



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

**Convegno**

***La sperimentazione delle  
Linee Guida per i ponti esistenti***

*Roma, 24 e 25 ottobre 2023*

## **I sistemi in cemento armato precompresso**

*Maria Rosaria Pecce  
Università di Napoli Federico II*



**Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale**

## I ponti realizzati in calcestruzzo armato precompresso

I ponti in c.a.p. rappresentano la maggior parte delle opere realizzate in Italia

Problematiche per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti l'analisi :

-Materiali e tecniche costruttive

- Difetti (perdita di precompressione, difetti di iniezione, corrosione)

- Prove in sito per la definizione del tracciato dei cavi, per la misura del livello di precompressione, per il rilievo di difetti

- Modelli per la valutazione del comportamento strutturale e della resistenza

### WP4 – Task 4.3 Sistemi in c.a.p. :

Responsabile Maria Rosaria Pecce

Nominativo (responsabile ur)	Affiliazione
<i>Maria Rosaria Pecce</i>	Università di Napoli Federico II
<i>Daniele Losanno</i>	Università di Napoli Federico II
<i>Giovanni Plizzari</i>	Università di Brescia
<i>Antonino Recupero</i>	Università di Messina
<i>Lidia La Mendola</i>	Università di Palermo
<i>Beatrice Belletti</i>	Università di Parma
<i>Ivo Vanzi</i>	Università di Chieti
<i>Camillo Nuti</i>	Università di Roma3
<i>Alberto Pavese</i>	Università di Pavia
<i>Gian Michele Calvi</i>	IUSS Pavia
<i>Fabio Germagnoli / Paolo Dubini</i>	Eucentre

**Sono in corso molte attività di ricerca che si arricchiscono dei dati dei casi studio che forniscono un quadro ampio di tipologie e difetti**

## **Percorso della conoscenza per le strutture esistenti nel caso del c.a.p.**

**Analisi storico - critica** - si presenta complessa per l'evoluzione della tecnologia

E' necessario avere informazioni su:

brevetti e tecniche di realizzazione dagli anni '50 - maggiore uniformità dagli anni '70-'80

calcestruzzo, acciaio da armatura, acciaio e tipo di cavi /barre di precompressione

ancoraggi nel c.a.p. post-teso

tecniche di realizzazione (in sito con getto unico o conci a piè d'opera), schemi di montaggio dei conci (stampella auto equilibrata)

tipi di appoggio

selle Gerber

...

In assenza di progetto si deve mettere a punto una procedura di progetto simulato

Si sta lavorando su tutti questi aspetti

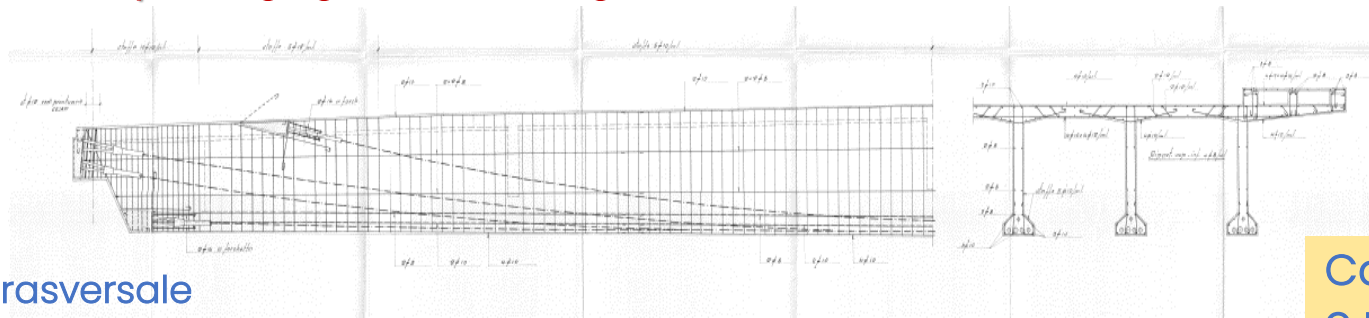
### §3.6 ISPEZIONI SPECIALI

... Nella pianificazione delle ispezioni speciali, priorità deve essere data ai ponti in c.a.p. a cavi post-tesi la cui **costruzione risale agli anni '60/'70** e comunque a quelli per cui si rileva un avanzato e **rilevante stato di degrado**. I ponti di calcestruzzo armato precompresso a cavi post-tesi sono strutture particolarmente critiche, in quanto né le tecniche di indagine convenzionali e ancor meno le ispezioni visive consentono di fornire un quadro conoscitivo adeguato sulle loro reali condizioni di degrado.

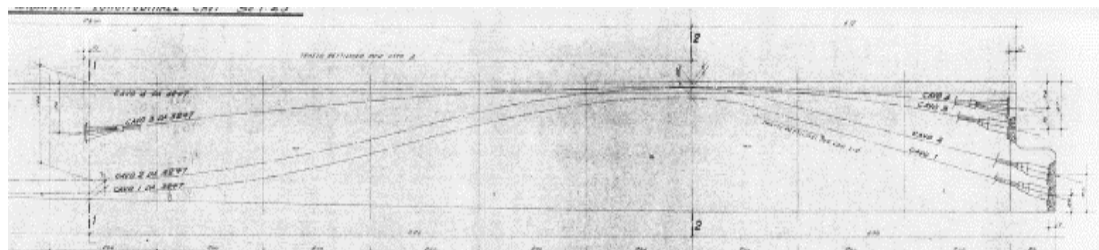
#### Sub-Task 4.3.1 – Stato dell'arte (contributo di tutte le Unità che partecipano al TASK)

E' importante per le ispezioni e per le verifiche di Livello 4 avere un quadro delle tecnologie di precompressione che si possono incontrare perché difetti, indagini da svolgere, verifiche da effettuare sono strettamente dipendenti dalla tecnologia. Si sta lavorando con tutte le UR che partecipano ad una ricostruzione delle informazioni sulle varie tecnologie mediante la consultazione di testi storici e l'analisi di casi studio.

Da lavoro svolto si metteranno a punto schede sintetiche su vari elementi del precompresso a cavi scorrevoli e si catalogheranno diverse tecnologie a cui corrispondono anche difetti tipici. La sintesi dei risultati è uno **strumento importante per ingegneri ed enti gestori**.

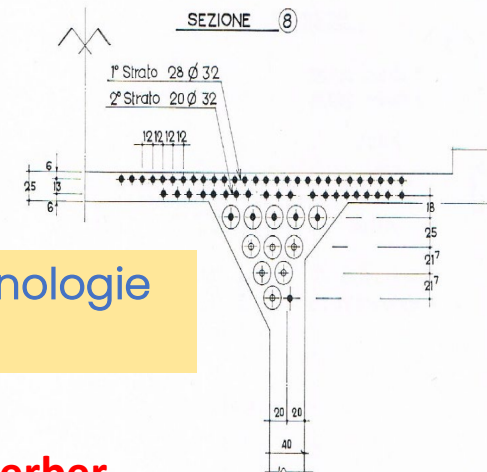


Schemi continui  
Precompressione trasversale



Catalogo tecnologie  
e modalità  
costruttive!

Intersezione con il Task 4.2 su selle Gerber  
e task 4.1 su dispositivi di appoggi

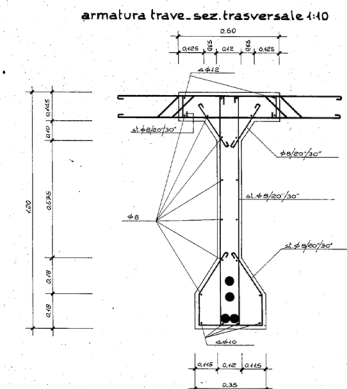


Progetto simulato

SCHEMA SEZIONE				GEOMETRIA SEZIONE				CARATTERISTICHE MATERIALI							
				Trave		Soletta		CLS Trave		CLS Soletta		Acciaio Lento		Acciaio Precompressione	
				H <sub>tot</sub> [m]	1,50	b <sub>soletta</sub> [m]	1,50	R <sub>ck</sub> [MPa]	48	R <sub>ck</sub> [MPa]	48	f <sub>tk</sub> [MPa]	540	f <sub>ptk</sub> [MPa]	1860
				b <sub>sup</sub> [m]	0,50	h <sub>soletta</sub> [m]	0,30	f <sub>ck</sub> [MPa]	40	f <sub>ck</sub> [MPa]	40	f <sub>yk</sub> [MPa]	450	f <sub>p(0,1)k</sub> [MPa]	1670
				b <sub>inf</sub> [m]	0,50	A <sub>soletta</sub> [m <sup>2</sup> ]	0,45	f <sub>cm</sub> [MPa]	48	f <sub>cm</sub> [MPa]	48	E <sub>s</sub> [MPa]	210000	E <sub>s</sub> [MPa]	201000
				t <sub>sup</sub> [m]	0,20			f <sub>ctm</sub> [MPa]	3,51	f <sub>ctm</sub> [MPa]	3,51	n [-]	5,96	n [-]	5,71
				t <sub>inf</sub> [m]	0,30			f <sub>ctk</sub> [MPa]	2,46	f <sub>ctk</sub> [MPa]	2,46				
				t <sub>w</sub> [m]	0,12			E <sub>cm</sub> [MPa]	35220,46	E <sub>cm</sub> [MPa]	35220,46				
				h <sub>racc.sup</sub> [m]	0,00			Parametri a tempo t [gg]				Tensioni limite			
				h <sub>racc.inf</sub> [m]	0,00			CLS Trave		CLS Soletta		σ <sub>ci,min</sub> [MPa]		-3,51	
				h <sub>w</sub> [m]	1,00			t [gg]	7	t [gg]	7	σ <sub>ci,max</sub> [MPa]		40	
				A <sub>trave</sub> [m <sup>2</sup> ]	0,37			f <sub>ck</sub> (t) [MPa]	24,83	f <sub>ck</sub> (t) [MPa]	24,83	σ <sub>cf,min</sub> [MPa]		0,00	
				Prop. SOLO TRAVE		Prop. SEZ. COMPOSTA		s [-]	0,38	s [-]	0,38	σ <sub>cf,max</sub> [MPa]		40	
				I <sub>0,tot</sub> [m <sup>4</sup> ]	0,1070	I <sub>0,tot</sub> [m <sup>4</sup> ]	0,2942	β <sub>cc</sub> (t) [-]	0,684	β <sub>cc</sub> (t) [-]	0,684				
				W <sub>trave.inf</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,1532	W <sub>trave.inf</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,2410	f <sub>cm</sub> (t) [MPa]	32,83	f <sub>cm</sub> (t) [MPa]	32,83				
				W <sub>trave.sup</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,1336	W <sub>trave.sup</sub> [m <sup>3</sup> ]	1,0534	E <sub>cm</sub> (t) [MPa]	31425,74	E <sub>cm</sub> (t) [MPa]	31425,74				
						W <sub>soletta.sup</sub> [m <sup>3</sup> ]	0,5078	n [-]		n [-]	1				

Approccio semplificato per valutare cavo risultante ed eccentricità

Confronto con diversi progetti



Analisi delle tipologie di ancoraggio «storiche» e rassegna dei principali brevetti

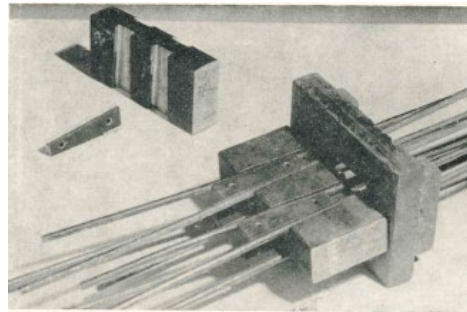
Mobili (di tiro)  
Fissi

a cuneo; con bussola a trazione e a pressione;  
con testate ricalcate (BBRV);  
con filettatura e dadi (Dywidag-Finsterwalder);  
per aderenza; a cappio

