



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale

Convegno



La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Accordo tra il CSLLPP ed il Consorzio ReLUIS
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022

Roma
24 e 25 ottobre 2023

LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA DEI PONTI ESISTENTI: MODELLI E PROVE SPERIMENTALI
-Introduzione-

Prof. Ing. Lidia LA MENDOLA
Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo

CAPITOLO 8 - COSTRUZIONI ESISTENTI **NTC 2018**

8.1. OGGETTO

8.2. CRITERI GENERALI

8.3. VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

8.4. CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

- 8.4.1. RIPARAZIONE O INTERVENTO LOCALE
- 8.4.2. INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO
- 8.4.3. INTERVENTO DI ADEGUAMENTO

8.5. DEFINIZIONE DEL MODELLO DI RIFERIMENTO PER LE ANALISI

- 8.5.1. ANALISI STORICO-CRITICA
- 8.5.2. RILIEVO
- 8.5.3. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI
- 8.5.4. LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA
- 8.5.5. AZIONI

8.6. MATERIALI

8.7. PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI IN PRESENZA DI AZIONI SISMICHE

- 8.7.1. COSTRUZIONI IN MURATURA
- 8.7.2. COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO
- 8.7.3. COSTRUZIONI MISTE
- 8.7.4. CRITERI E TIPI D'INTERVENTO
- 8.7.5. ELABORATI DEL PROGETTO DELL'INTERVENTO

**MODELLAZIONE E VALUTAZIONE
DELLA SICUREZZA**

**PROGETTO
DELL'INTERVENTO**

CONOSCENZA

Il capitolo 8 delle NTC si riferisce per lo più agli edifici esistenti. Nella circolare 2019 c'è un punto aggiuntivo, il C8.8 sulla valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi di ponti esistenti.

Si fa particolare riferimento alle azioni sismiche e non c'è il dettaglio sulle tipologie e materiali, come per gli edifici.

C8.8 INDICAZIONI AGGIUNTIVE - PONTI ESISTENTI (C.M. 21.01.2019, N. 7)

La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti - Roma, 24 e 25 ottobre 2023



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti
Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

Linee Guida del CSLP (DM n. 204 del 01.07.2022 - Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti): costituiscono una integrazione delle norme vigenti sul tema; pongono particolare attenzione a problematiche dovute ad azioni idrauliche (trattate nella Circ. 2019 - compatibilità idraulica - C5.1.2.3; azioni idrodinamiche C5.1.3.8) o da instabilità di versante (trattata nella Circ. 2019 - progettazione geotecnica C6.3) guardando al rischio idrogeologico. Si riferiscono a ponti in c.a. e in c.a.p; particolare attenzione viene posta su ponti in c.a.p. a cavi post-tesi (corrosione, vuoti nella guaina, problemi alle testate, ecc.)

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

Allegate al parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n.88/2019,
espresso in modalità "agile" a distanza dall'Assemblea Generale in data 17.04.2020.

Approccio multilivello - 6 livelli

WP2

- Livello 0: censimento, raccolta delle informazioni e della documentazione disponibile.
- Livello 1: ispezioni visive dirette; rilievo speditivo della struttura e delle caratteristiche geo-morfologiche ed idrauliche dell'area, tese a individuare lo stato di degrado e le principali caratteristiche strutturali, geometriche e potenziali condizioni di rischio associate a eventi franosi o ad azioni idrodinamiche.
- Livello 2: definizione della classe di attenzione, sulla base dei parametri di **pericolosità/suscettibilità, vulnerabilità ed esposizione**. L'attenzione è rivolta al rischio: - strutturale e fondazionale; sismico; frane; idraulico. In funzione di tale classificazione, si procede quindi con uno dei livelli successivi.

WP4

- Livello 3: valutazioni preliminari atte a comprendere se è necessario procedere ad approfondimenti mediante l'esecuzione di verifiche accurate di Livello 4; calcolo del rapporto di sicurezza approssimato (rapporto tra domanda indotta da traffico previsto dalle norme di progetto e domanda valutata con modelli di traffico previsti da norme attuali).
- Livello 4: esecuzione di valutazioni accurate sulla base di quanto indicato dalle NTC.
- Livello 5: si applica ai ponti considerati di significativa importanza all'interno della rete, opportunamente individuati (analisi di resilienza del ramo della rete stradale e/o del sistema di trasporto di cui lo stesso è parte, valutando la rilevanza trasportistica, ecc).

CONOSCENZA

- Analisi storico-critica (vicende costruttive, trasformazioni nel tempo, ecc.)
- Analisi del progetto originario;
- Rilievo (geometrico-strutturale, dei dettagli costruttivi, del quadro fessurativo, dei degradi e dei dissesti);
- Caratterizzazione geologico-tecnica del sito;
- Caratterizzazione meccanica dei materiali, dell'effettivo stato tensionale presente nel caso della precompressione, ecc.

Inoltre, nei casi in cui la verifica di sicurezza deve includere il rischio idrogeologico:

- Inquadramento dell'ambito idraulico, rilievo di fenomeni di scalzamento delle pile o delle spalle, valutazione del livello di efficienza di eventuali opere di mitigazione o di laminazione delle portate di piena;
- Inquadramento dell'assetto geo-morfologico e valutazione di movimenti di versante potenzialmente interagenti con la struttura o parti di essa, rilievo della presenza e valutazione dell'efficienza di passati interventi di stabilizzazione.

TIPOLOGIE DI PONTI - Ponti a travi semplicemente appoggiate



Travi in c.a.p.



Travi in acciaio e soletta in c.a.



Ponti a piastra alleggerita



Travi reticolari in acciaio

TIPOLOGIE DI PONTI - Ponti a travata Gerber o a travi appoggiate con selle Gerber



Ponte Federico II, Sicilia

Con *cantilever* in c.a. e trave tampone in c.a.p.



Ponte sul Belice, Sicilia

Multicampata in c.a.



Ponte sul fiume Po

Con stampelle sulle pile e sbalzo



Ponte sul Delia, Sicilia

Dapped-end beams

TIPOLOGIE DI PONTI - Ponti a trave continua



Viadotti ME-PA, Sicilia

Trave continua in c.a.p. con sezione a cassone



Sovrappasso stradale

Continui multi-trave



Passante di Mestre

Con travi e traversi in acciaio



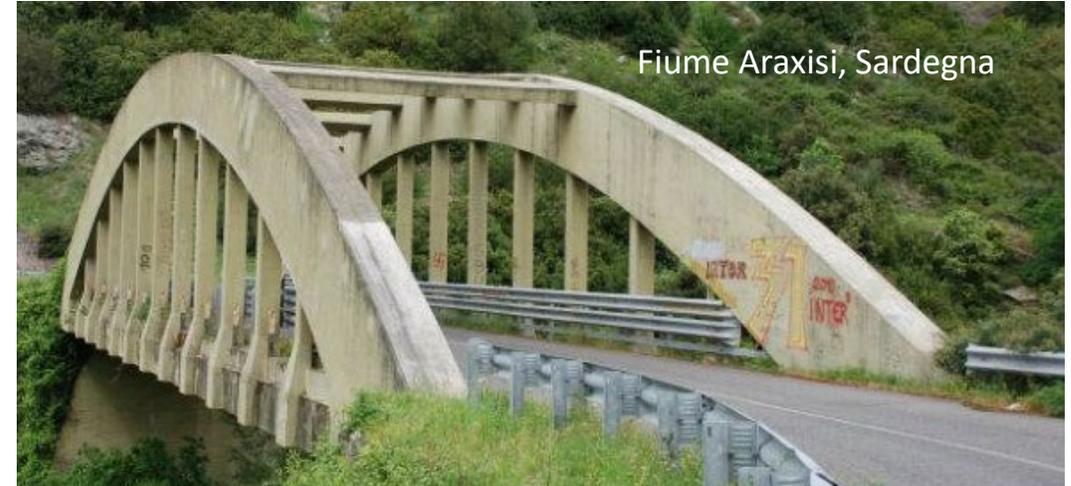
Ponte Europa, Brennero

Con cassone in acciaio



Ponte Corleone, Palermo

Arco in c.a. a via superiore (trave Gerber su ritzi in c.a.)



