

Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

CONVEGNO FINALE

19,20 e 21 novembre 2025

SISTEMI IN C.A.P.

Maria Rosaria Pecce
Università di Napoli Federico II



Durata del progetto: 01.07.2021 – 31.12.2024

Obiettivi del task: Il Task si prefigge l'obiettivo di approfondire le conoscenze relative al comportamento dei **sistemi in c.a.p. esistenti** in presenza di imperfezioni costruttive o eventualmente soggetti a fenomeni di degrado. È prevista una campagna sperimentale finalizzata ad investigare le prestazioni attese di particolari componenti in c.a.p. e l'effetto di un eventuale deterioramento sulla risposta strutturale. Sulla base dei risultati sperimentali e delle informazioni ottenute tramite tecniche di diagnostica, saranno definiti modelli specifici, anche di dettaglio, e formulazioni alternative per la valutazione della risposta attesa in condizioni ultime e di servizio. A termine del progetto verranno fornite utili indicazioni per la **diagnostica, la modellazione, l'analisi e la valutazione di strutture in c.a.p.** anche attraverso la generazione di database e rapporti tecnici.

9 Università e 1 centro di ricerca

Sub-Task 4.3.1 - Stato dell'arte

Sub-Task 4.3.2 – Tecniche di diagnostica

Sub-Task 4.3.3 – Modellazione e analisi

Sub-Task 4.3.4 – Database sulle proprietà degli acciai armonici

Sub-Task 4.3.5 - Prove sperimentali

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

Titolo sub task	UniPV	IUSS	Eucentre	UniRoma3	UniCH	UniPA	UniME	UniPR	UniNA	UniBS
Task 4.3.1	X			X	X	X	X	X	X	X
Task 4.3.2	X			X	X				X	X
Task 4.3.3	X	X				X	X	X	X	X
Task 4.3.4				X	X			X	X	
Task 4.3.5	X		X			X	X	X	X	X



Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale

Accordo CSLLPP e ReLUIS

2022-2024

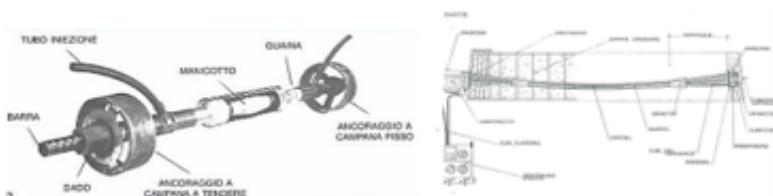
WP4 Sperimentazione su componenti strutturali e/o speciali

TASK 4.3 SISTEMI IN C.A.P.