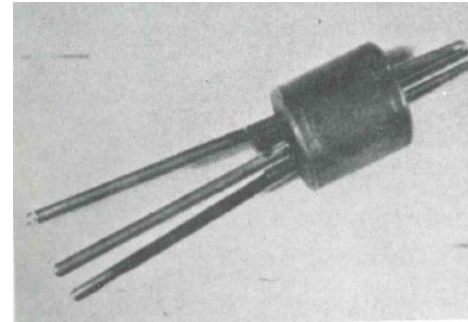
Per fili  
Per trefoli  
Per barre



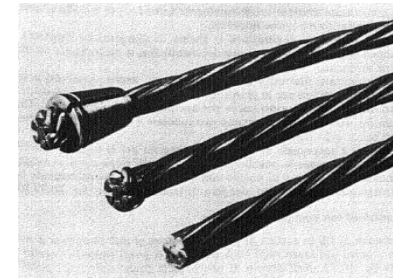
Freyssinet



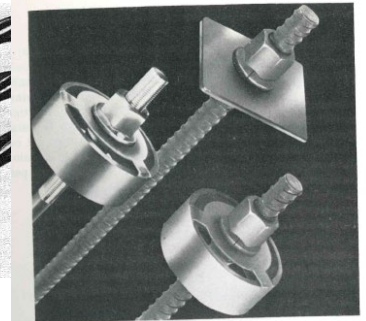
Magnel-Blaton



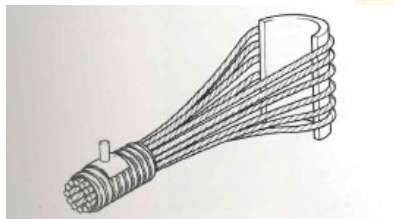
Morandi



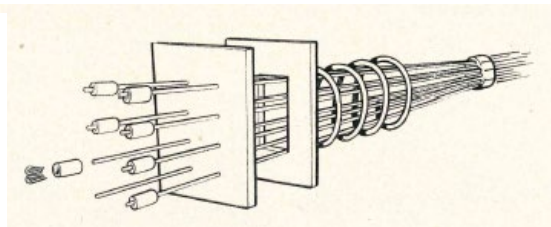
BBRV



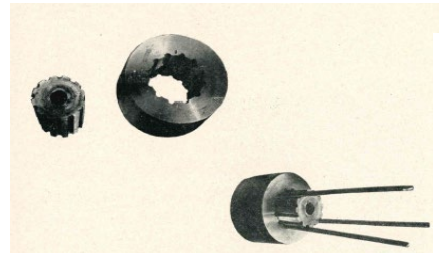
Ancoraggio  
Dywidag-Finsterwalder



STUP



Seven Strand



Rinaldi

Tabella tipo TESTATE DI ANCORAGGIO SISTEMI POST-TESI

Esempio

**Sistema Freyssinet:** Immagine; descrizione sintetica del sistema; anno di brevettazione/inizio commercializzazione in Italia; anni di diffusione; dettagli testata di ancoraggio (piastra/contropiastra/armatura di frettaggio/posizione tipo in soletta/in testata)

Esempi di applicazioni (ponti vari)

**Criticità:** difetti di iniezione in testata (es. innesco corrosione armatura frettaggio); piastre direttamente esposte all'esterno; corrosione, ecc.

**Possibili effetti strutturali del degrado** (anche di diversa entità o modeste): perdita di aderenza in testata, schiacciamento locale del cls, penetrazione della corrosione.

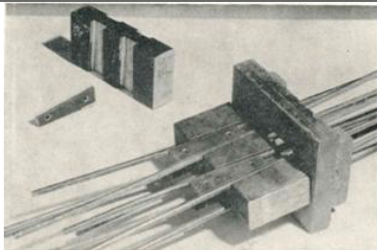
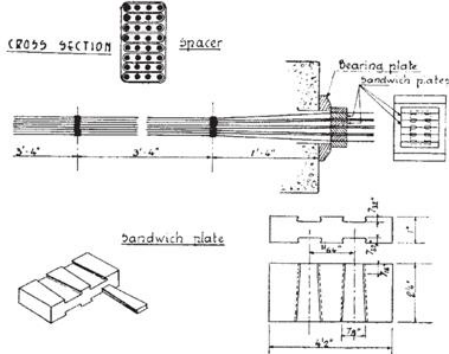
Indagini e Ispezioni suggerite/necessarie

Esempi di casi reali degradati/danneggiati

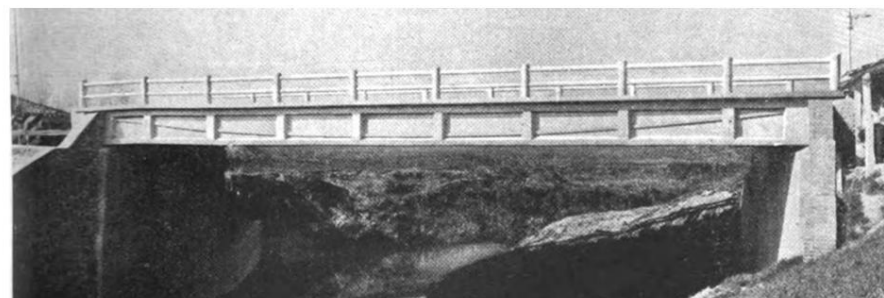
Esempio scheda

Oltre 70 brevetti di dispositivi di ancoraggio già nel 1962 !

# Esempio scheda ancoraggio

<b>Nome del sistema</b>	Magnel/Blaton
<b>Inventore</b>	A. Blaton e E. Blaton (G. Magnel)
<b>Anno di pubblicazione brevetto</b>	1944
<b>Principale periodo di utilizzo</b>	1947-1960circa
<b>Reperibilità di un brevetto depositato</b>	<a href="https://patentimages.storage.googleapis.com/30/64/89/c47173e9bc447e/US2637895.pdf">https://patentimages.storage.googleapis.com/30/64/89/c47173e9bc447e/US2637895.pdf</a>
<b>Breve descrizione del sistema</b>	
<b>1) Azione esercitata</b>	A cuneo
<b>2) Elemento tesato</b>	Fili
<b>3) Principali caratteristiche</b>	Sistema di ancoraggio con azione a cuneo. Impiega un blocco di ancoraggio standard da 8 fili, che possono avere un diametro di 5 o 7 mm. Tale sistema permette di formare cavi composti da un gran numero di fili (fino a 64 fili $\phi 7$ ). L'ancoraggio è formato da una piastra di ripartizione solidale al calcestruzzo, opportunamente forata per lasciar passare i fili. Su questa piastra ne viene disposta un'altra, detta piastra sandwich, dotata di quattro scanalature a forma di cuneo, in ognuna delle quali sono fissati due fili con un cuneo d'acciaio, che quindi vengono tirati insieme.
<b>Immagini del sistema di ancoraggio</b>	
	
<b>Applicazioni note in Italia</b>	

Nome e località Ponte <sup>1</sup>	Anno	Schema statico	Luce max
Ponte sul Samoggia (BO)	1950	Travata semplicemente appoggiata	26 m



## Possibili criticità del sistema<sup>2</sup>

- Difetto 1. Possibile infiltrazione di acqua in corrispondenza degli ancoraggi di estremità a causa della non corretta esecuzione del tampone di ricoprimento.
- Difetto 2. Possibile carbonatazione della malta di iniezione, dal momento che all'epoca di realizzazione non si utilizzavano superfluidificanti.

## Riferimenti bibliografici

- T. Antonini, Cemento armato precompresso, Masson Italia Editori, 1986.
- C. Cestelli-Guidi, Cemento armato precompresso, Hoepli, 1987.
- CIRIA Report 106 - Post-tensioning systems for concrete in the UK: 1940-1985, in: n.d.
- G. Rinaldi, La pratica del cemento armato precompresso, Vitali e Ghianda, 1962.
- L.R. Taerwe, Contributions of Gustave Magnel to the development of prestressed concrete, Spec. Publ. 231 (2005) 1-14.

Si svilupperanno schede per ancoraggi, cavi, appoggi, ecc...

Ispezioni e prove in sito

**3.6 ISPEZIONI SPECIALI**

... D'altro canto, il degrado del calcestruzzo e la corrosione dell'armatura di precompressione possono generare importanti problemi di affidabilità, compromettendo l'effettiva capacità portante della struttura. Occorre pertanto eseguire **ispezioni speciali secondo le modalità operative descritte nel dettaglio al § 7.4.3.1**; esse sono mirate

- all'individuazione del tracciato dei cavi e alla localizzazione di eventuali vuoti o difetti mediante la raccolta dei documenti originari di progetto e la redazione ed **esecuzione** di un piano di **indagini non distruttive** (ad esempio indagini pacometriche, Indagini Georadar, Tomografie ultrasoniche, tecniche di Impact-Echo, tecniche di indagine basate sul metodo di dispersione del flusso magnetico (MFL – Magnetic Flux Leakage), metodi elettrochimici di misura del potenziale di corrosione) e
- alla valutazione del grado di difettosità mediante la progettazione ed esecuzione di un piano di **indagini semi-distruttive** (ad esempio prove endoscopiche, prove vacuometriche, saggi localmente distruttivi, valutazione dello stato di tensione del filo o del calcestruzzo, prelievo di materiale di iniezione su cui eseguire prove chimiche).

**Sub-Task 4.3.2 – Tecniche di diagnostica** → **interazione con Task 3.2**

Le unità stanno applicando diverse tecniche per

- diagnosticare **difetti dei cavi (iniezioni, corrosione)** o
- rilevare lo **stato di precompressione** (prove di rilascio)

Mettere a punto la diagnostica sul precompresso è molto importante per dare indicazioni sulle indagini speciali di cui si fa cenno nelle Linee Guida



**Difetti delle travi in cap a cavi post-tesi soprattutto realizzati negli anni '60-70**

Si tratta di difetti occulti che possono portare al degrado del cavo, alla perdita di precompressione, alla perdita di resistenza ultima a flessione e quindi alla crisi improvvisa

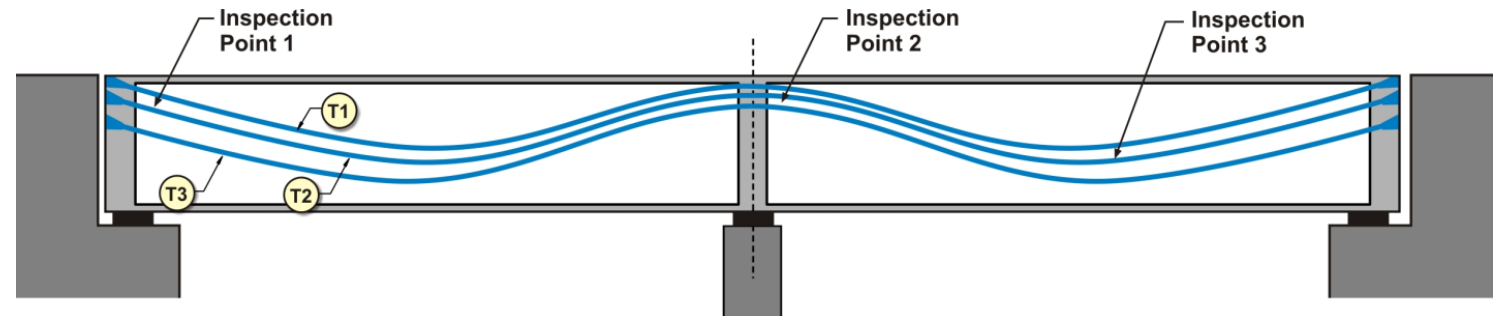
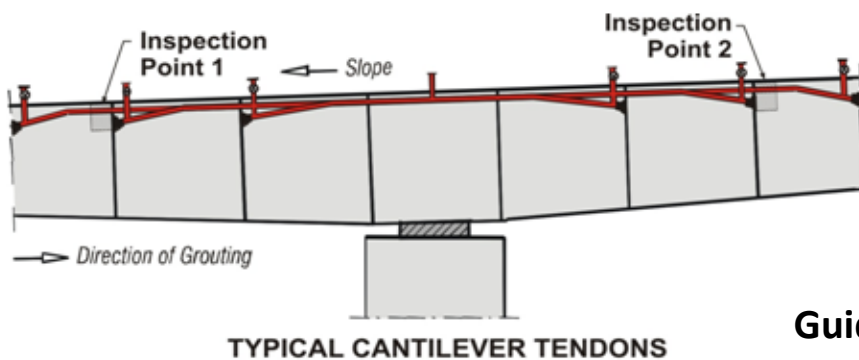
**Difetti di iniezione di malta : influenza sull'aderenza e in alcuni casi si favorisce il fenomeno di corrosione**



