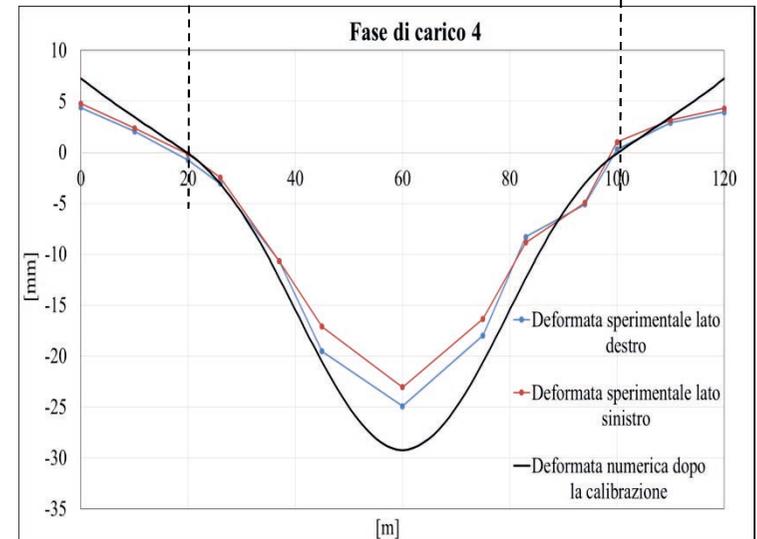
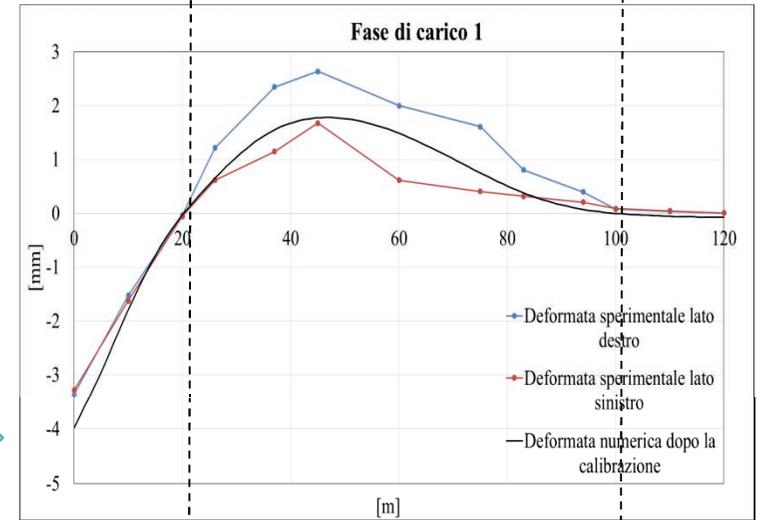


# CONFRONTO NUMERICO – SPERIMENTALE

## PRE-CALIBRAZIONE



## POST-CALIBRAZIONE



Calibrazione  
del modello  
numerico



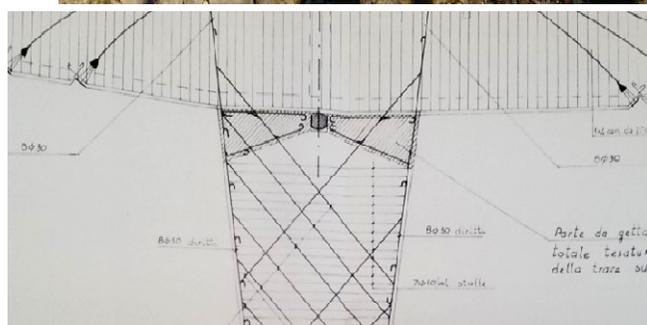
Confermata la  
risposta  
dinamica

## CALIBRAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

1. Appoggi elastici unilaterali verso il basso agli estremi degli sbalzi (calibrati sulla prova dinamica e confermati dalla prova statica);
2. Vincoli fissi monolaterali longitudinali agli estremi degli sbalzi,
3. Vincoli elastici trasversali all'estremità degli sbalzi
4. Riduzione della rigidezza della pila del 50% (parziale efficienza del vincolo tra pila e impalcato)
5. La rigidezza dell'impalcato è quella non fessurata