Sub-Task 4.3.1

La tecnologia del precompresso nei ponti esistenti

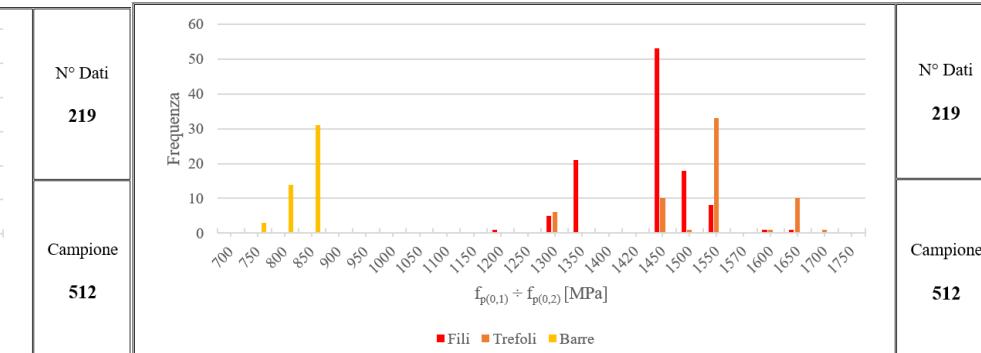
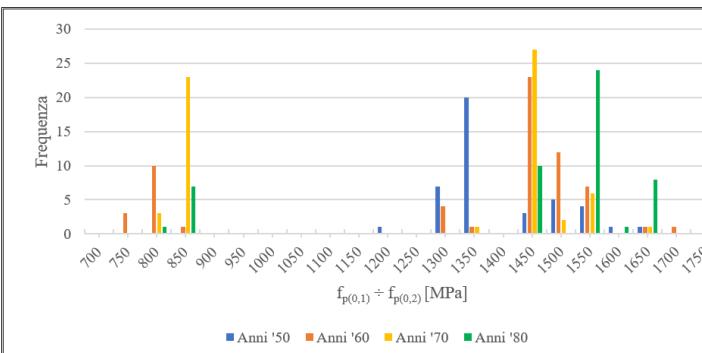
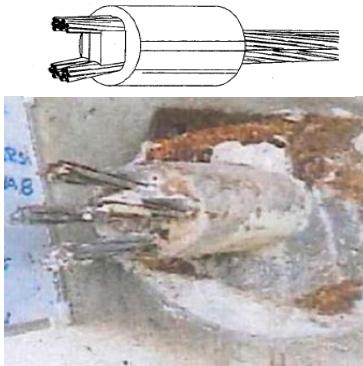
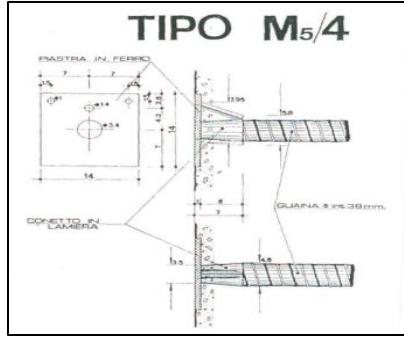
Beatrice Belletti, Daniele Losanno, Maria Rosaria Pecce



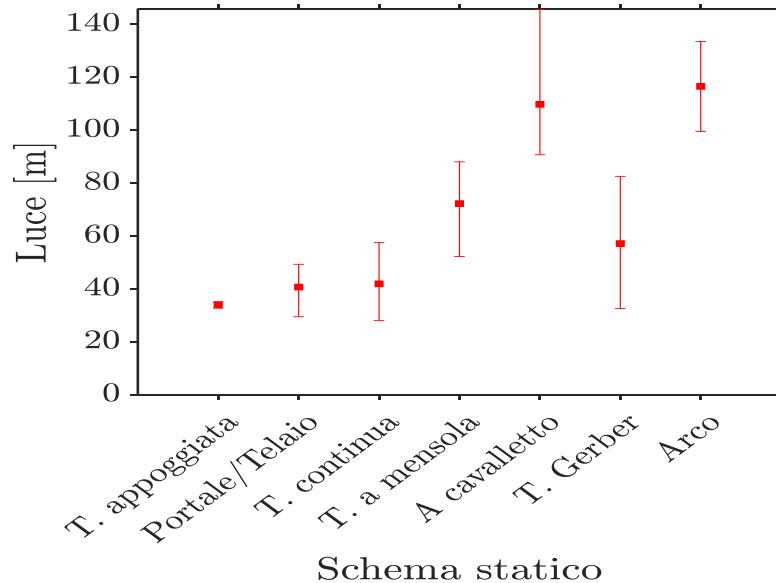
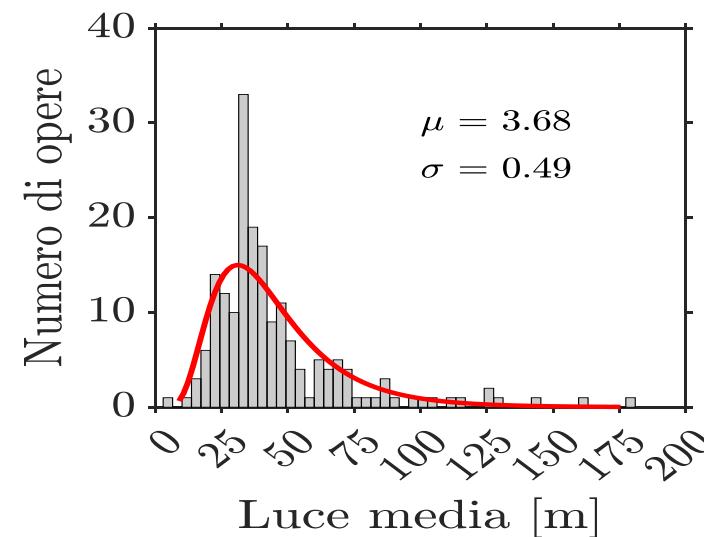
SOMMARIO