In alcuni casi il difetto di malta non comporta la corrosione perché l'ossigeno nella guaina non è sufficiente e l'acqua è assente

La probabilità di riscontrare il difetto è diversa secondo la struttura e la zona  
Dipende anche dalla sagomatura dei cavi e dalla tecnica di iniezione

Il numero e la collocazione dei saggi possono essere meglio focalizzati



Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts Publication No. FHWA-HRT-13-028

U.S. Department of Transportation

# Prove Sperimentale

## Prove a taglio

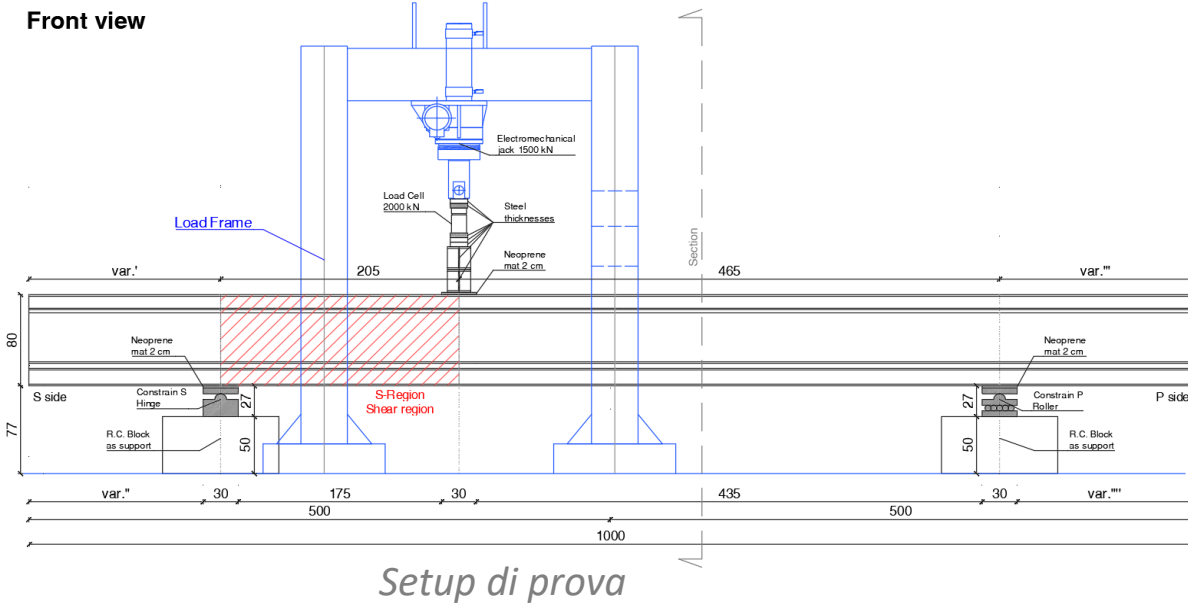


### #4 TRAVI IN C.A.P.

#4 Travi – prove a taglio	
Sezione trasversale	I - Beam
Altezza	80 cm
Lunghezza	10 m
Materiale	C50/60
a/d	2.9

Armatura	
Trasv.	2 $\varnothing 8/30$
Long.	Trave A: 4 $\varnothing 8 - \rho = 0,08\%$
	Trave B: 4 $\varnothing 8 + 2 \varnothing 26 - \rho = 0,5\%$
	Trave C: 4 $\varnothing 12 - \rho = 0,18\%$
Trefoli	$\varnothing = 6/10 \text{ in.} = 15.2 \text{ mm}$

Tipologia	Quantità	Precompressione	
Trave A	1	Pre-Tens.	100%
Trave B	1	Pre-Tens.	70%
Trave C	2	Post-Tens.	Variabile 60%÷100%



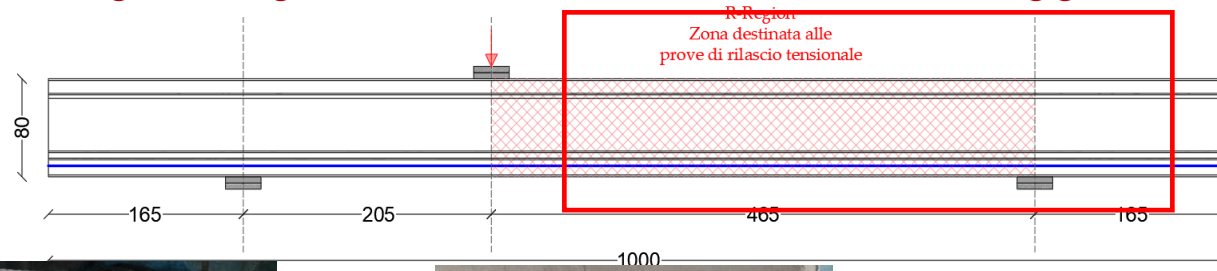
La valutazione della resistenza a taglio delle travi in precompresso è un problema aperto

L'effetto delle precompressione in alcuni casi è determinante perché e staffe e la sezione in c.a. non sono sufficienti

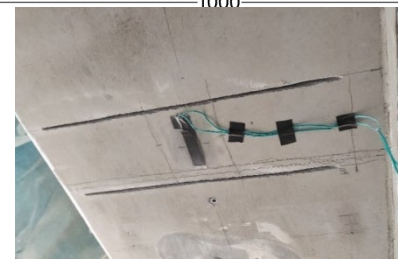
In alcuni casi la verifica può essere insoddisfatta spostandosi verso il centro poiché in alcuni progetti si considerava un carico da traffico distribuito e quindi non c'era l'effetto del carico concentrato dovuto attualmente agli assi

## Prove di detensionamento

Metodo	Livello di invasività
Apertura di fessura e riapertura di fessura	Distruttivo
Taglio del trefolo	Distruttivo
Prove Dinamiche	Non-Distruttivo
Valutazione della freccia	Non-Distruttivo
Carotaggio	Semi-Distruttivo
Tagli all'intradosso	Semi-Distruttivo
Martinetto piatto	Semi-Distruttivo
Tronco di piramide	Semi-Distruttivo



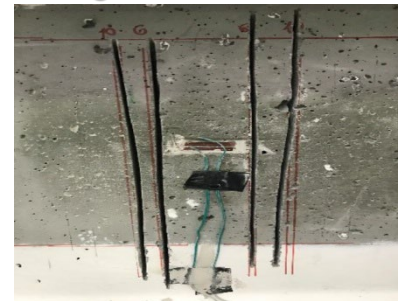
Carotaggio



Tagli all'intradosso



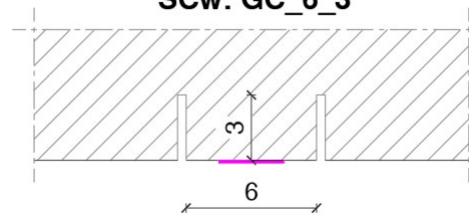
Provini tronco piramidali



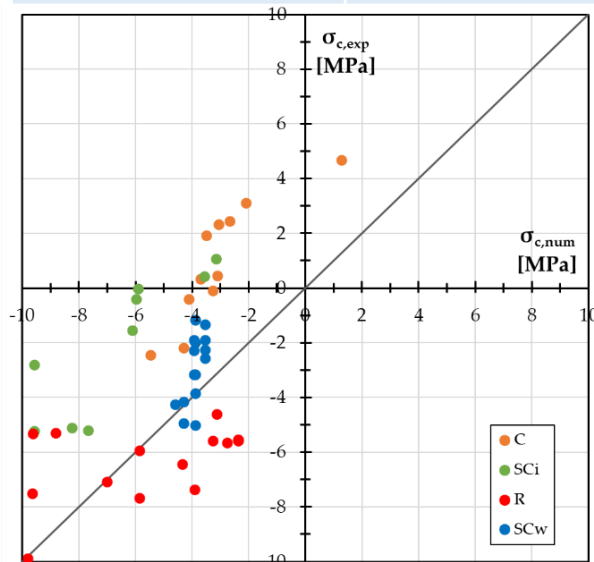
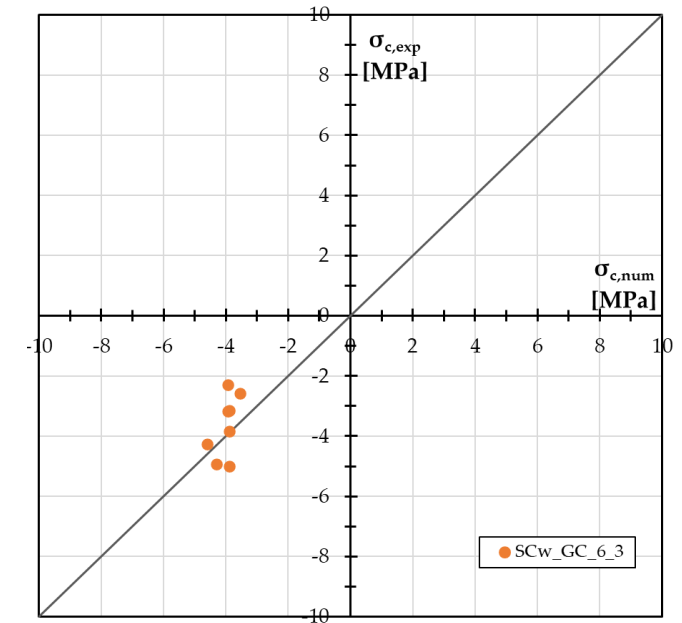
Tagli sull'anima

Pianta tagli anima con risultati più affidabili

SCw: GC\_6\_3



### #33 PROVE DI DETENSIONAMENTO

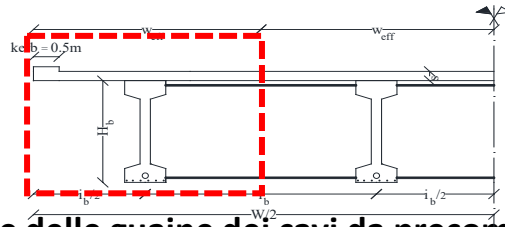
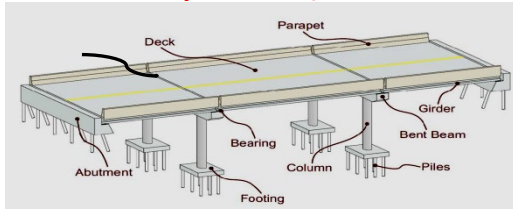


Alcune tecniche forniscono risultati poco affidabili anche in laboratorio

- 11 Carote strumentate
- 9 Tagli all'intradosso
- 13 Provini tronco-piramidali
- 15 tagli sull'anima

Piano prove (travi in c.a.p. post-tese in scala 1:5)

UR UNINA



difetti di iniezione



taglio dei cavi

**Finalità:** valutare gli effetti della parziale iniezione delle guaine dei cavi da precompressione e di un eventuale danneggiamento localizzato sulla comportamento sperimentale delle travi da ponte in c.a.p. a cavi scorrevoli anche in presenza di sistemi di rinforzo.