Fiume Araxisi, Sardegna

Arco a via inferiore in c.a.



Ponte sulla Gravina, SS Bradanica

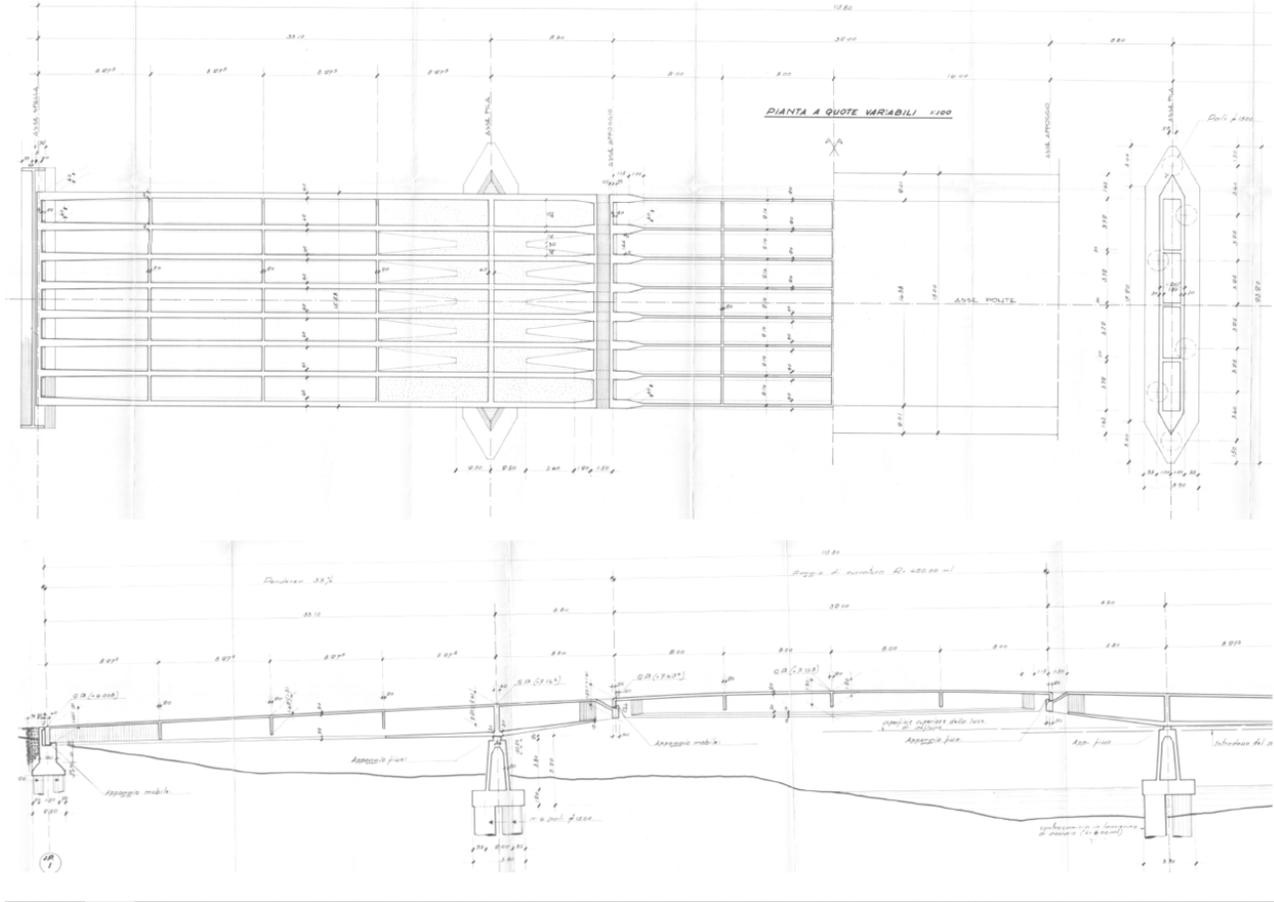
A via inferiore con arco e impalcato in acciaio



Viadotto Platano, Basilicata

A telaio con pile inclinate (cavalletto)

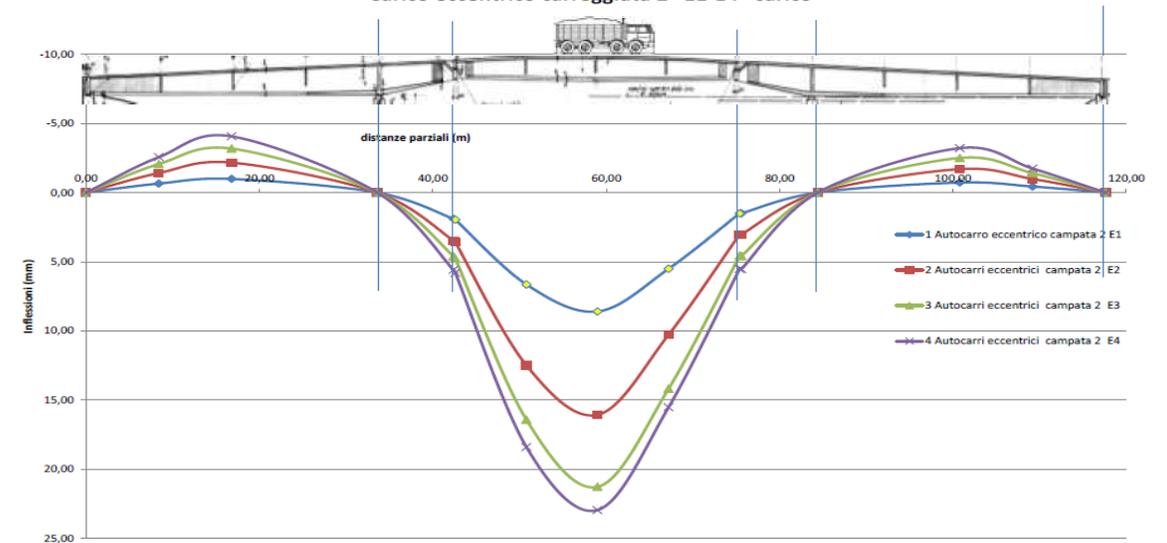
Documenti progettuali o as-built



Il caso del Ponte Federico II, Sicilia



Carico eccentrico carreggiata 2 "E1-E4" carico



Prove di carico

Le indagini sono classificate come LIMITATE, ESTESE ed ESAUSTIVE, modulate in virtù del livello di conoscenza che si vuole raggiungere e di quanto già si conosce.

La definizione dei Livelli di Conoscenza (LC1,LC2,LC3) e dei Fattori di Confidenza FC (da 1.35 a 1), che possono essere differenti nelle varie parti strutturali, vengono indicati in un documento di rango inferiore. Per gli elementi critici dovrebbe essere sempre LC3.

Un obiettivo importante della fase di conoscenza è il rilievo del degrado dei materiali e degli elementi strutturali.

Tra i fenomeni di degrado più ricorrente:

- Corrosione (diffusa e pitting)
- Malfunzionamento dei sistemi di raccolta acque piovane (riferimento alle istruzioni C.N.R. “Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale. Ponti e viadotti”).
- Problema ai cavi di precompressione (guaine, testate, ecc.)
- Fessurazioni diffuse

Maggiore rilevanza ha la presenza di degrado in elementi critici (appoggi, selle Gerber, ecc.)