1	- Tecnologia della precompressione	4
1.1	Albori della tecnica della precompressione	4
1.1.1	In Italia	6
1.2	Armatura da precompressione	8
1.3	I brevetti per ancoraggio – tesatura	9
1.3.1	Sistema Freyssinet	12
1.3.2	Sistema BBRV (Birkenmaier, Brandesini, Ros e Vogt)	13
1.3.3	Sistema VSL (Vorspan System Losinger)	13
1.3.4	Sistema Magnel	14
1.3.5	Sistema CCL (Cable Covers Limited)	15
1.3.6	Sistema Lee - Mc Call	15
1.3.7	Sistema Baur – Leonhardt	16
1.3.8	Sistema Tesit	16
1.3.9	Sistema per barre Dywidag	17
1.3.10	Sistema per barre Gewi	17
1.3.11	Sistema per barre StressSteel Co.	18
1.3.12	Sistema Morandi	19
1.3.13	Sistema Rinaldi	19
1.3.14	Sistema Marchi	20
1.3.15	Sistema Balducci	20
2	- Quadro normativo	21
2.1	In Italia	21
2.2	Negli Stati Uniti	21
3	- Applicazioni del C.A.P. ai ponti in Italia	23
3.1	Ricerca bibliografica	23
3.2	Caratteristiche geometriche	24
3.2.1	Applicazioni negli anni '50	24
3.2.2	Applicazioni negli anni '60	25
3.2.3	Applicazioni negli anni '70	26
3.2.4	Applicazioni negli anni '80	27
3.3	Sistema di precompressione	28
3.4	Caratteristiche meccaniche	29
3.4.1	Tensione ultima acciai armonici fpt	31
3.4.2	Tensione di snervamento acciai armonici: $fp[0,1] + fp[0,2]$	33
3.4.3	Precompressione al tiro acciai armonici: $\Delta \sigma_{0,1}$	36
3.4.4	Precompressione in esercizio acciai armonici: $\Delta \sigma_{0,2}$	37
3.4.5	Cadute di tensione stimate [%]: $\Delta \sigma_{0,2}$	39
4	Progetto Simulato	42
5	- Bibliografia	43
6	Appendice 1	45
7	Appendice 2	85
7.1	- Elenco ponti ricerca bibliografica	85
8	Appendice 2	95

Acciaio e ancoraggi nelle opere da letteratura



Tipologie ponti in c.a.p



461 prove eseguite su trefoli di varie misure (3/8", 1/2", 6/10") Nel laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche tra il **1987** e il **1995**

	Tensione caratteristica all'1% di deformazione sotto carico (MPa)		
	3/8" (n = 74)	1/2" (n = 218)	6/10" (n = 140)
Media	1724	1736	1627
Mediana	1720	1733	1631
Deviazione standard	50	39	50
Range (min/max)	1635/1917	1628/1888	1469/1769