Progetti di ricerca in corso: Reluis CSSLP - FIRMITAS - RESIST							
Sigla provino	Test	Condizioni cavo	Iniezione guaine	Precompressione	Configurazione	Status	Risultati
T1	Flessione (4-point bending)	Non Danneggiato	Totale	Alta	<b>AS BUILT</b>	Eseguito	La totale assenza di iniezione delle guaine produce una riduzione del fenomeno del tension-stiffening e della capacità portante in condizioni ultime.
T2		Non Danneggiato	<b>Assente</b>	Alta	AS BUILT	Eseguito	
T3		Non Danneggiato	Totale	<b>Bassa</b>	AS BUILT	Eseguito	
T4		Non Danneggiato	<b>Assente</b>	<b>Bassa</b>	AS BUILT	Eseguito	
T9		Non Danneggiato	<b>Parziale (centro)</b>	Alta	AS BUILT	Eseguito	
T11		Non Danneggiato	<b>Parziale (laterale)</b>	Alta	AS BUILT	Eseguito	
T5		<b>Danneggiato</b>	Totale	Alta	AS BUILT	Eseguito	Il taglio del trefolo produce una riduzione di capacità portante ( $M_{cr}$ e $M_u$ ) in funzione alla posizione del danno
T6		<b>Danneggiato</b>	Totale	<b>Bassa</b>	AS BUILT	Eseguito	
T7		Non Danneggiato	Totale	<b>Bassa</b>	Precompressione Esterna	Eseguito	Significativo incremento di capacità portante sia nei confronti della fessurazione che delle condizioni ultime
T8		Non Danneggiato	Totale	Alta	Precompressione Esterna	Eseguito	
T12		Non Danneggiato	Parziale (laterale)	Alta	Near Surface Mounted FRP	Eseguito	Significativo incremento di capacità portante in condizioni ultime
T13		Non Danneggiato	Totale	<b>Bassa</b>	Near Surface Mounted FRP	Eseguito	
T10		Non Danneggiato	Parziale (centro)	Alta	Externally Bonded FRP	In corso	
T14		Non Danneggiato	Totale	Alta	Externally Bonded FRP	In corso	
T15		Non Danneggiato	Totale	<b>Bassa</b>	Externally Bonded FRP	In corso	

Travi in scala 1:5 di un tipo impalcato

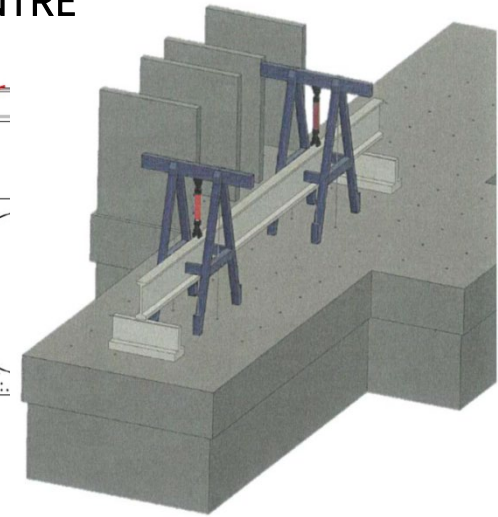
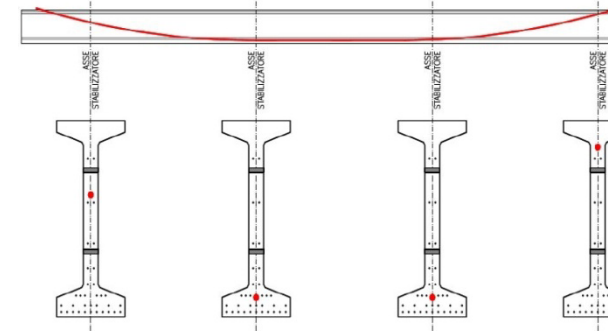
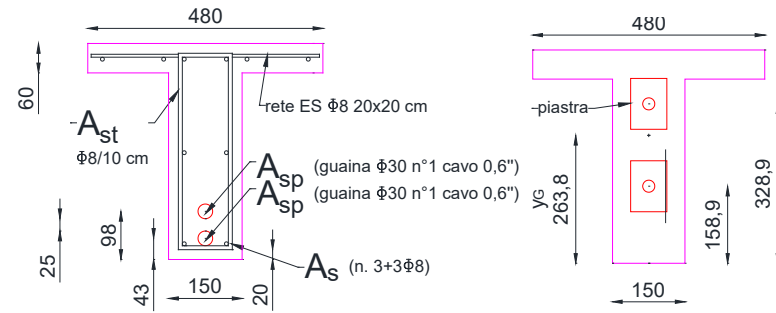
## Sub-Task 4.3.5 - Prove sperimentali

... per avere dati e calibrare modelli

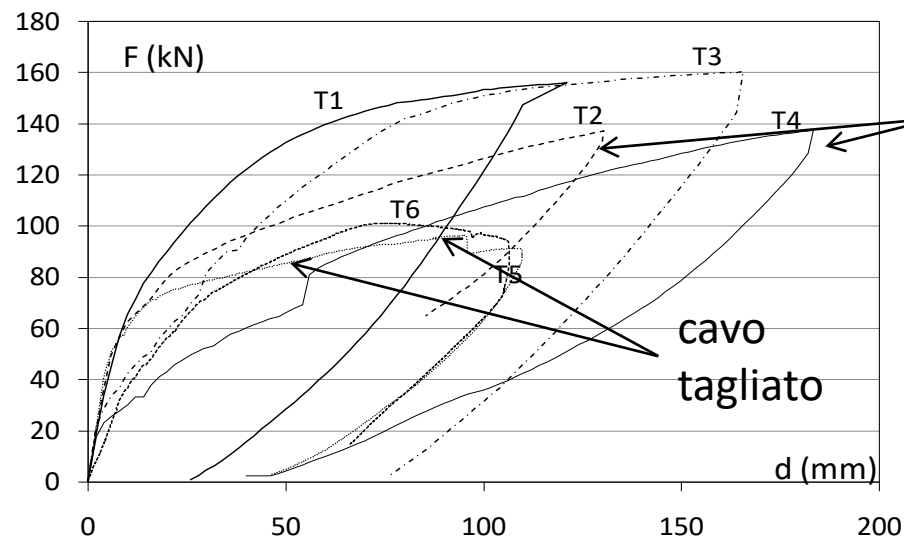
### EUCENTRE

**Mezzeria**

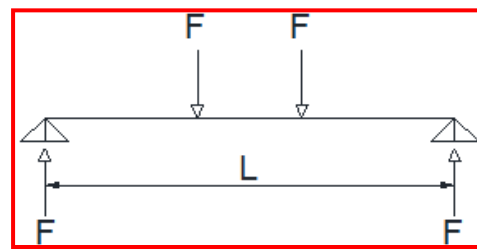
**Testata**



- ✓ Diversi livelli di precompressione
- ✓ Difetti di iniezione
- ✓ Cavi non aderenti
- ✓ Taglio dei cavi
- ✓ Effetto della sollecitazione tagliante



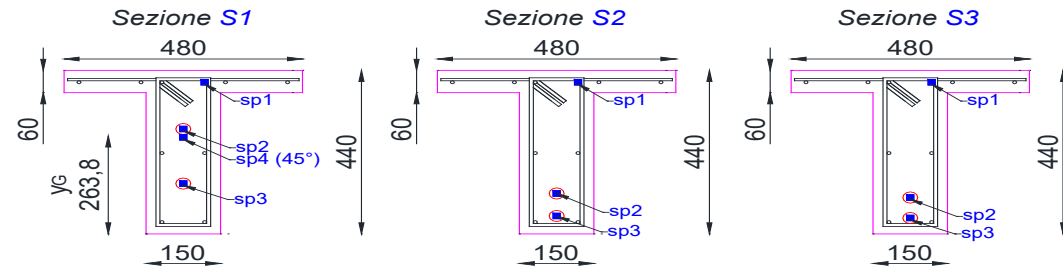
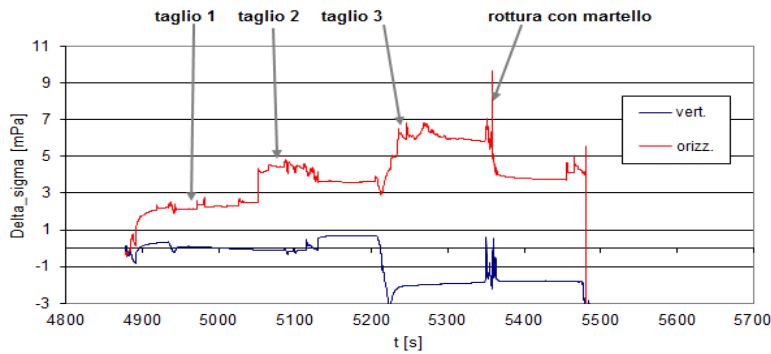
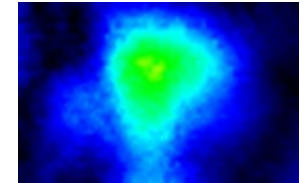
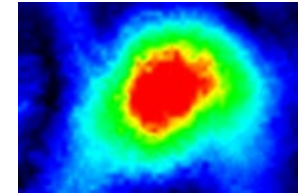
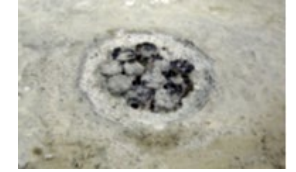
non iniettate



Risultati prime 6 travi

- Prove a collasso con carichi monotoni (eseguite su due travi, da eseguire su altre 2 travi) 4 travi esistenti in c.a. con sistema di precompressione a cavi aderenti, scorrevoli e misto con luci variabili tra 19 m e 34 m.
- 2 test con travi con sistema misto già effettuate ( $h_{sezione}=1.20$  m, luce=25 m)
- 1 trave a cavi aderenti ( $h_{sezione}=0.90$  m, luce=18.2 m)
- 1 trave con sistema misto ( $h_{sezione}=1.4$  m, luce=? m)

Trave strumentata su cui si praticano tagli nel cavo o sono stati introdotti difetti di iniezione



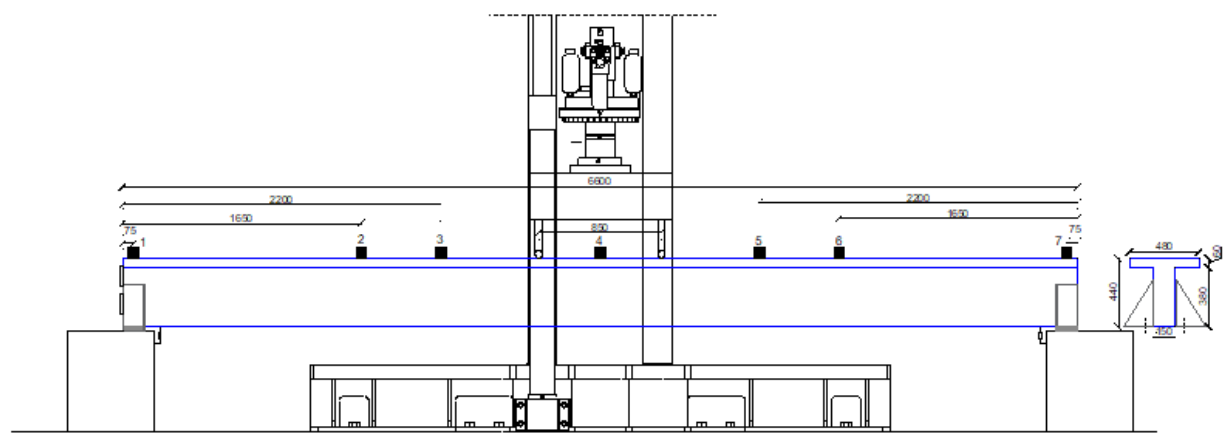
**Legenda**  
 sp1= sensore di pressione orizzontale in corrispondenza del filante armatura superiore  
 sp2= sensore di pressione orizzontale in corrispondenza del trefolo superiore  
 sp3= sensore di pressione orizzontale in corrispondenza del trefolo inferiore  
 sp4= sensore di pressione in sezione di appoggio S1 inclinato a 45°

Tomografia radar per la geometria di cavi e barre e l'individuazione di vuoti di malta su travi con difetti noti