Degrado del c.a. per corrosione delle armature



Degrado selle Gerber, spalling e corrosione armature pile e degrado sedi di appoggio



Corrosione armature pulvini e travi in c.a.

Degradi dei ponti in c.a.p.



Esposizione guaine e trefoli, corrosione

Occorre porre attenzione agli sbalzi laterali dei ponti, particolarmente esposti agli effetti del degrado; è bene che essi siano verificati per gli effetti di urto, svio e azione delle barriere di sicurezza nelle condizioni più sfavorevoli.



Difetti di iniezione e corrosione testate



Lesioni lungo i cavi

Indagini e Sperimentazione in situ e in laboratorio

Le campagne conoscitive sono organizzate per livelli successivi di approfondimento:

- primo livello di indagine mirato al reperimento delle informazioni sufficienti all'esecuzione di una valutazione di sicurezza preliminare per individuare le zone affette da maggiori problematiche, maggiormente sollecitate, o anche meno conosciute;
- successivi livelli 'calibrati' sui risultati delle verifiche precedenti, permettendo di ottimizzare la conoscenza e, conseguentemente, di elaborare modellazioni via via più raffinate e che garantiscono una maggiore attendibilità dei risultati.

Particolare attenzione deve essere posta sulla 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 sulla 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.

(Ponte Federico II, Sicilia)

Sensori accelerometrici

Eccitazione ambientale

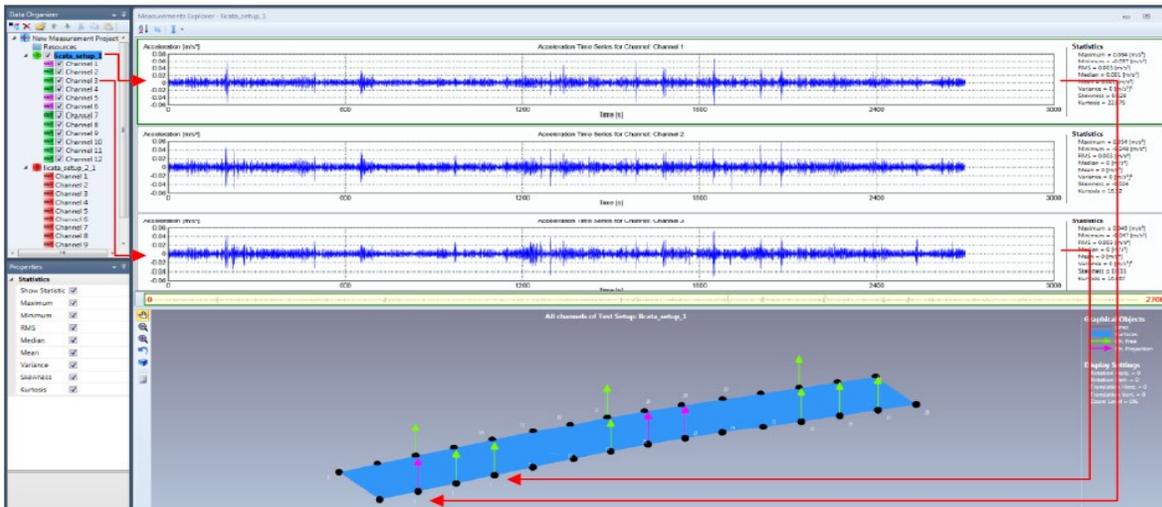
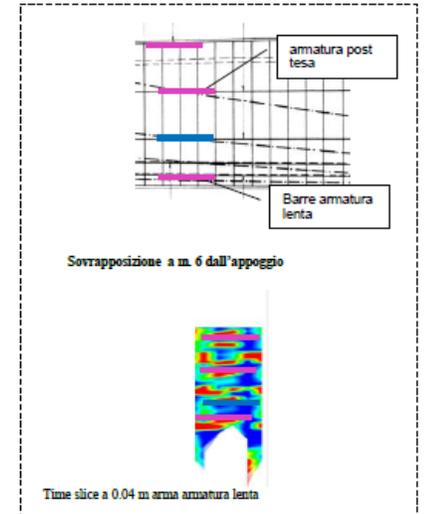
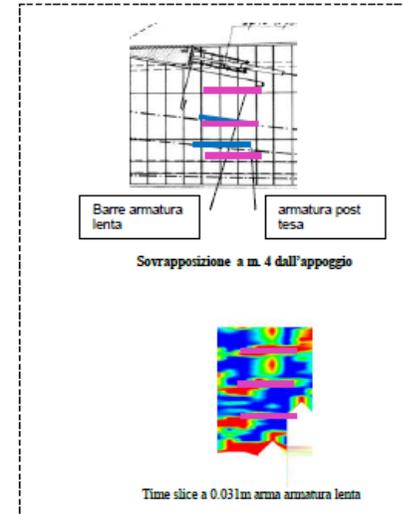
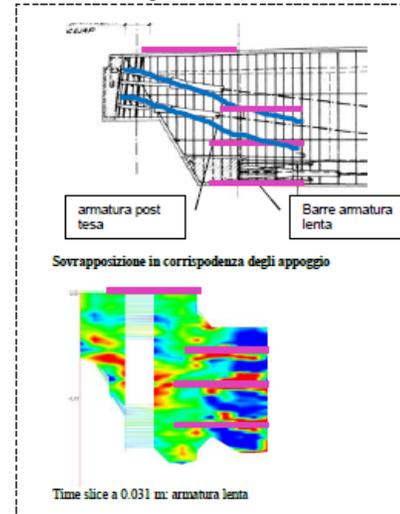
Struttura

Convertitore A/D → **Reg. Segnali e Post Processing**

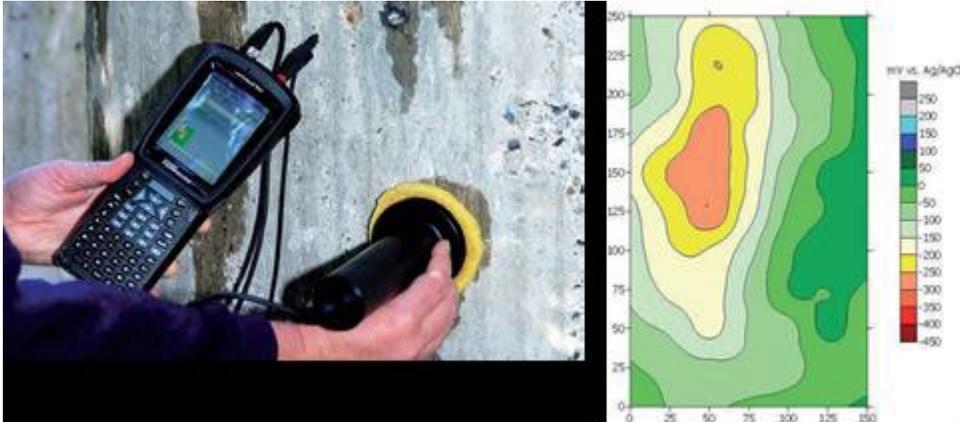
Centralina con convertitore A/D

HW e SW di acquisizione

Campo di prova



Prove in situ – c.a.