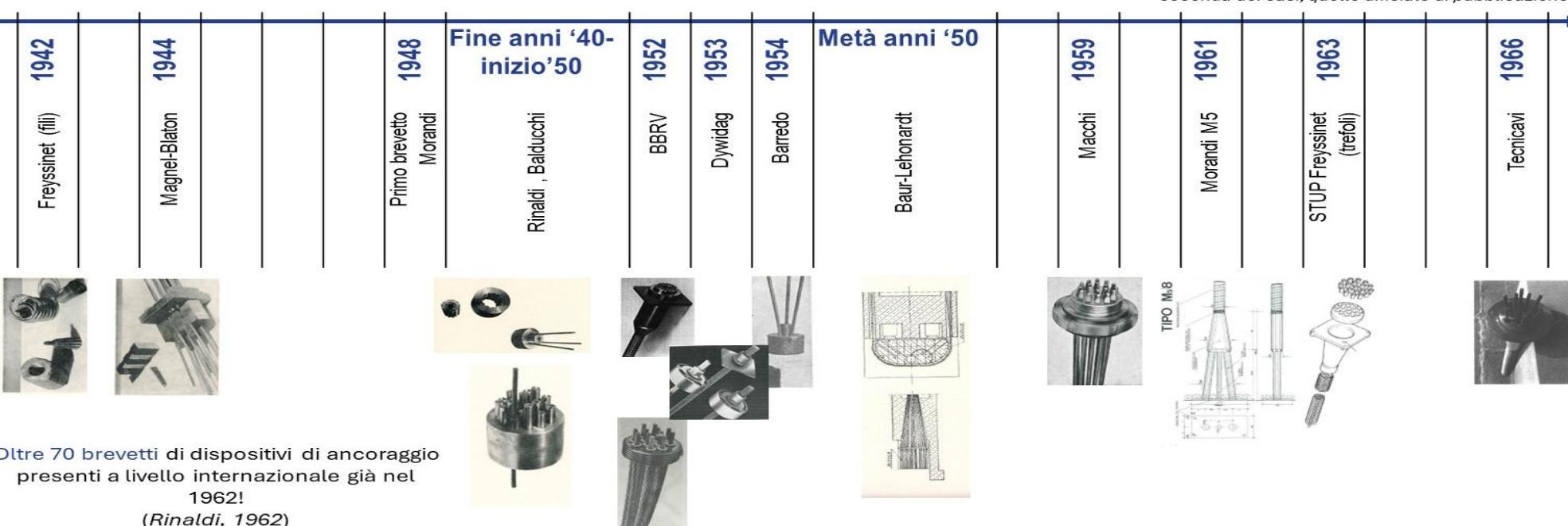
	Tensione di rottura (MPa)		
	3/8" (n = 74)	1/2" (n = 218)	6/10" (n = 140)
Media	1908	1940	1853
Mediana	1897	1945	1858
Deviazione standard	48	41	41
Range (min/max)	1819/2053	1790/2017	1676/1945

	Modulo elastico (MPa)		
	3/8" (n = 74)	1/2" (n = 218)	6/10" (n = 140)
Media	197899	197365	194489
Mediana	196643	196274	194499
Deviazione standard	11584	13226	19273
Range (min/max)	168907/223600	160265/247848	148009/262573

Task 4.3.1 Stato dell'arte: classificazione sistemi di ancoraggio

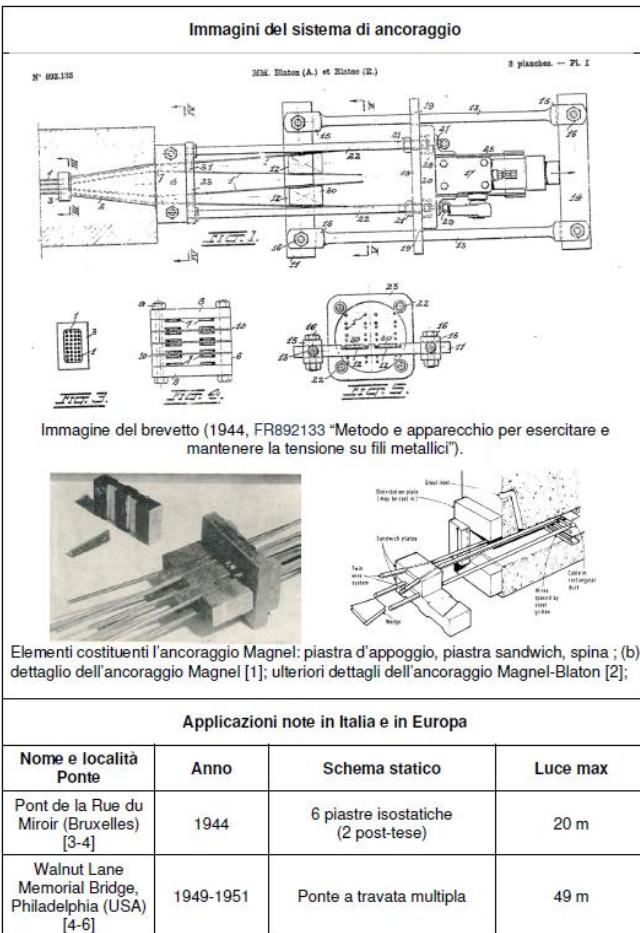
Mobilità	Azione esercitata	Elemento tesato
<ul style="list-style-type: none"> Mobili (di tiro) <p>Rinaldi</p>	<ul style="list-style-type: none"> A cuneo <p>Freyssinet</p> <p>Morandi</p>	<ul style="list-style-type: none"> Fili
<ul style="list-style-type: none"> Fissi <p>BBRV</p>	<ul style="list-style-type: none"> Sostegno diretto <p>BBRV</p>	<ul style="list-style-type: none"> Trefoli <p>BBRV</p>
<p>BBRV</p>	<ul style="list-style-type: none"> Avvolgimento <p>Baur-Leonhardt</p>	<ul style="list-style-type: none"> Barre <p>Dywidag-Finsterwalder</p>