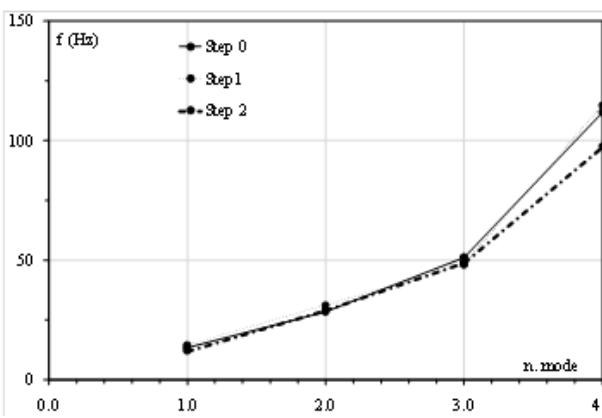
Misura delle variazioni locali di tensione con tecnica di rilascio tensionale



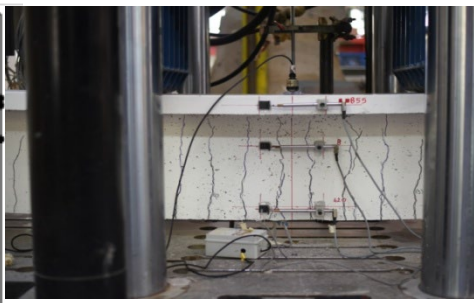
Prove identificazione dinamica con tecnica OMA in laboratorio (UNINA)



7 accelerometri dir. Verticale lungo la trave

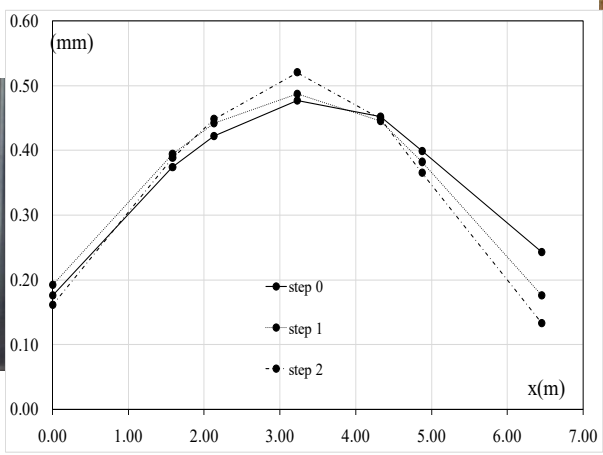


Variatione della frequenza per 4 modi all'aumentare del danno



Fessurazione parte centrale all'ultimo step

Quando la trave si scarica le fessure si richiudono



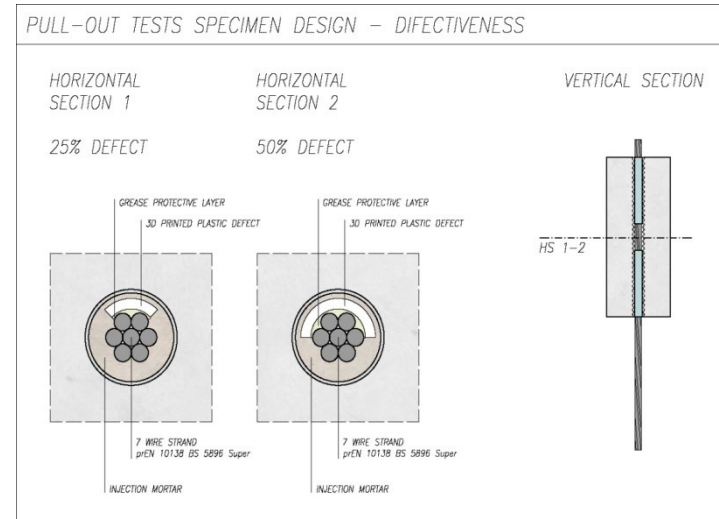
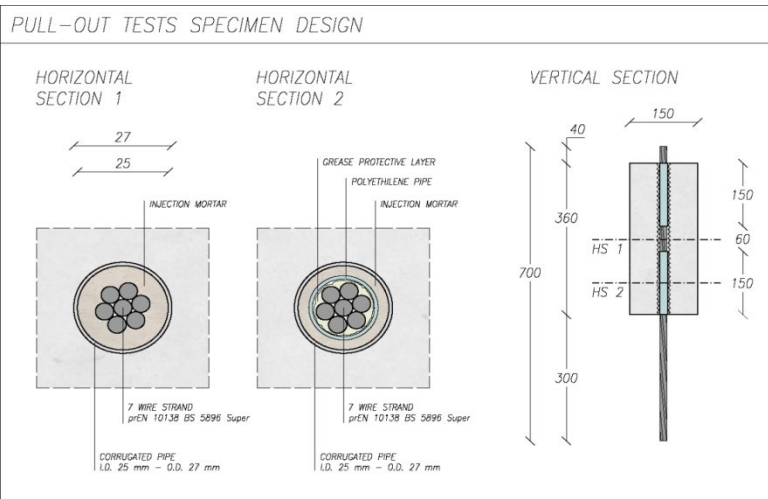
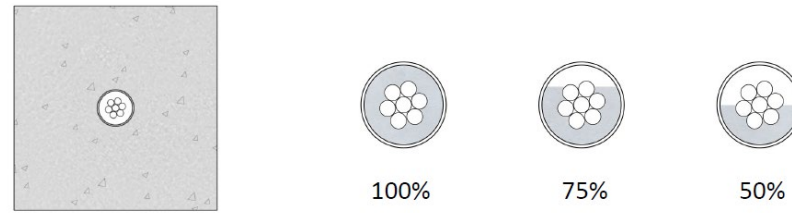
Variatione della prima forma modale all'aumentare del danno

Si sta ancora lavorando sui dati

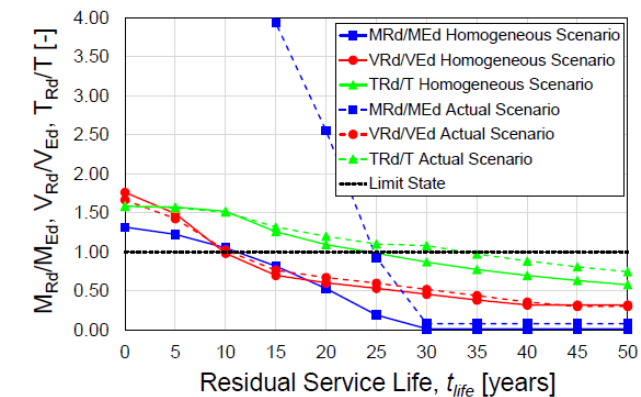
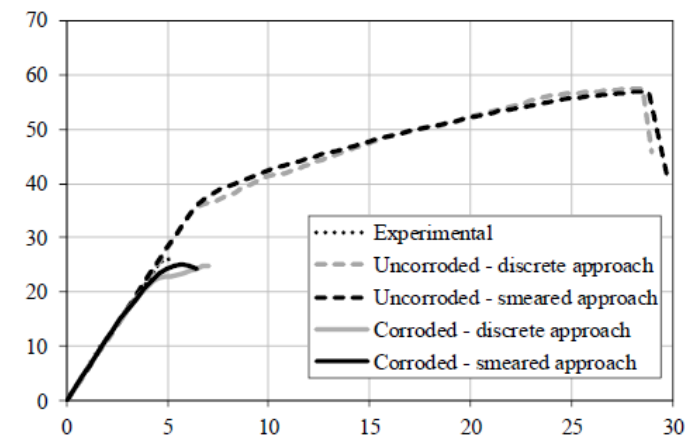
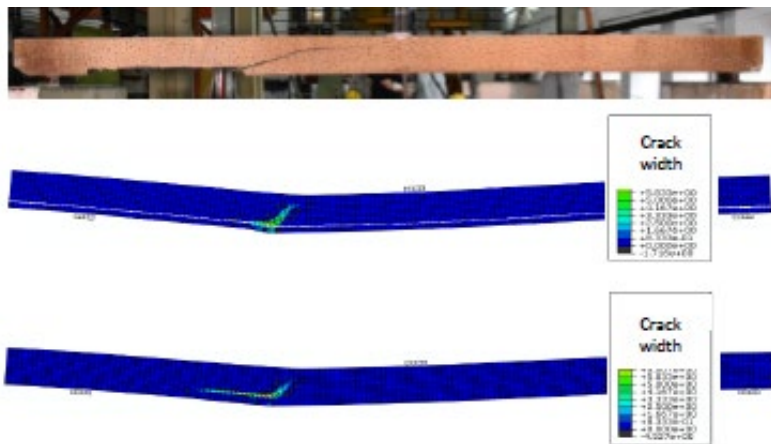
Prova dinamica sul cavo esterno



## Università di Parma (UNIPR) prove di pull-out su trefoli con difetti di malta e corrosione



Corrosione accelerata



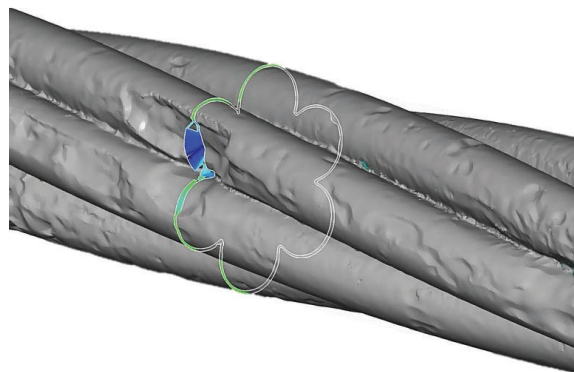
\* In collaborazione con task 4.1 sulla durabilità



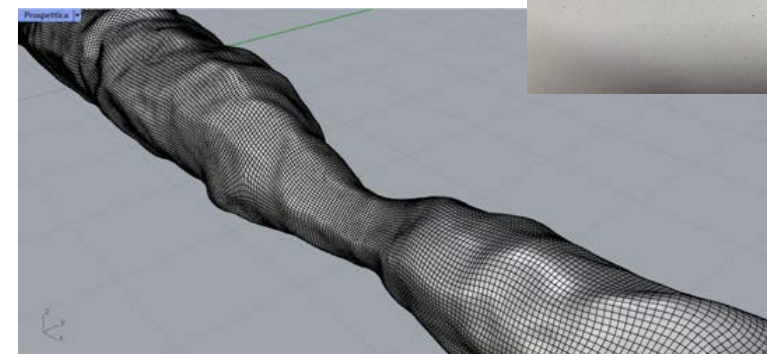




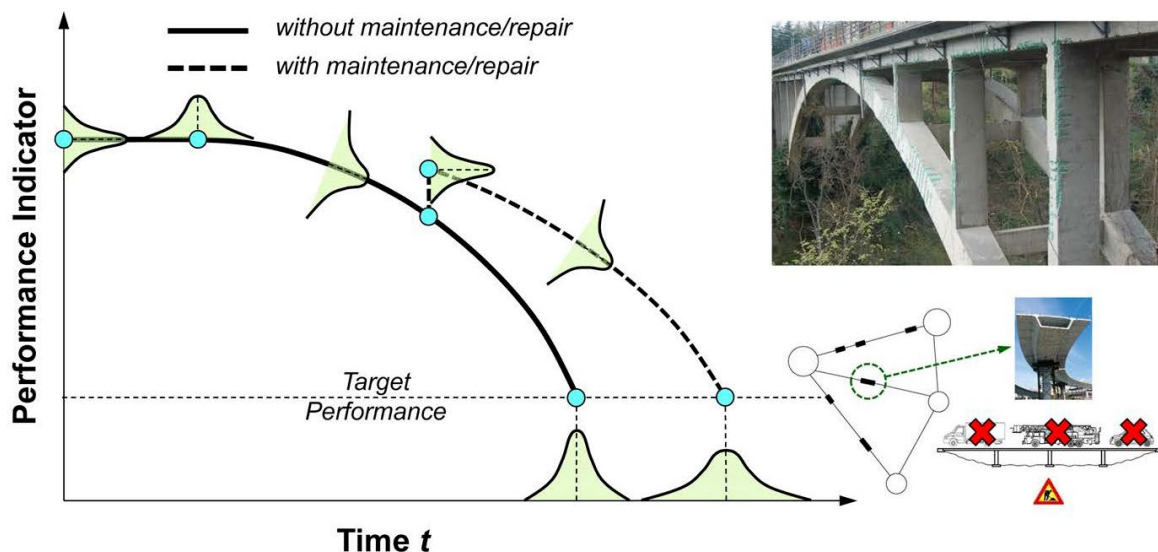
problemi di degrado che incidono sulla durabilità dei ponti: la corrosione dell'acciaio



Modelli di corrosione



Modelli dipendenti dal tempo



- ridurre al minimo il numero di test necessari per la diagnosi
- fornire approcci omogenei per considerare gli effetti del degrado sul comportamento allo stato limite di servizio e allo stato limite ultimo di:
  - travi in c.a.p. (Task 4.3) e c.a.o. e
  - selle Gerber (Task 4.4)

**Stimare la vita residua:**

**uno dei problemi attuali più complesso**

**Trovare interventi per allungare la vita residua**

**Valutare il livello prestazionale attuale**

### 3.6 ISPEZIONI SPECIALI

...