**Gabbioni e terre armate su cui si appoggia lo sbalzo**

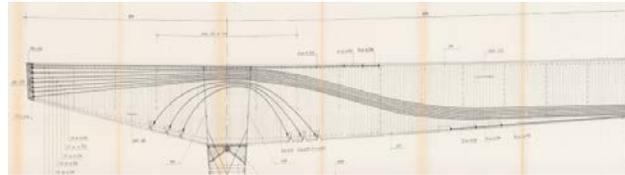


**Vincolo pila-impalcato non perfetto**

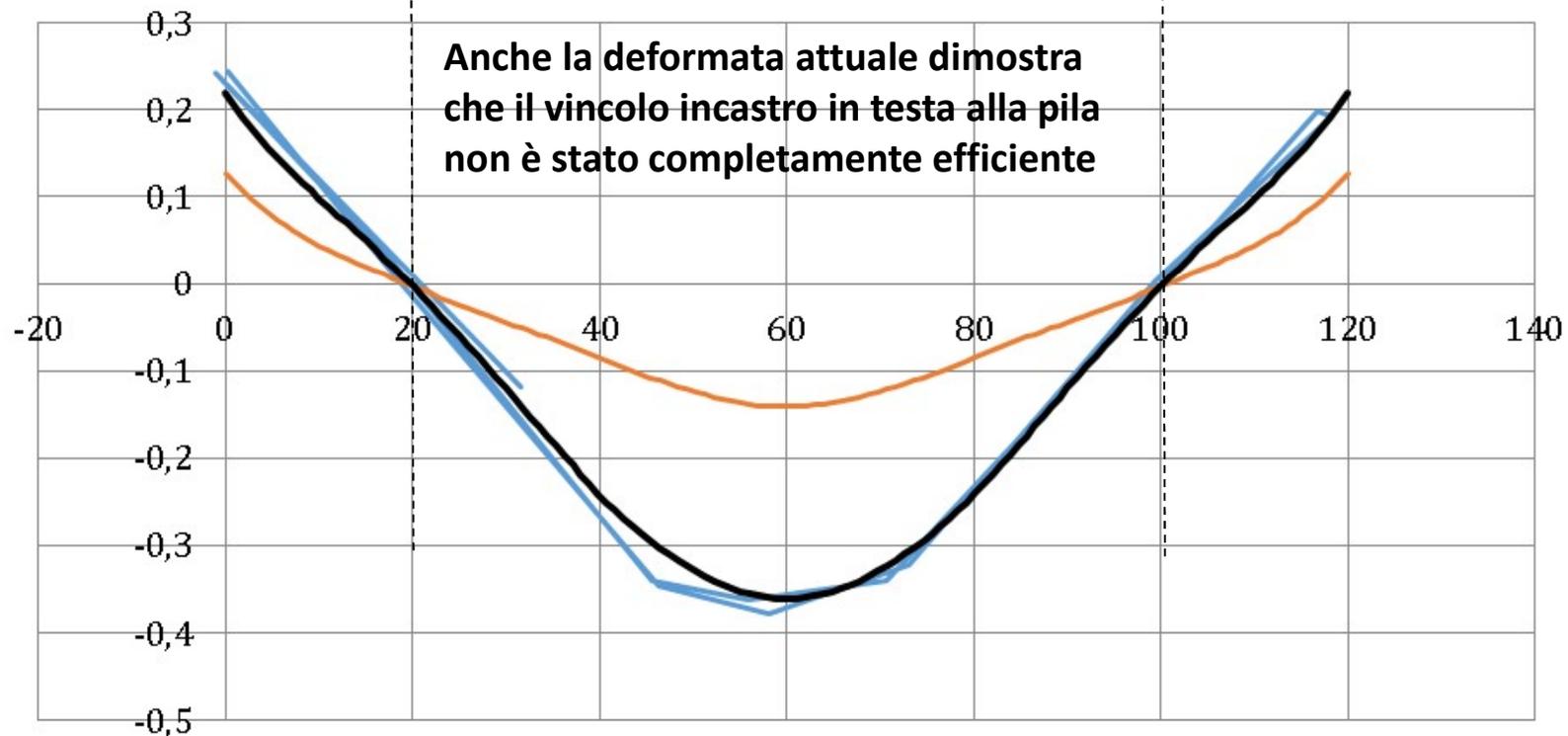
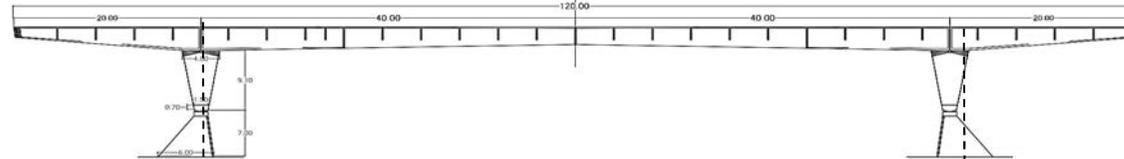


**Estremità dello sbalzo cementata alle estremità**

## Misura della deformata attuale: contribuisce alla definizione del modello



Viscosità  
 $\phi=3,5$  umidità 55-77%  
perimetro esposto interno ed esterno



- Misura sperimentale
- $t=\infty$  tutti i cavi efficienti
- $t=\infty$  attivi solo i cavi rettilinei

La misura della deformata consente di valutare un effetto globale della precompressione ma si deve tenere conto della viscosità