SUCCESSIONE CRONOLOGICA* DEI PRIMI BREVETTI PER ANCORAGGI



7.7 SISTEMA MAGNEL/BLATON

Nome del sistema	Magnel/Blaton
Inventore	A. Blaton e E. Blaton (G. Magnel)
Anno di pubblicazione brevetto	1944
Principale periodo di utilizzo	1947-1960 circa
Reperibilità di un brevetto depositato	https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/003884484/publication/FR892133A?q=pn%3DFR892133A
Breve descrizione del sistema	
1) Azione esercitata	A cuneo
2) Elemento tesato	Fili
3) Principali caratteristiche	<p>Sistema di ancoraggio con azione a cuneo. 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. Questo rappresenta il blocco standard di ancoraggio, costituito quindi da 8 fili, che possono avere un diametro di 5 o 7 mm. Il sistema permette di utilizzare più piastre sandwich, disposte parallelamente tra loro, così da formare cavi composti da un gran numero di fili (fino a 64 fili ϕ7). Per tutta la lunghezza del cavo, erano previsti distanziatori verticali e orizzontali a distanze regolari, che assicuravano che la posizione relativa dei fili rimanesse invariata lungo il cavo stesso. Grazie a questa disposizione, attorno a ciascun filo c'era uno spazio libero che consentiva una buona copertura da parte della boiacca di iniezione, essenziale per la protezione contro la corrosione.</p>



Applicazioni note in Italia e in Europa			
Nome e località Ponte	Anno	Schema statico	Luce max
Pont de la Rue du Miroir (Bruxelles) [3-4]	1944	6 piastre isostatiche (2 post-tese)	20 m
Walnut Lane Memorial Bridge, Philadelphia (USA) [4-6]	1949-1951	Ponte a travata multipla	49 m
Ponte sul Samoggia (BO), [7]	1950	Travata semplicemente appoggiata	26 m
Possibili criticità del sistema			
da compilare in seguito alla fase ispettiva			
Riferimenti bibliografici			
<p>[1] Rinaldi, G., 1962. La pratica del cemento armato precompresso, Vitali e Ghianda.</p> <p>[2] CIRIA Report 106 - Post-tensioning systems for concrete in the UK: 1940-1985.</p> <p>[3] Espion, B., 2009. Early applications of prestressing to bridges and footbridges in Brussels area. In Proceedings of the Third International Congress on Construction History (Vol. 2, pp. 535-541).</p> <p>[4] Denoël, J. F., Espion, B., Hellebois, A., Provost, M., 2013. Histoires de béton armé: patrimoine, durabilité et innovations.</p> <p>[5] Nasser, G.D., 2008. The legacy of the Walnut Lane Memorial Bridge. Structure Magazine.</p> <p>[6] Zollman, C. C., Depman, F., Nagle, J., Hollander, E. F., 1992. Building and rebuilding of Philadelphia's Walnut Lane Memorial bridge. Part 2: demolition and rebuilding of the superstructure. Precast/Prestressed Concrete Institute Journal, 37(4).</p> <p>[7] Ispettorato Generale Motorizzazione Civile e dei trasporti in concessione, 1950. Trasporti Pubblici, Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.</p>			