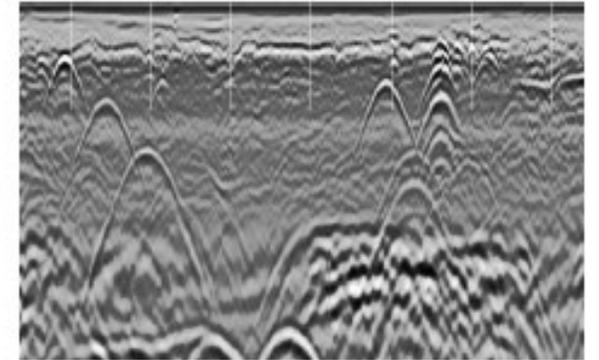
Potenziale di corrosione



Endoscopia

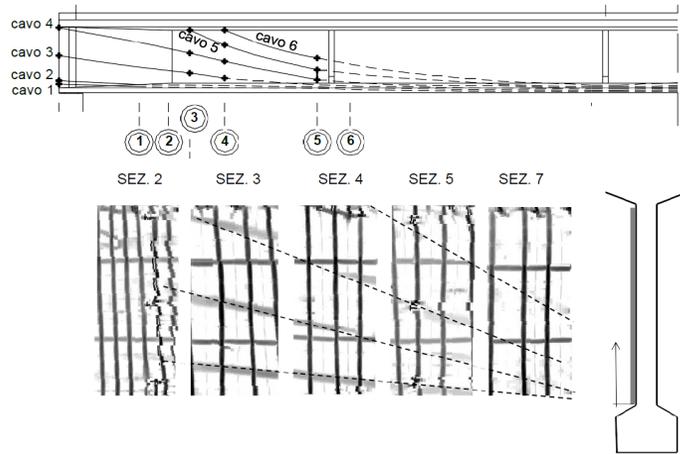


Georadar

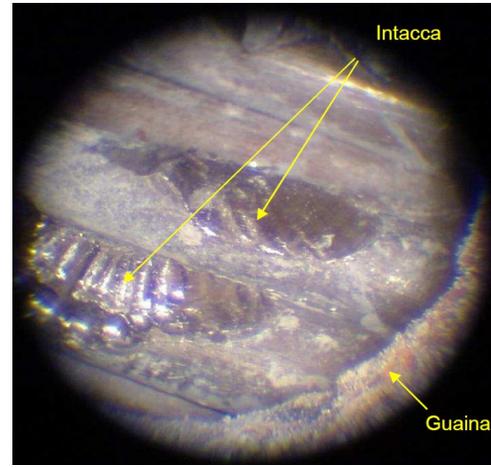


Carotaggi e prelievi di armature, prove indirette

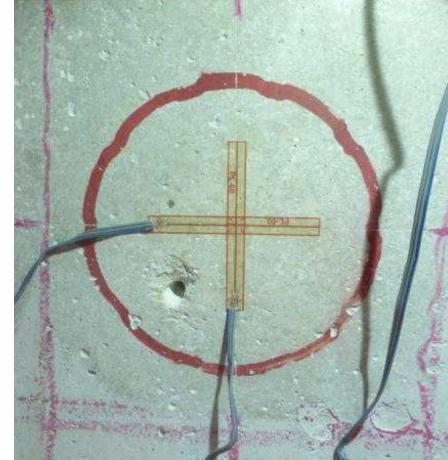
Prove in situ – c.a.p.



Rilievo dei cavi con georadar



Endoscopia

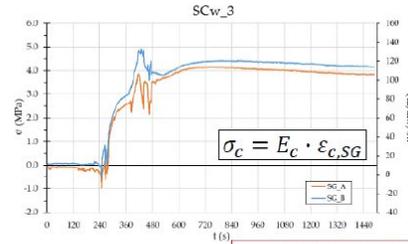
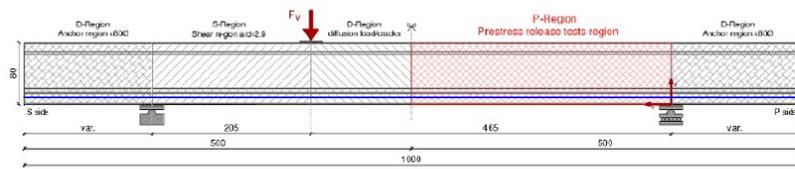


Rilascio tensionale su cls e acciaio



(da Tecnolab srl)

#49 PROVE DI RILASCIO TENSIONALE



NUOVA PROPOSTA UNiBS

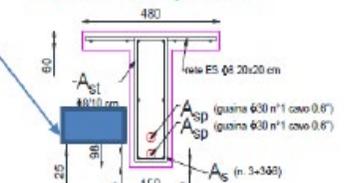


Tratto di cavo inguainato (non iniettato)



Tomografo A1040MIRA

Trave con cavi post-tesi



Tomografia ultrasonica per il rilievo dell'iniezione delle guaine, UNINA



#11 Carote strumentate



#9 Tagli all'intradosso



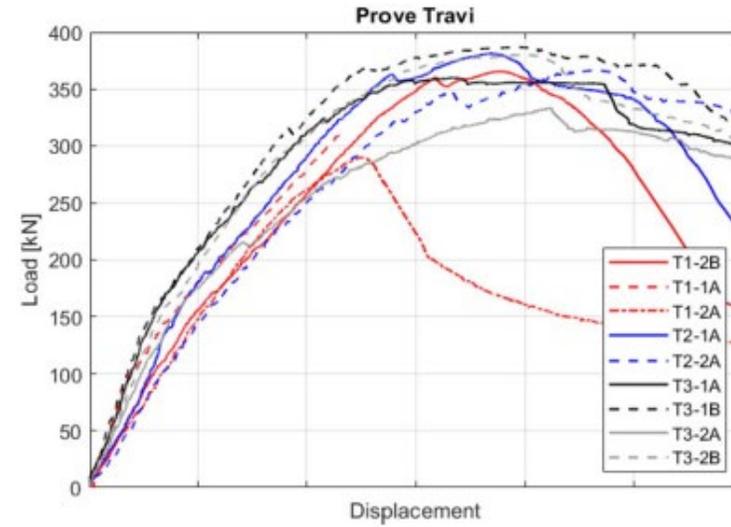
#14 Provini tronco piramidali



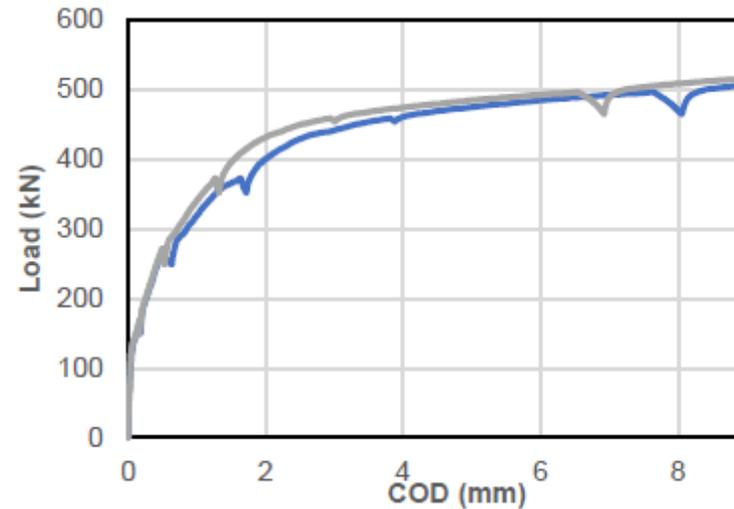
#15 Tagli sull'anima

Sperimentazione UNiBS

Prove sperimentali su elementi strutturali – selle Gerber

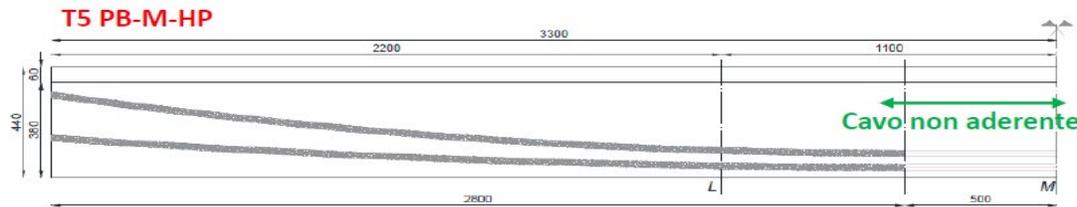
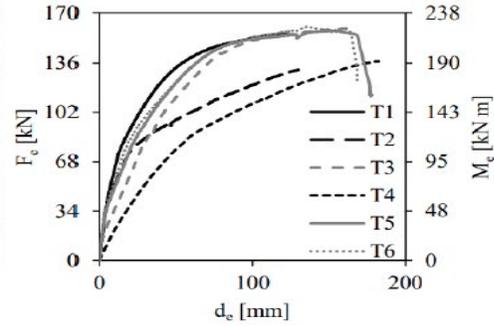