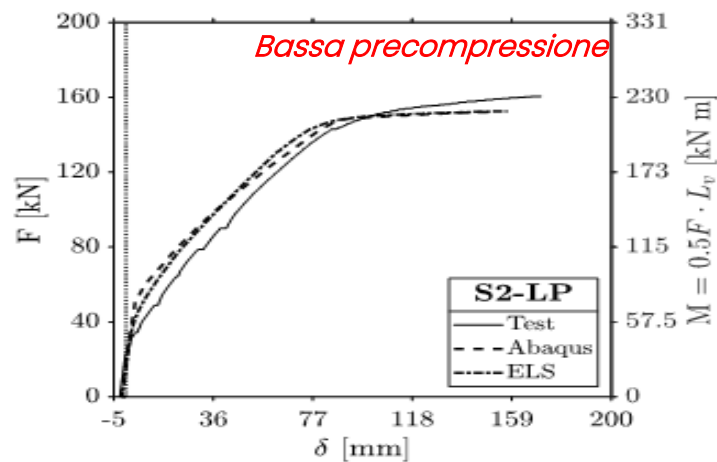
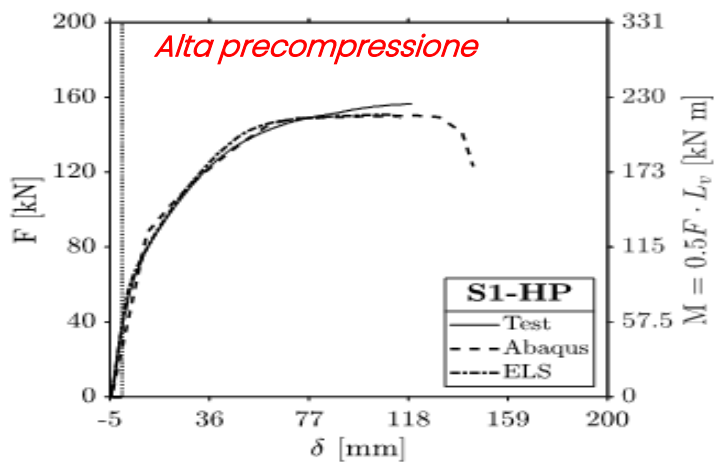
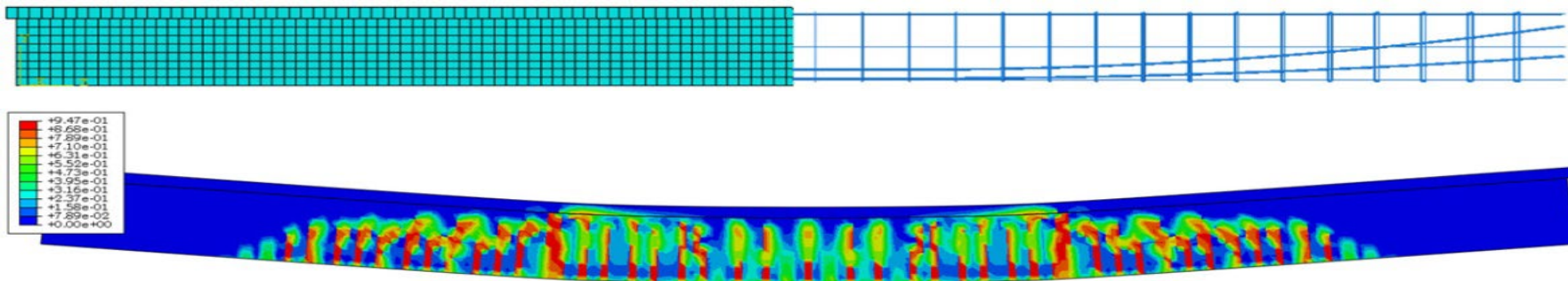
Qualora le indagini svolte evidenzino fenomeni e/o difetti rilevanti, quali importanti stati di corrosione o rotture, anche parziali, dei cavi da precompressione, o nel caso in cui si ritenga che le **ispezioni speciali non siano sufficienti** a definire con adeguato grado di affidabilità lo stato di conservazione generale dell'opera ed il quadro completo dei difetti, occorre **procedere a valutazioni di sicurezza approfondite**, previste dal Livello 4 dell'approccio multilivello, assumendo come riferimento la parte delle presenti linee guida ad esse dedicate. Dove ritenuto necessario, occorre comunque prevedere immediati interventi di correzione dei difetti di iniezione e ripristino.

#### Sub-Task 4.3.3 – Modellazione e analisi

Nel caso dei ponti esistenti i **modelli devono tenere in conto eventuali difetti**, pertanto è possibile sviluppare modelli di diversi livelli di complessità per tenere conto del degrado dell'acciaio e dell'aderenza dovuto alla corrosione, dei difetti di iniezione, della fessurazione.



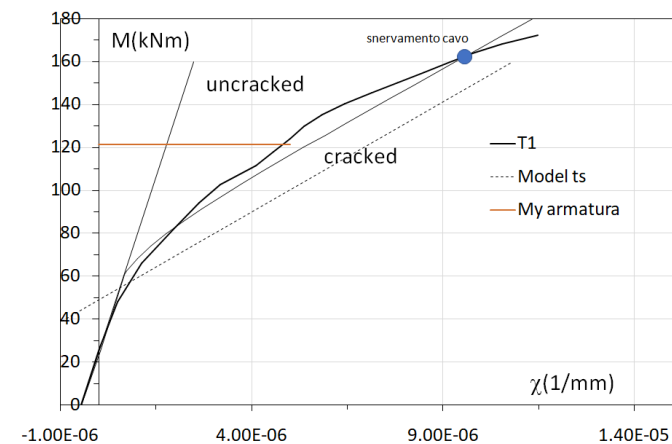
## Analisi numeriche FEM per simulazioni trave in c.a.p.



Experimental versus numerical force–displacement response curves: (left) S1-HP, (right) S2-LP

### Attività in corso:

- Modellazione FEM con elementi shell non lineari e FEM con elementi frame a plasticità concentrata.
- Strategie di modellazione per tenere conto dei difetti (iniezioni di malta, danno, corrosione)
- Modellazione con Vector
- Modellazioni semplificate in esercizio



Modello semplificato con tension stiffening

Utile per un confronto con la risposta da un sistema di monitoraggio

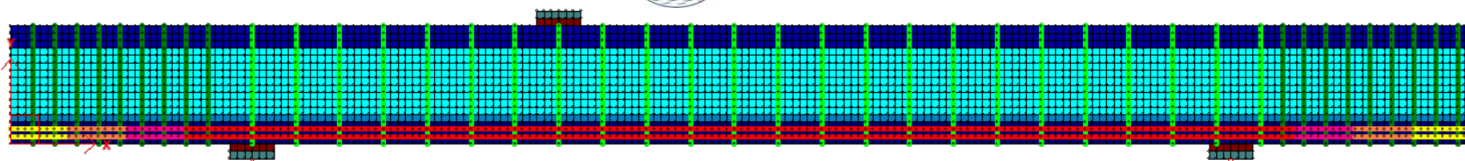
### Modellazione numerica Rottura a taglio:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA



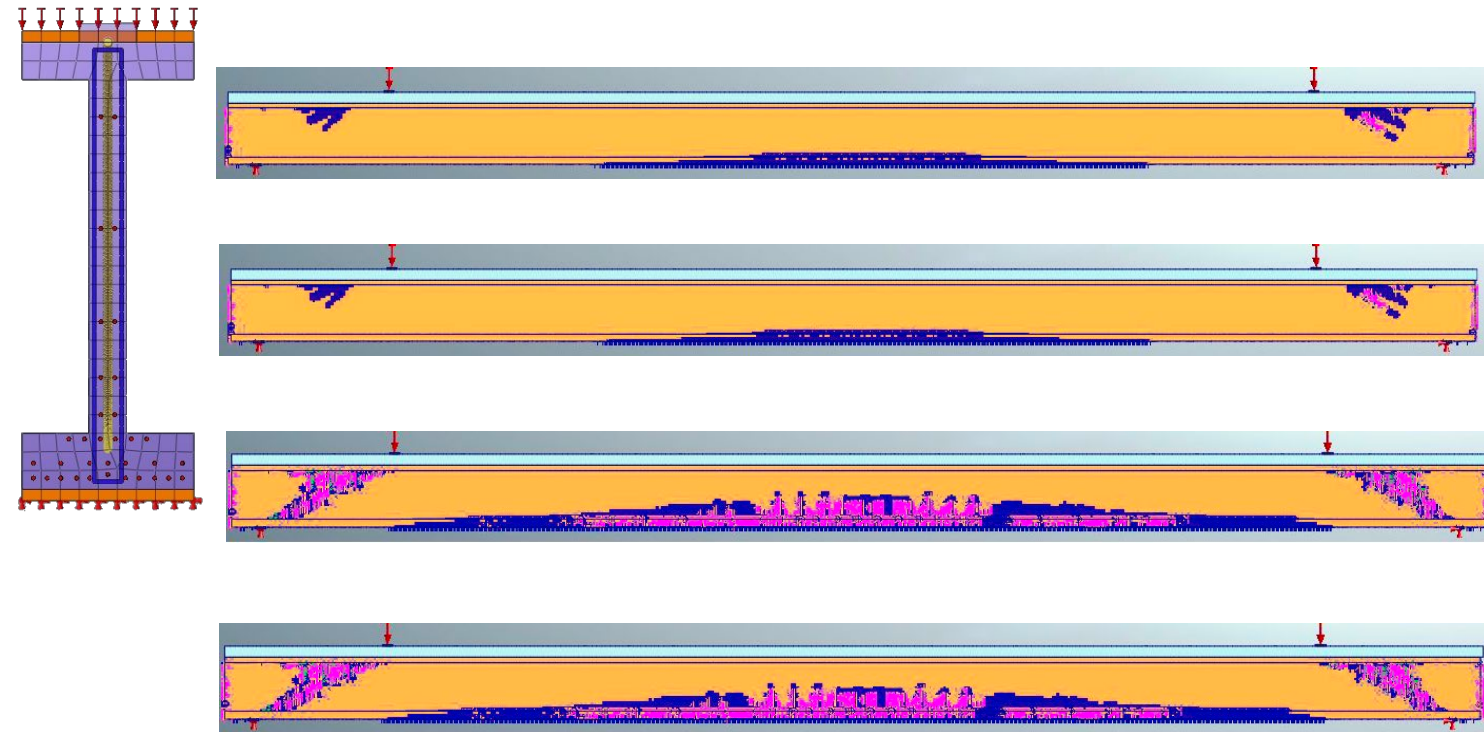
VECTOR ANALYSIS GROUP



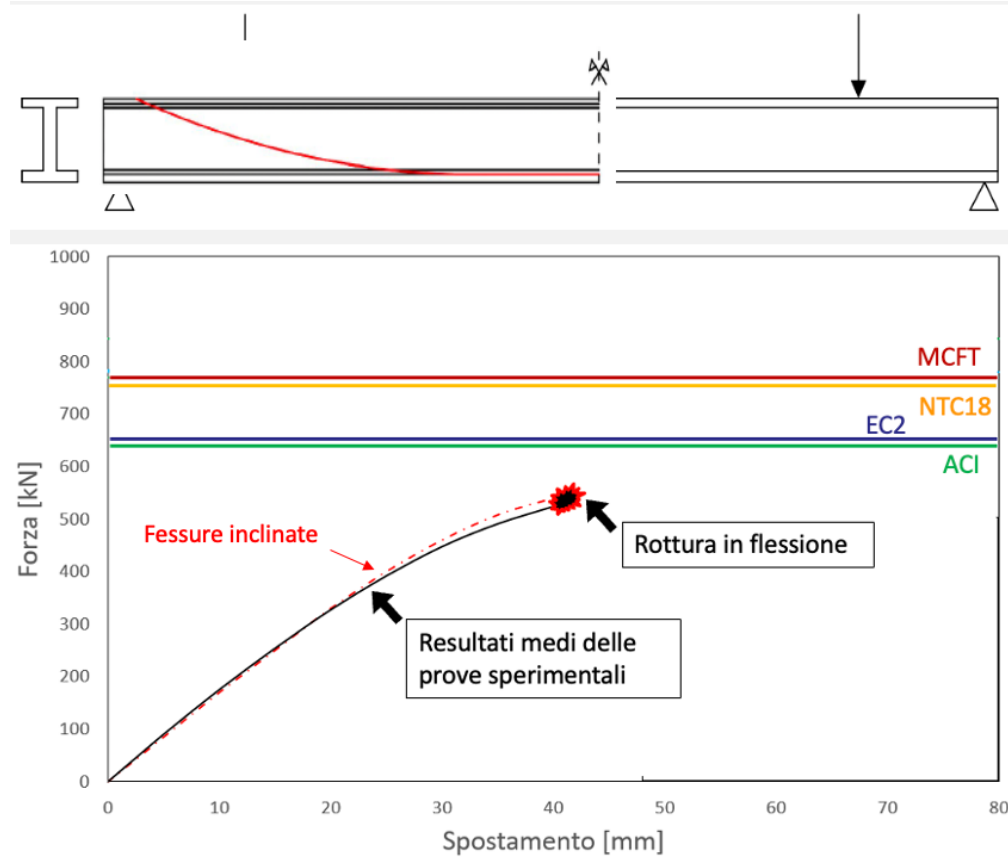
Esempio di modello in VecTor 2

### UR UNIPV

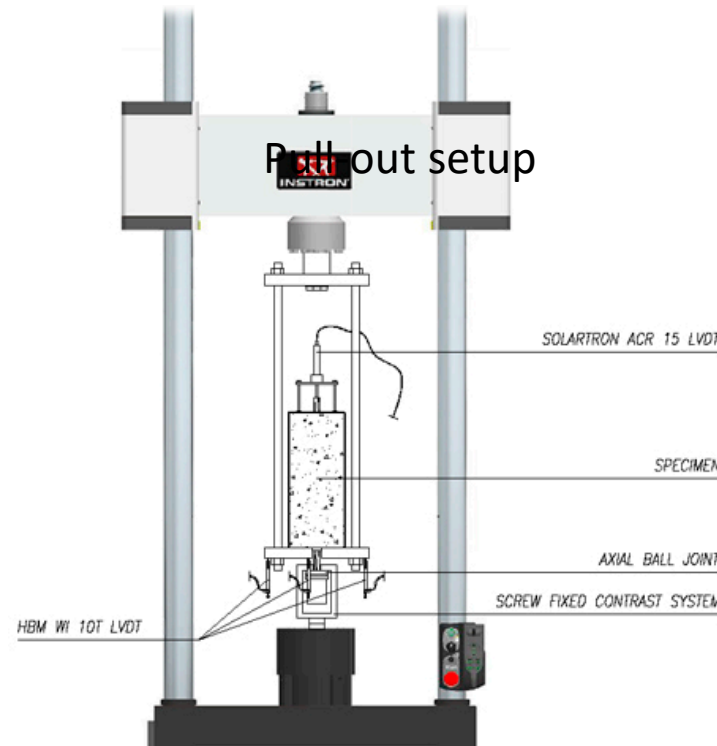
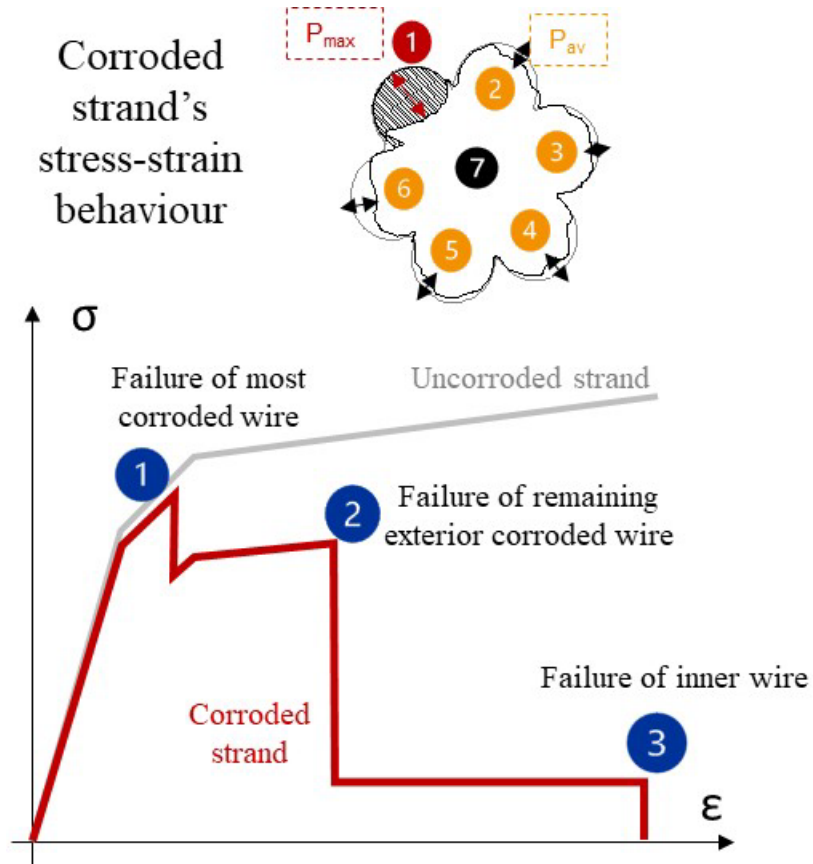
Modellazione con MIDAS FEA NX per simulare le prove sperimentali



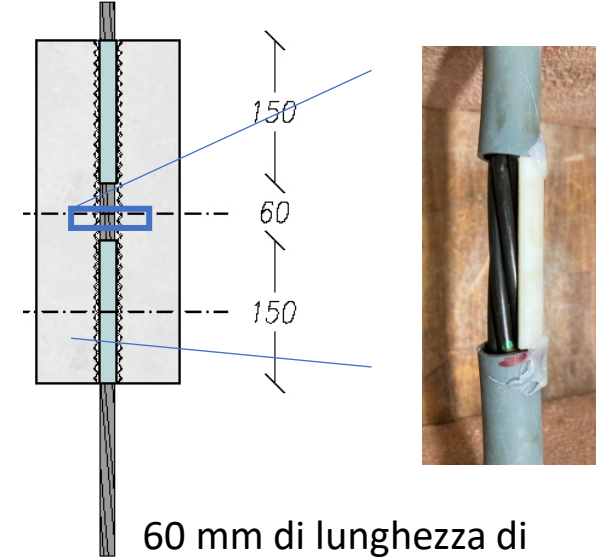
Confronto delle prove sperimentali con modelli di capacità per il taglio (fessure inclinate)



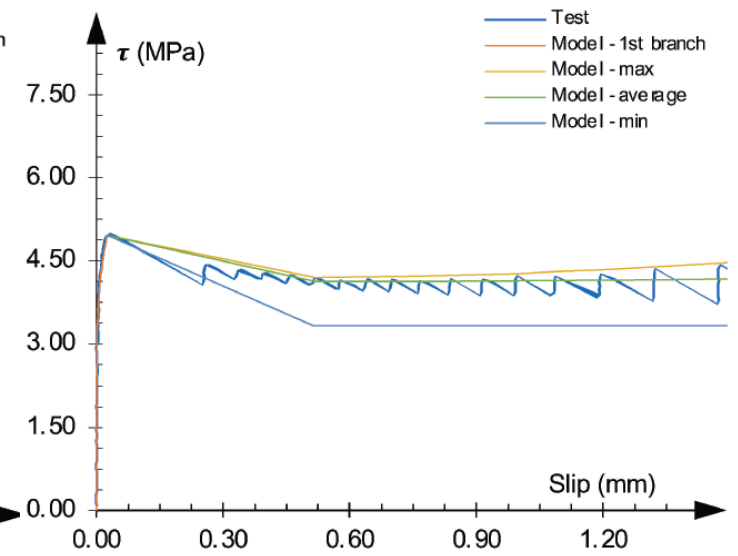
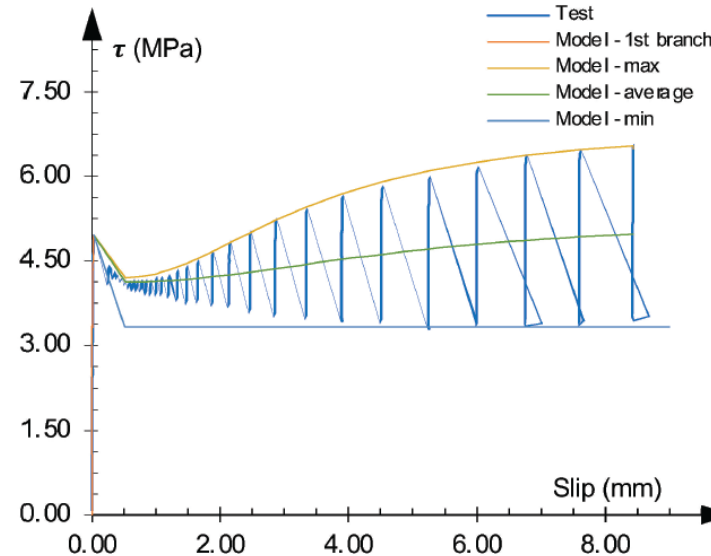
Legame costitutivo barra corrosa:  
riduzione resistenza e duttilità



150 15.7 mm trefolo  
25 mm guaina galvanizzata



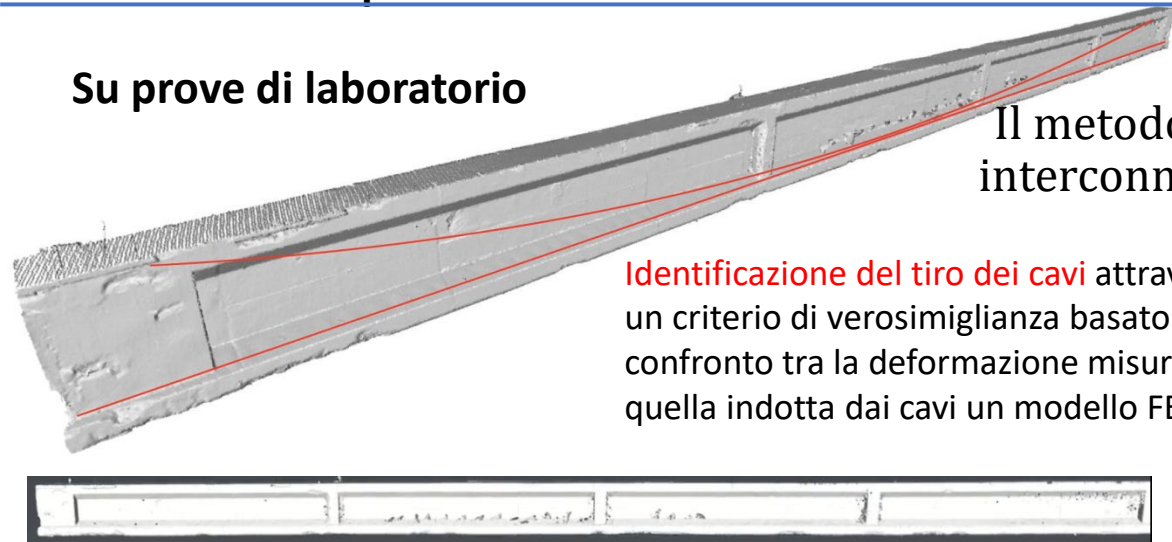
60 mm di lunghezza di ancoraggio + difetti di iniezione