Descrizione

Anni di applicazione

Immagini per riconoscimento

Bibliografia

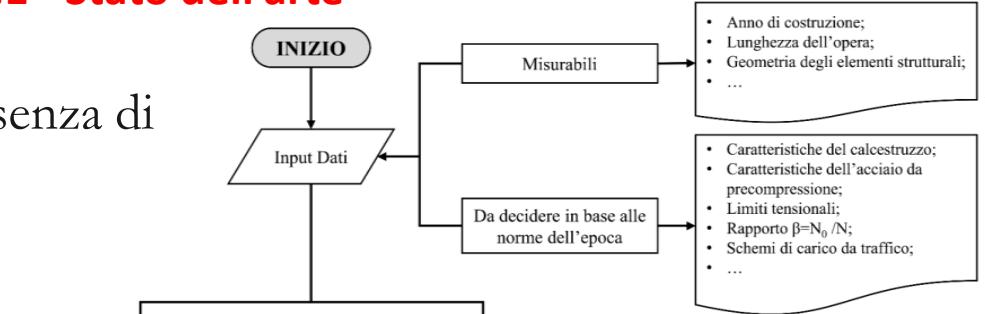
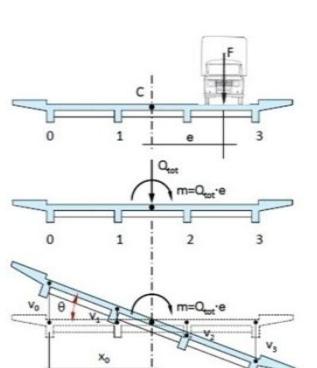
Eventuali osservazioni in sito delle criticità

Progetto simulato: importante in assenza di documenti progettuali

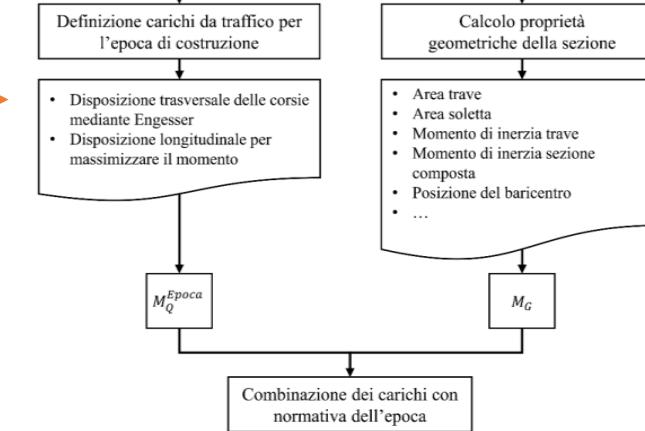
Diagramma di flusso

Carichi variabili:

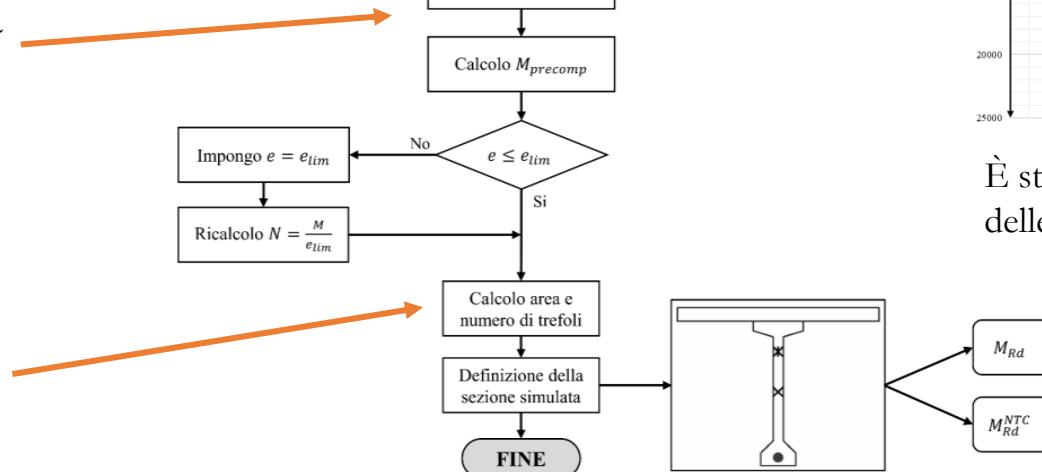
- Definizione mediante normative d'epoca
- Disposizione trasversale mediante Courbon