(UNIFI)

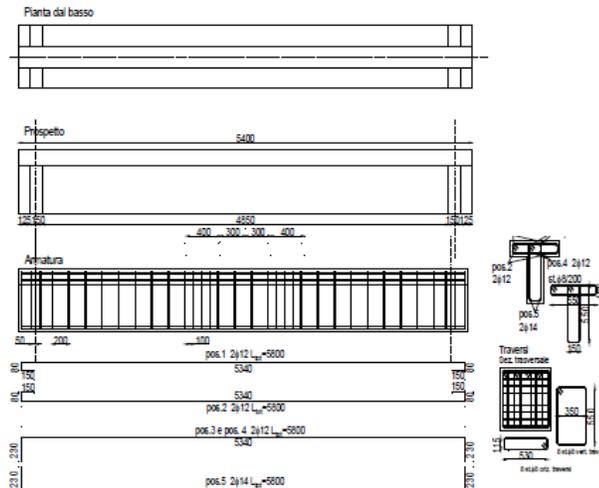


(POLIMI)

Prove sperimentali su elementi strutturali – travi con precompressione interna ed esterna



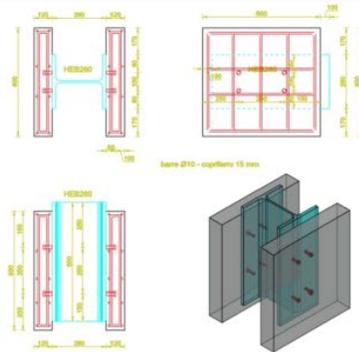
(UNINA)



(UNIPA)

Prove sperimentali su elementi strutturali – UHPC, solette da ponte

Esecuzione prove sperimentali



pioli in solette di CLS ordinario (C35/45)

pioli in solette di CLS a media resistenza (C60/75)

pioli in solette di CLS ad alta resistenza (HPC M130)



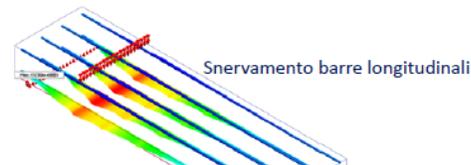
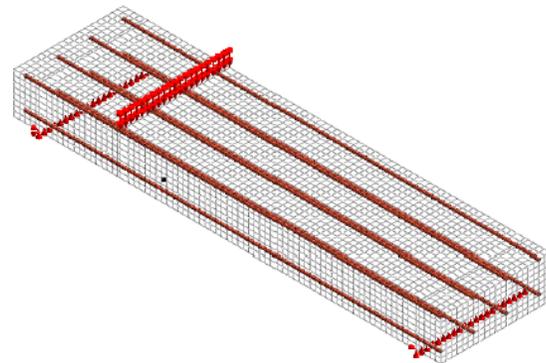
(UNINA-UNISA)

Campagna sperimentale prove a taglio su solette da ponte

- Sperimentazione II gruppo provini (ottobre 2022)
- Interpretazione numerica
- Rottura a taglio preceduta da ampia fessurazione a flessione con **snervamento delle armature longitudinali**



Crack status MIDAS



Snervamento barre longitudinali

(ITC-CNR)

VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STRUTTURALE

Azioni

- Carichi permanenti
- Azioni variabili da traffico (attenzione a merci pericolose)
- Azione sismica
- Azioni idrodinamiche e azioni indotte da frane
- Altre azioni variabili (previste dalle NTC con particolare riferimento alle variazioni termiche particolarmente gravose in alcune strutture iperstatiche)

Fattori parziali di sicurezza nelle azioni di progetto e nelle caratteristiche meccaniche dei materiali

Possono essere ridotti tenendo conto della progressiva riduzione delle incertezze ottenuta dalla corretta esecuzione della campagna conoscitiva (materiali, geometria e modello) e dell'effettivo periodo di riferimento considerato nelle verifiche t_{ref} .

In relazione ai carichi verticali da traffico le decisioni che si possono prendere sono:

- limitare i carichi consentiti;
- prevedere una restrizione all'uso del ponte;
- eseguire interventi volti ad aumentare la sicurezza.

In riferimento ai modelli di carico veicolare e al livello di sicurezza risultante dalle verifiche di Livello 4, le Linee Guida individuano tre distinte situazioni per un ponte:

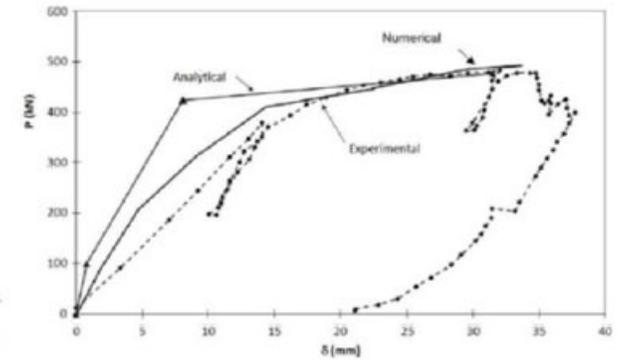
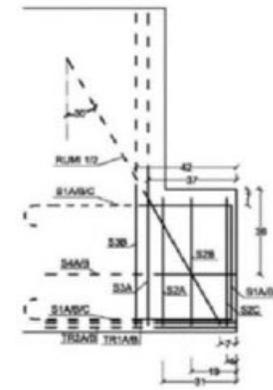
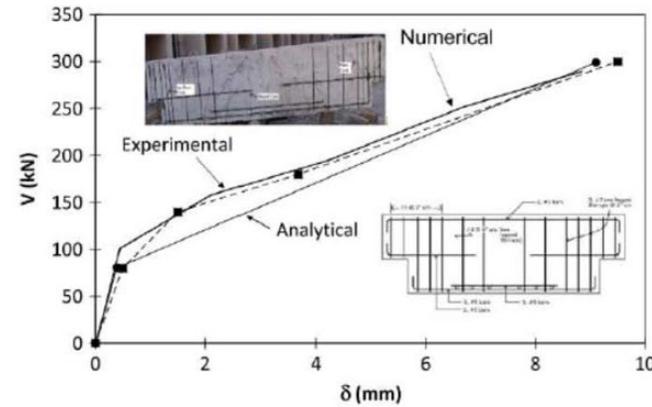
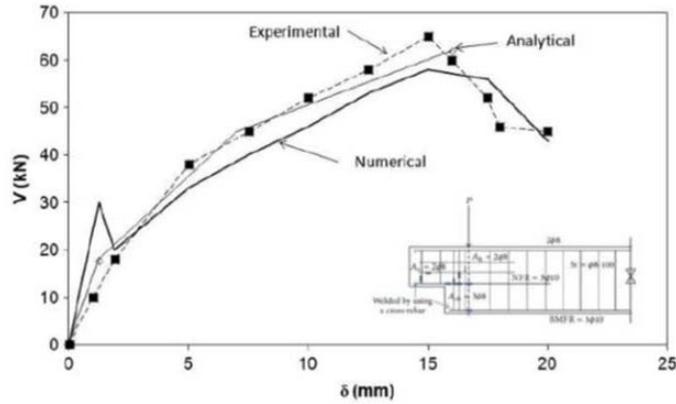
- **ADEGUATO**, se sono soddisfatte le verifiche (sisma, alluvioni e frane) secondo le NTC utilizzando i carichi e i fattori parziali in esse previsti;
- **OPERATIVO**, se sono soddisfatte le verifiche (statica e geotecnica) eseguite secondo le NTC ma facendo riferimento nella valutazione dei fattori parziali relativi ai carichi e ai materiali ad un tempo di riferimento ridotto $t_{ref} = 30$ anni;
- **TRANSITABILE**, se sono soddisfatte le verifiche (statica e geotecnica) eseguite su un t_{ref} 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”. L’arco temporale t_{ref} , equivalente al tempo di progettazione ed esecuzione dei lavori di messa in sicurezza, è ridotto ad un massimo di 5 anni.