Modelli di risposta dinamica con danno

UR IUSS

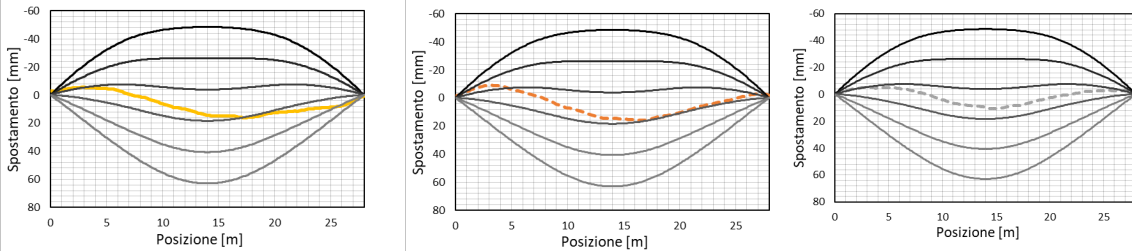
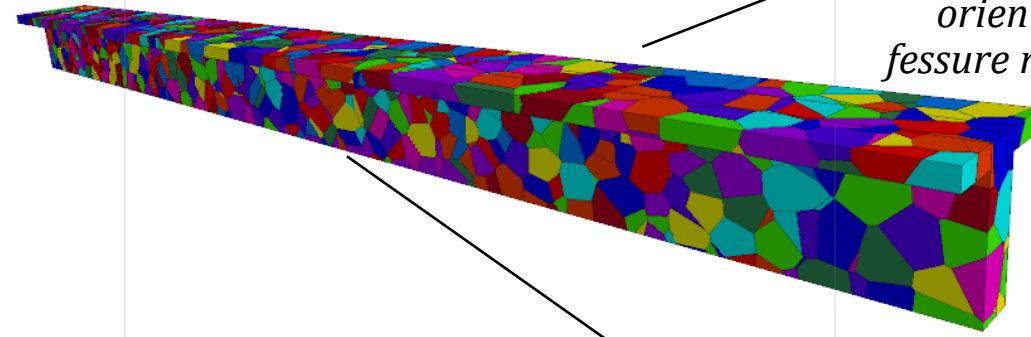
Su prove di laboratorio



Identificazione del tiro dei cavi attraverso un criterio di verosimiglianza basato sul confronto tra la deformazione misurata e quella indotta dai cavi un modello FE

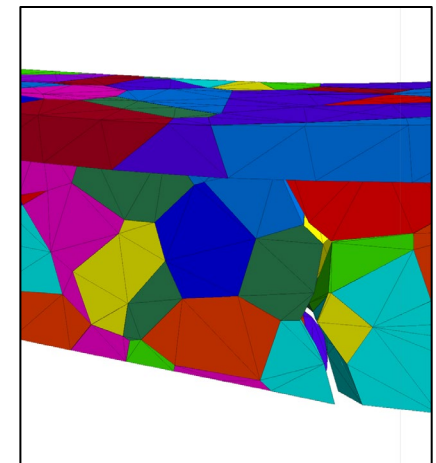
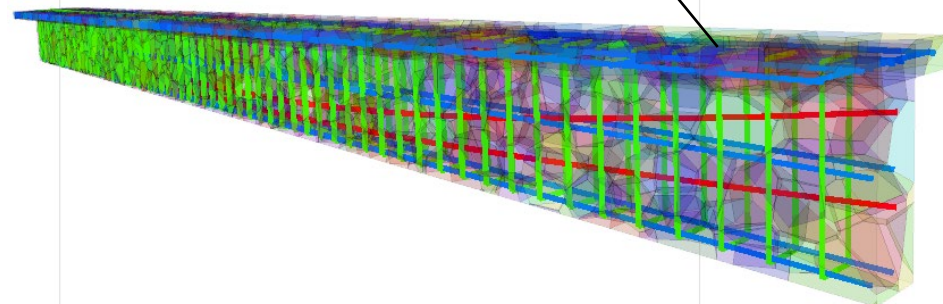
Il metodo discontinuo schematizza il sistema come un aggregato di blocchi interconnessi permettendo grandi rotazioni, fratture ed il completo distacco non rappresentabile con i metodi convenzionali.

*Dominio del calcestruzzo rappresentato da elementi poliedrici, orientazione delle fessure non predefinita!*



Confronto tra il modello e le prove di identificazione della UR di Napoli

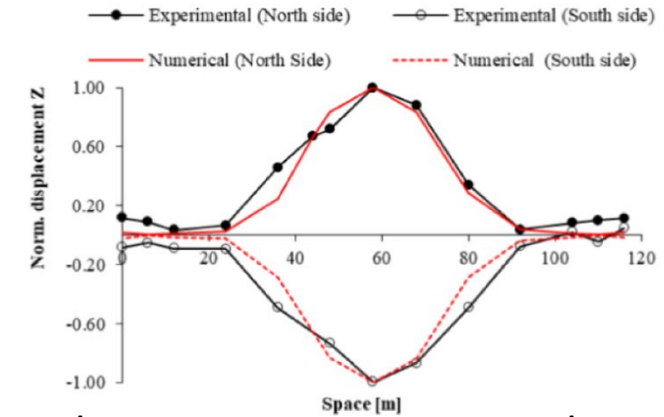
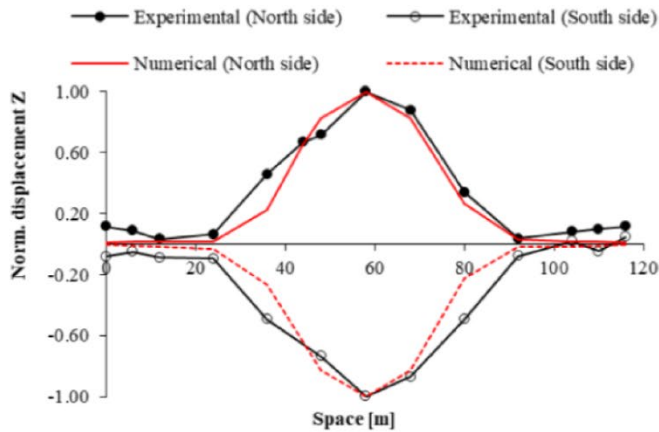
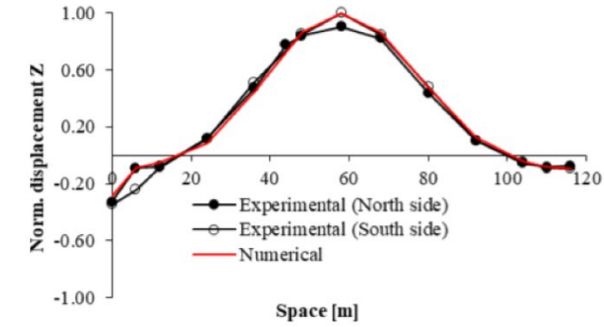
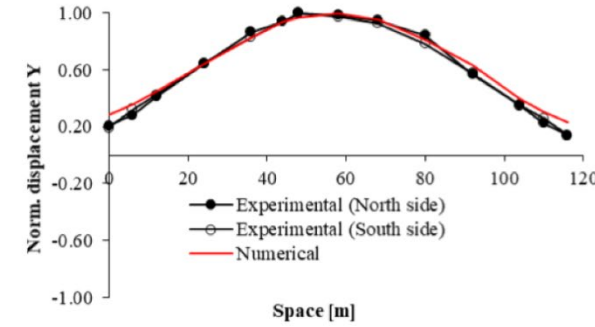
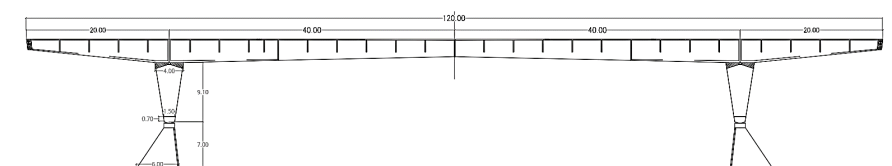
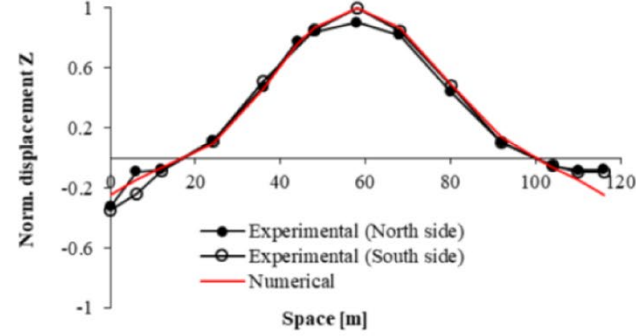
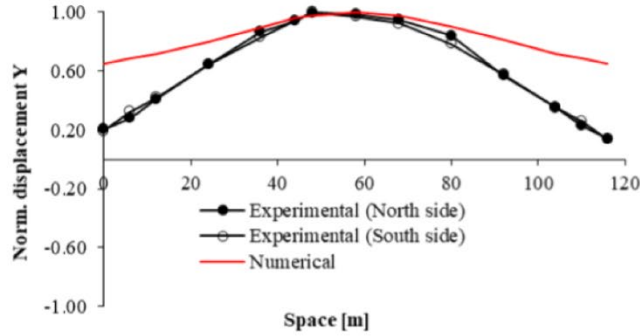
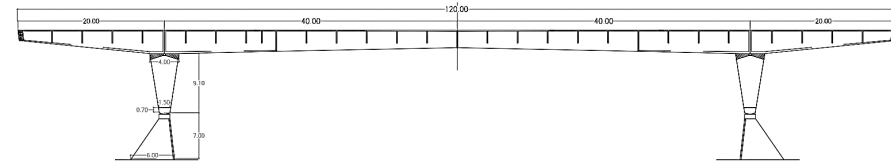
*Rappresentazione esplicita delle armature!*



## PRE-CALIBRAZIONE

Updating di modelli importante per analisi dati monitoraggio

## POST-CALIBRAZIONE



Theoretical-experimental comparison after updating introducing SSI.

Experimental	Numerical	Comparison
Mode N.	$f_{exp}$ [Hz]	Mode N. $f_{FEM}$ [Hz] $\epsilon$ [%] MAC
1	1.19	1 1.26 5.7 0.96
2	2.12	2 2.14 1.0 0.97
3	5.64	3 4.90 -13.1 0.97

Molle verticali 21,620 kN/m<sup>2</sup> a destra e 17,860 kN/m<sup>2</sup> a sinistra  
Molle orizzontali 33,000 kN/m<sup>2</sup> a destra e 28,000 kN/m<sup>2</sup> a sinistra



Oltre a Report ed indicazioni applicative si sta mettendo a punto un database dei modelli di semplice consultazione

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Scheda modelli Task 4.3 - Precompressione</b>							
2								
3								
4	<b>TIPO DI MODELLO</b>	<b>CAMPO DI APPLICAZIONE</b>	<b>TARGET DI MODELLO</b>	<b>LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO</b>	<b>METODO DI CALIBRAZIONE</b>	<b>NUMERO DI SIMULAZIONI</b>		
5	Analitico	Armatura pretesa aderente	Aderenza di trefoli nudi	Sezionale	Altro			
6								
7								
8								
9								
10	<b>BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO E BACKGROUND SCIENTIFICO</b>				<b>IMMAGINI E SCHEMI DI RIFERIMENTO DEL MODELLO</b>			
11								
12								
13								
14	<b>LETTERATURA DI RIFERIMENTO</b>							
15								

### OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Per l'analisi delle opere in calcestruzzo precompresso le attività di ricerca forniranno un quadro organico dei vari aspetti che si devono trattare ancora più efficiente mediante il confronto con i casi studio.