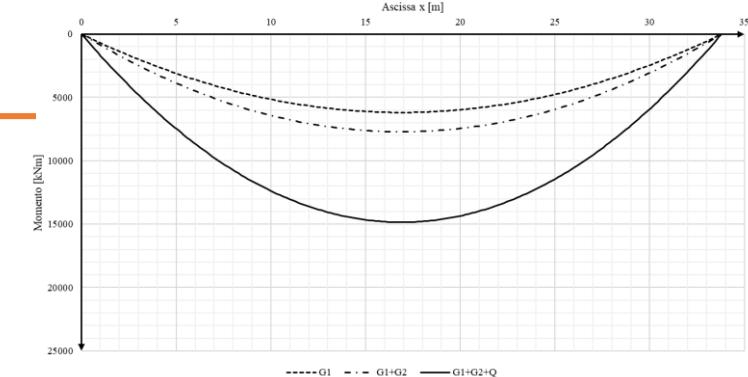
Calcolo dell'eccentricità del cavo risultante



Calcolo dell'area del cavo risultante



Calcolo momento sollecitante (M_{var})



È stata sviluppata anche una routine per il calcolo delle sollecitazioni per transiti eccezionali

Sezione simulata

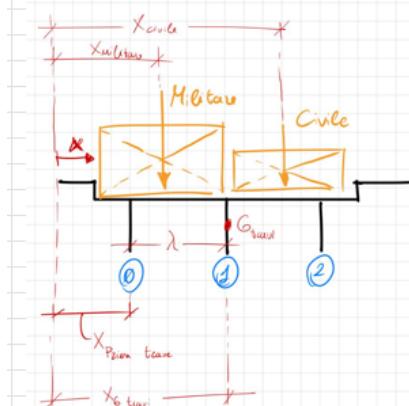
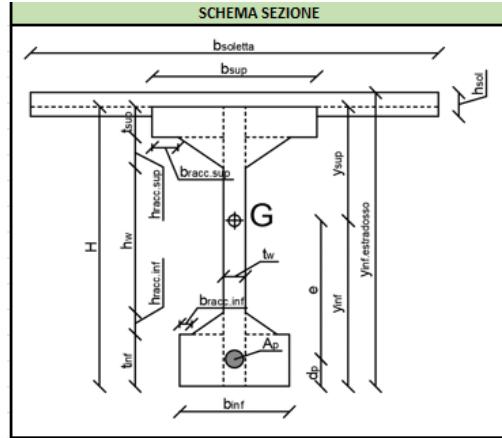
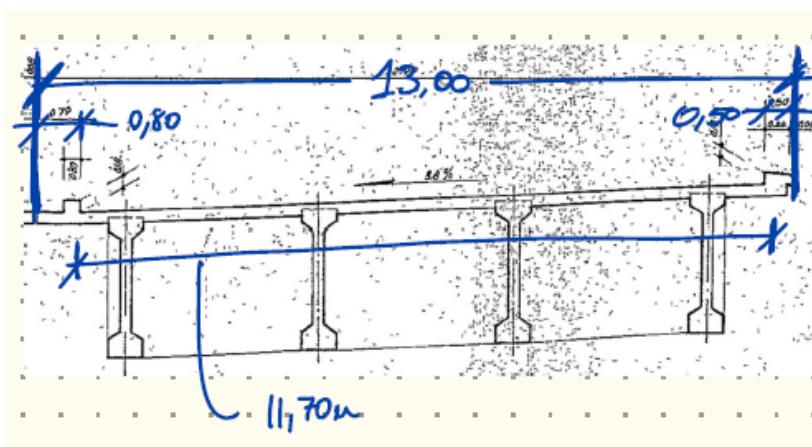
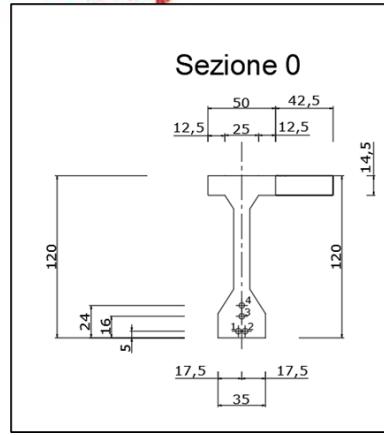
È possibile calcolare la resistenza della sezione