In analogia a quanto già previsto dalle NTC 2018 e Circolare 2019, la valutazione della sicurezza dovrà essere svolta con la quantificazione del **parametro** ζ_E quale rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (periodo proprio, fattore di comportamento ecc.). Tuttavia, sempre come previsto dalla norma tecnica vigente, deve essere valutata in primis la sicurezza statica attraverso il **parametro** $\zeta_{V,i}$ 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.

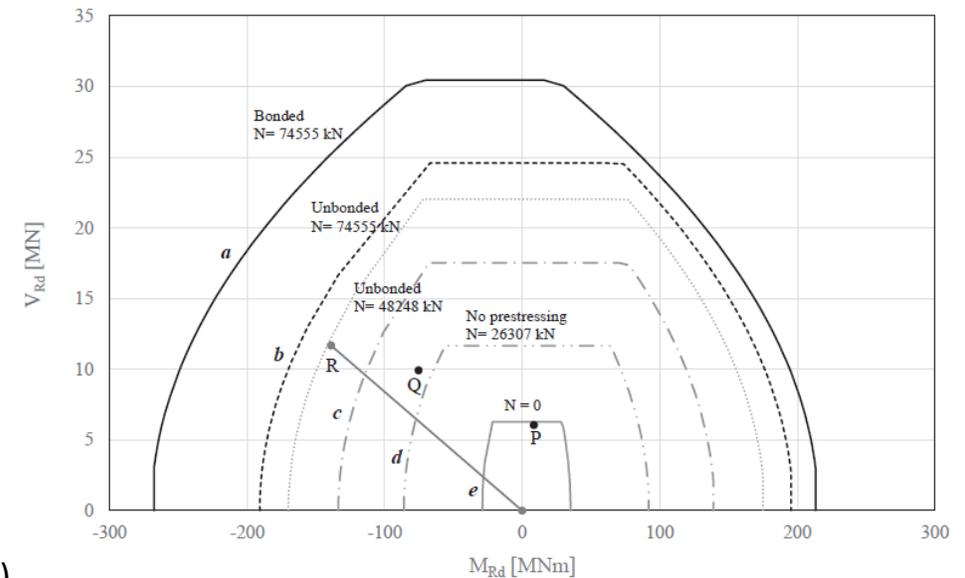
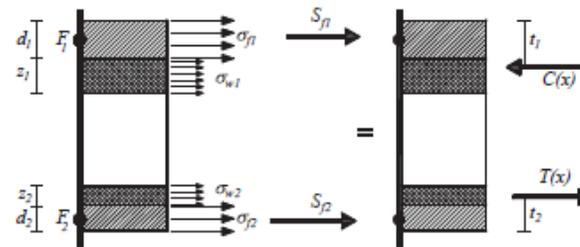
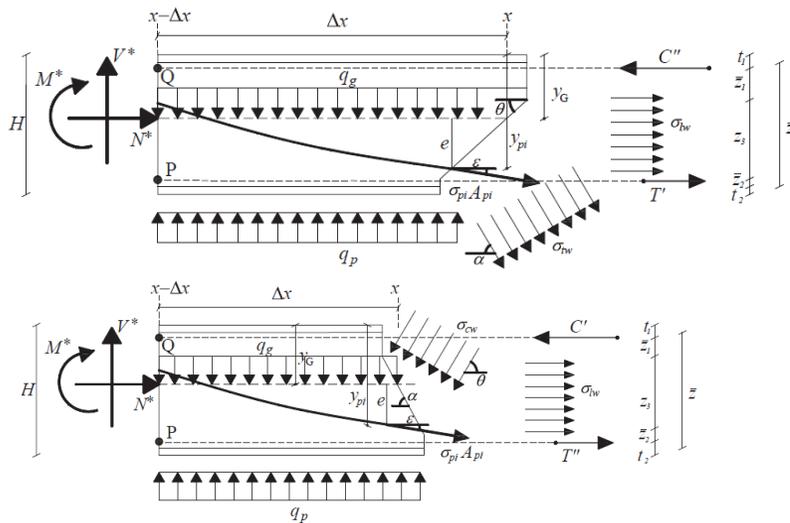
Il calcolo del parametro ζ_E è previsto per le sole valutazioni del livello di sicurezza secondo le Norme Tecniche vigenti -Adeguamento-, ma non nei livelli successivi -Operatività e Transitabilità- i quali si concentrano sulla valutazione di sicurezza nei confronti delle sole azioni statiche e geotecniche.

Sono previste, oltre che analisi e verifiche per carichi statici e per azioni sismiche, le verifiche di sicurezza nei confronti di alluvioni e frane.

Modelli analitici



Modello strut-and-tie per selle Gerber degradate, modificato con valutazione della deformazione (UNIPA)



Modello di interazione N-M-V per travi precomprese bonded e unbonded (UNIME-UNIPA)

Modelli numerici a livello globale di struttura

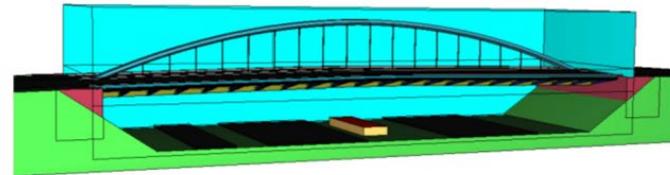
Scenario di incendio naturale

(UNITN)