## Materiali e verifiche

### Par. 6.3.4.1. Fattori di sicurezza dei materiali

Sigla	f <sub>car</sub> [MPa]	R <sub>cis,i</sub> [MPa]
C1	51,40	51,40
C2	50	50
C3	53,50	53,50
C4	72,10	72,10
C5	80,70	80,70
C8	50,90	50,9
C9	48,10	48,10
C10	55,20	55,20
C11	36,70	37,67

$$f_d = \min\left(\frac{f_m}{FC \cdot \gamma_m}; \frac{f_k}{FC}\right)$$

$$FC=1 \quad \gamma_c=1,5 \quad \gamma_s=1,15$$

Carote di calcestruzzo sull'impalcato

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \\ \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(x_i - \bar{\mu})]^2} \end{array} \right.$$

media aritmetica=46,1MPa

errore standard=10,8MPa

$$\bar{\mu}_{0.16} = \bar{\mu} - \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}$$

media al 16° percentile=42,5MPa

$$\hat{x}_{0.05} = e^{\bar{\mu}_{0.16} - 1.64\bar{\sigma}}$$

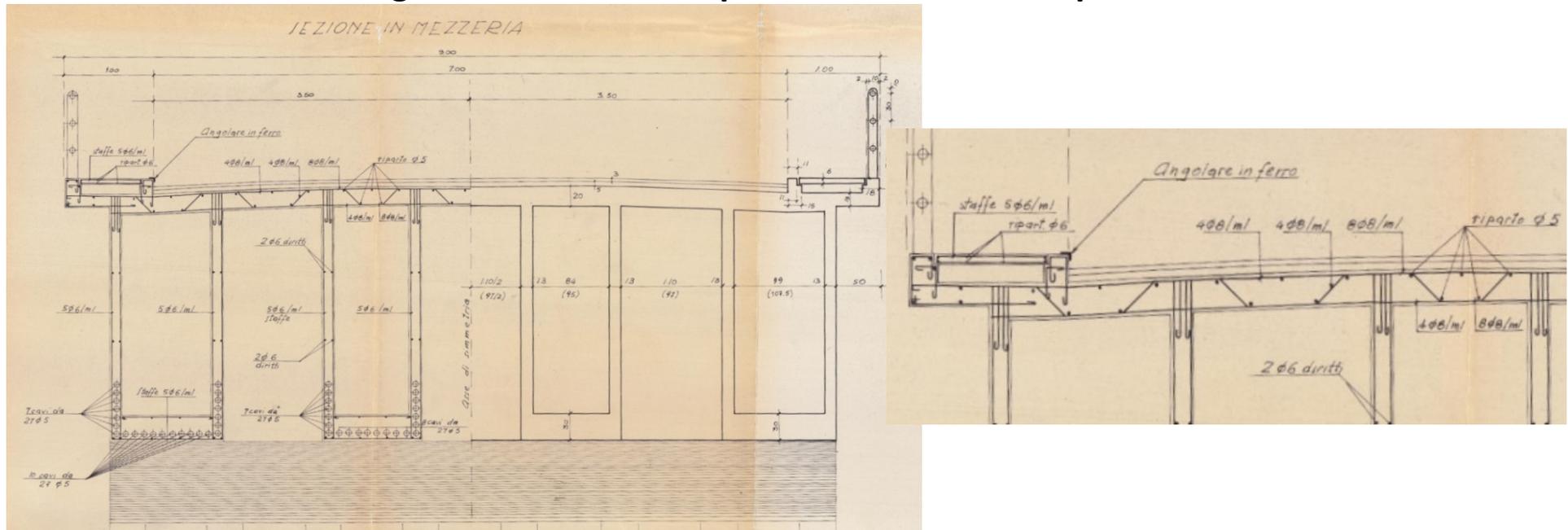
valore caratteristico assumendo una distribuzione log-normale=29,0MPa

Calcestruzzo					
	f <sub>cm</sub> [MPa]	γ [-]	f <sub>cm</sub> /γ	f <sub>ck</sub> [MPa]	f <sub>cd</sub> [MPa]
Impalcato	46,1	1,50	30,7	29,0	29,0

Acciaio (valori allo snervamento)					
Elementi	f <sub>ym</sub> [MPa]	γ [-]	f <sub>cm</sub> /γ	f <sub>yk</sub> [MPa]	f <sub>yd</sub> [MPa]
Acciaio fili	1748,9	1,15	1520,8	1743,7	1520,8

Il valore nominale della resistenza dei cavi da precompressione indicato in progetto è di 1800MPa e lo snervamento è 1500MPa

## La verifica a taglio della soletta di spessore 15mm non rispetta le NTC2018



### Linee Guida : Par. 6.3.5.2. Problemi di verifica locale

$$V_{Rd} = \frac{0,3 \sqrt{f_{ck}} b_w d}{\gamma_c (1 + 0.0022d)}$$

NTC2018

$$V_{Rd} = \left\{ 0.18 \cdot k \cdot \frac{(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}}{\gamma_c} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \geq (v_{min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$b_w$ =larghezza anima ,  $d$ =altezza utile

	$V_{Rd.c}$ [t]	$V_{sd}$ [t]	FS
Linee Guida	10,1	10,81	0,94
NTC 2018	8,8	10,81	0,81

**Morandi diceva :**

***“Non esiste mai un'unica soluzione, ma ne esistono tante”***

**Quindi ogni struttura nasce da un progetto diverso ed ha caratteristiche diverse, anche se ci sono alcuni criteri generali, pertanto *è indispensabile avere delle linee guida* poichè le normative non possono fornire regole specifiche per l'analisi delle strutture esistenti per ogni tipologia ed anno di costruzione.**