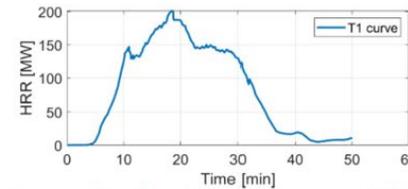


Scenario di incendio (Camion – Centrale)
Sovrappasso n°113 Mantova Sud

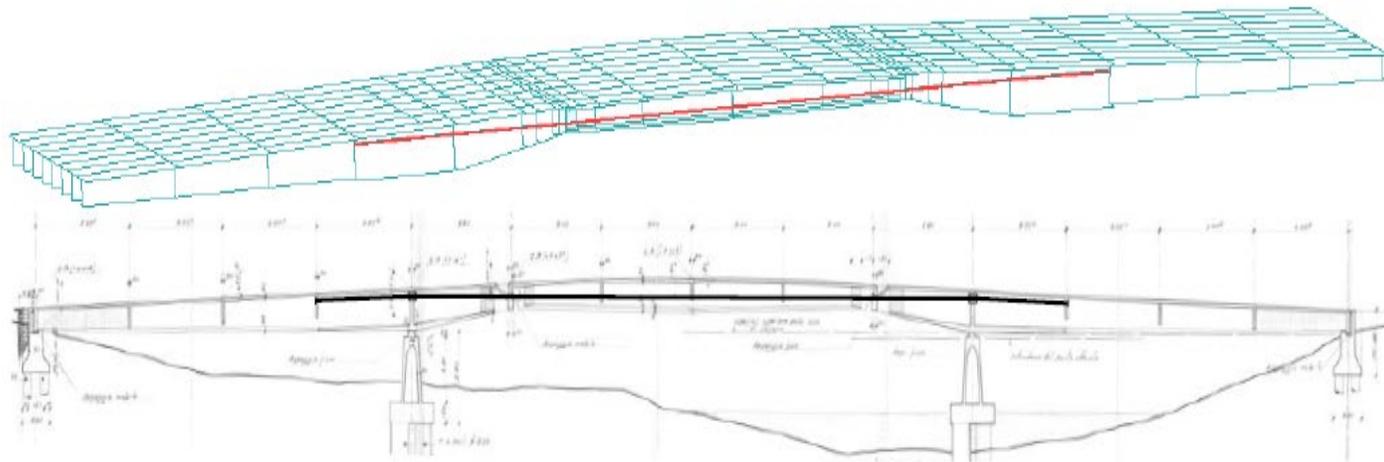
Modello BIM



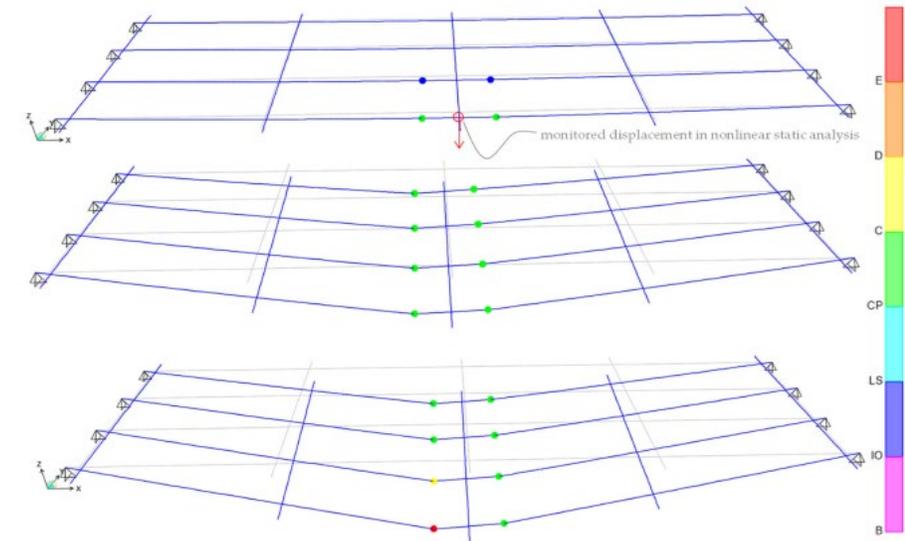
Modello CFD agli elementi finiti – Ambiente FDS



Curva di rilascio termico considerata
(Camion con pallet di legno e plastica)

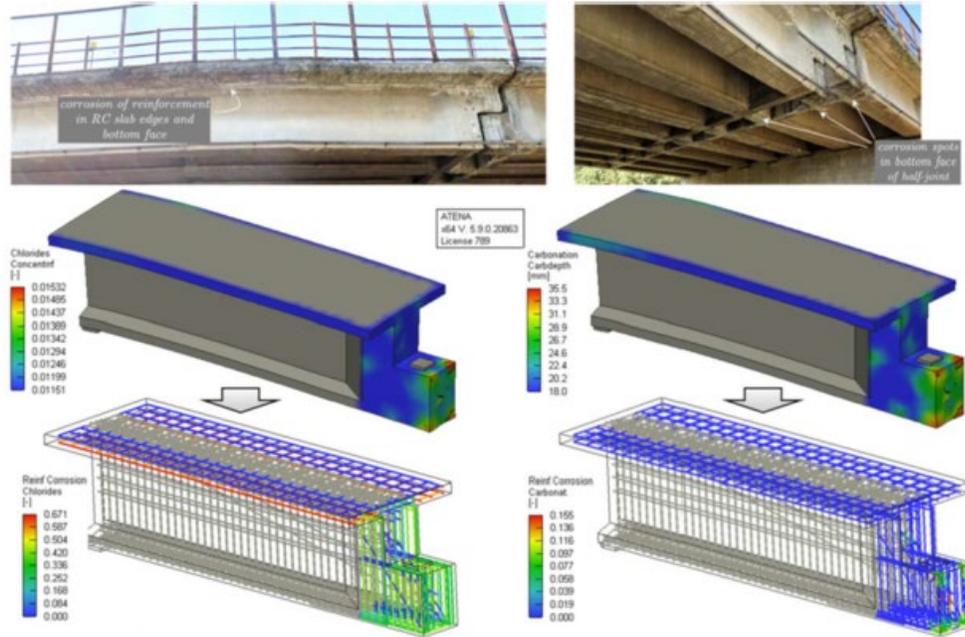


Modelli globali per inserimento del rinforzo tramite precompressione esterna (UNIPA)

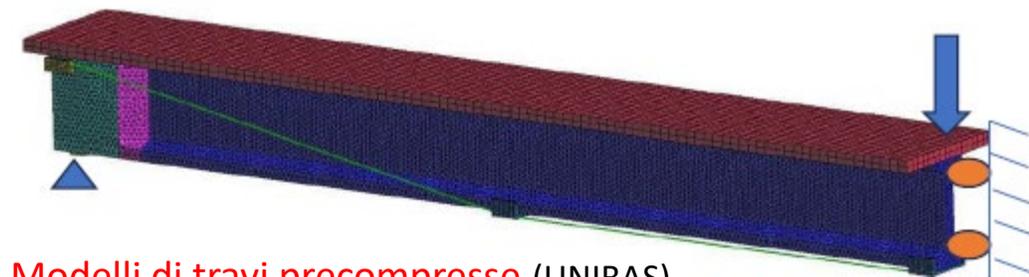


Analisi pushdown su graticci (UNIME)

Modelli numerici a livello di elemento strutturale



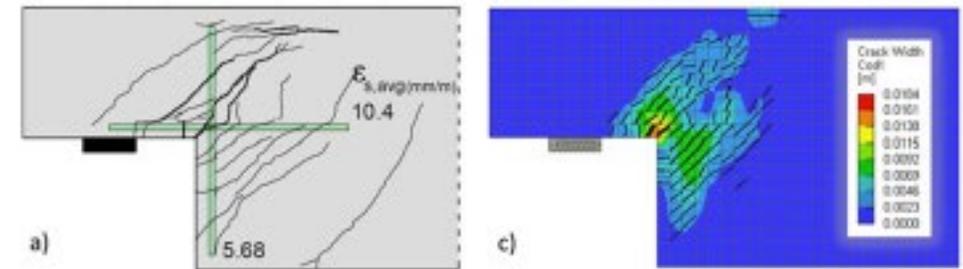
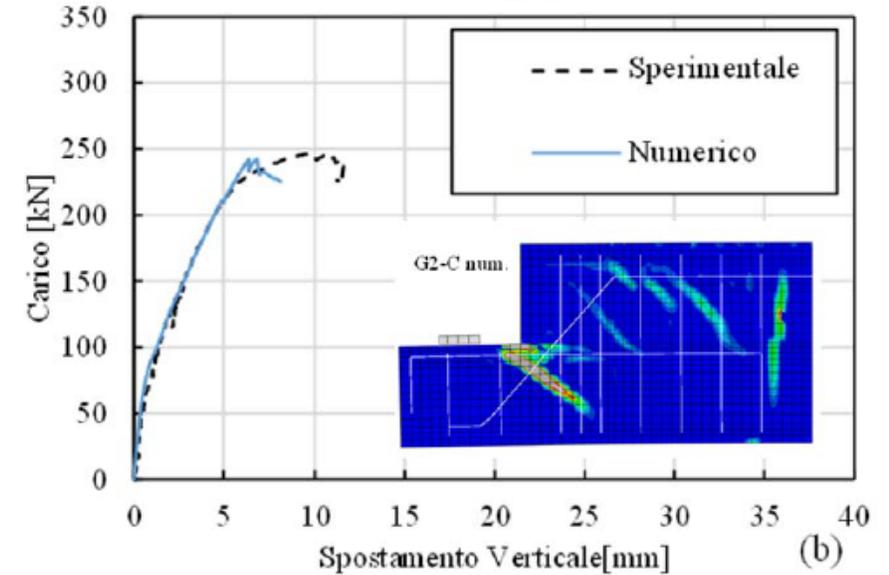
Modelli di selle Gerber (UNIME)



Modelli di travi precomprese (UNIBAS)

FEM selle Gerber corrose

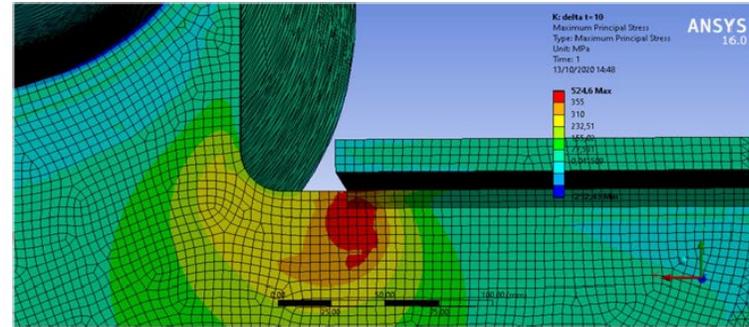
G2-C



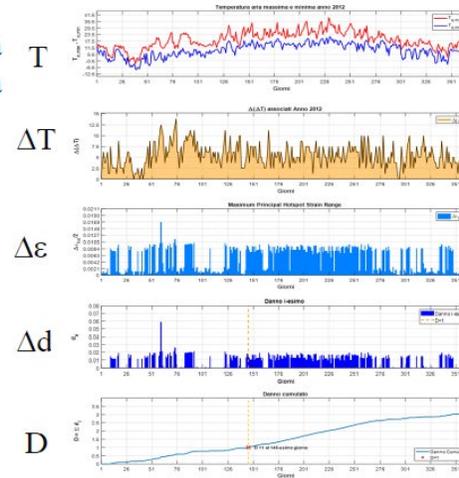
Modelli di selle Gerber corrose (UNIPR)

Modelli numerici di dettaglio

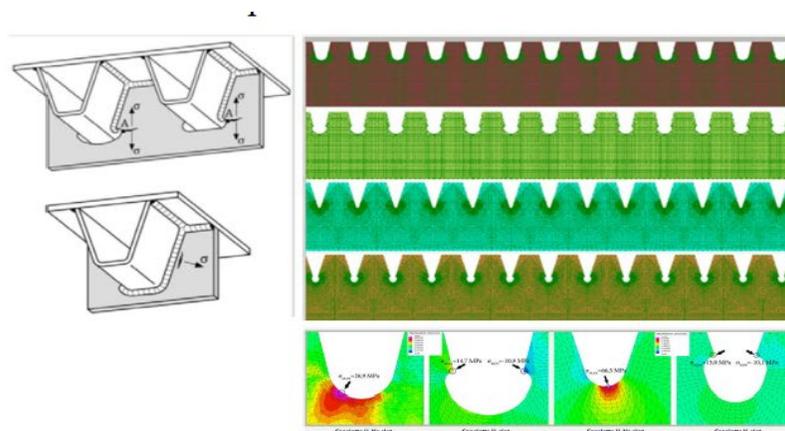
Evoluzione del danno a partire dalla storia temporale di temperatura



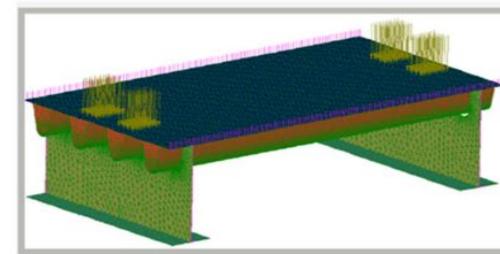
Modello FEM hot spot con materiale non lineare (DNV-RP-C208)



Modelli di evoluzione del danno per esposizione a temperature da incendio (UNIGE)



Progetto di un provino per prove a fatica
 ✓ definizione della geometria
 ✓ analisi FEM propedeutica



Modelli di valutazione degli effetti della fatica nelle connessioni saldate (UNIGE)

La sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti - Roma, 24 e 25 ottobre 2023

PROGETTO DELL'INTERVENTO

Eventuali livelli di sicurezza sismica o idraulica insoddisfacenti richiedono una appropriata programmazione di interventi di miglioramento o adeguamento come previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni e dalla Circolare esplicativa, da stabilire sulla base di una pluralità di fattori quali la gravità dell'inadeguatezza e le conseguenze che questa comporterebbe anche in termini di incolumità pubblica, etc.

Livelli di sicurezza insoddisfacenti nei riguardi delle azioni non sismiche, invece, necessitano di attenzione immediata in quanto legati all'usuale condizione di esercizio del ponte.

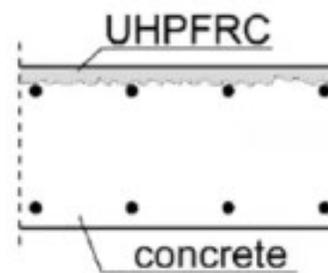
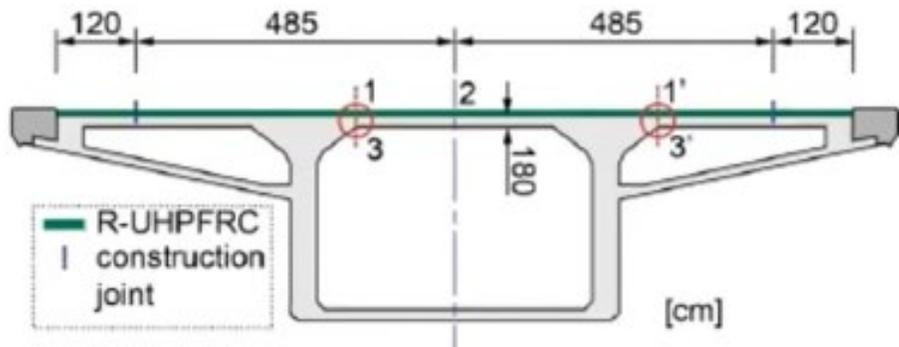
Interventi di rinforzo - placcaggi



Interventi di rinforzo – precompressione esterna



Interventi di rinforzo – jacketing e UHPC



Schemi rinforzo UHPC (tratti da presentazione G. Plizzari, UNIBS)

La **ricerca** sulle diverse fasi che caratterizzano la valutazione della sicurezza dei ponti in c.a. e c.a.p. è di fondamentale importanza:

- Ricerca documentale sulle diverse tecniche costruttive del passato soprattutto per la tecnologia dei sistemi di precompressione;
- Sperimentazione svolta su elementi strutturali in scala o al vero, sia per migliorare le tecniche di indagine in situ, sia per avere riscontri o per meglio indirizzare le modellazioni prima e dopo l'intervento di rinforzo;
- Modellazioni condotte dalle diverse Unità di Ricerca che consentono utili confronti (blind test, confronti tra modelli globali e modelli di dettaglio, ecc.) per la definizione di modelli rappresentativi del comportamento reale e che soprattutto siano in grado di cogliere gli aspetti specifici di interesse.

La valutazione della sicurezza può essere supportata da sistemi di monitoraggio.