Dati d'ingresso:

- Anno di costruzione
- Geometria dell'opera

Calcolo delle:

- Proprietà geometriche
- Sollecitazione carichi permanenti



GEOMETRIA SEZIONE			
Trave	Luce della trave		
H _{tot} [m]	2.40	L [m]	
b _{sup} [m]	0.60	35.5	
b _{inf} [m]	0.60	Soletta	
t _{sup} [m]	0.20	b _{soletta} [m]	3.30
t _{inf} [m]	0.30	h _{soletta} [m]	0.22
t _w [m]	0.22	Y _{int,tradosso} [m]	2.50
h _{trac,sup} [m]	0.15	A _{soletta} [m ²]	0.73
h _{trac,inf} [m]	0.15	R _{ck} [MPa]	34.34
b _{trac,sup} [m]	0.00	f _{ck} [MPa]	-
b _{trac,inf} [m]	0.00	Posizione Travi	
h _w [m]	1.60	n° travi (n+1)	4
A _{trave} [m ²]	0.78	n	3
Y _{cts} [kN/m ³]	25.00	Interasse [m]	3.30
R _{ck} [MPa]	41.20	X _{prima trave} [m]	1.65
f _{ck} [MPa]	-	X _{G trave} [m]	6.60
Prop. SOLO TRAVE		Prop. SEZ. COMPOSTA	
I _{0,tot} [m ⁴]	0.5172	I _{0,tot} [m ⁴]	1.1326
W _{trave,inf} [m ³]	0.4469	W _{trave,inf} [m ³]	0.6405
W _{trave,sup} [m ³]	0.4161	W _{trave,sup} [m ³]	1.7932
Y _{g,inf} [m]	1.1571	W _{soletta,inf} [m ³]	2.2139
		W _{soletta,sup} [m ³]	1.5481
		Y _{g,inf} [m]	1.7684

PROGETTO SIMULATO	
<i>Rapporto N tiro-esercizio</i>	
N ₀ /N [-]	1.25
<i>Calcolo N ed e</i>	
a' [1/m ²]	1.61
b' [kN/m ²]	10743.69
a [1/m ²]	2.49
b [kN/m ²]	-26255.72
c [kN/m ²]	-18254.14
N [kN]	7326.38
e [m]	1.03
M [kNm]	7509.60

materiali tipici

Rc=40MPa

f_{ptk} [MPa]	1700.00
$f_{p(0.1)k}$ [MPa]	1445.00

CALCOLO MOMENTO RESISTENTE MEZZERIA			
[LG]			
Parametri		M_{rd}	
N_0 [kN]	9157.96909	Acciaio armonico infinitamente resistente	
N [kN]	7326.38	x [mm]	170.03
A_{sp} [mm ²]	7456	ϵ_{pudo} [%]	4.78%
$n_{trefoli}$ [-]	81	ϵ_{sp} [%]	4.52%
$A_{effettiva}$ [mm ²]	7524.9	$y_{g,sp}$ [mm]	1638.63
f_{py} [MPa]	1445.00	$y_{g,c}$ [mm]	661.27
f_c [MPa]	24.22	M_{rd} [kNm]	25007.92
		Check	VERO

$$\frac{M_{Rd,simulato}}{M_{Rd,progetto}} = \frac{25000}{28476} = 0.85$$

Il momento resistente del progetto simulato risulta 85% di quello calcolato con i dati del progetto originario



Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale

Accordo CSLLPP e ReLuis 2022-2024

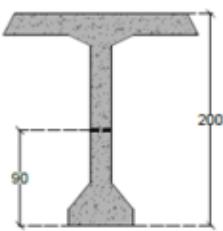
WP4 Sperimentazione su componenti strutturali e/o speciali

TASK 4.3 SISTEMI IN C.A.P.

Sub-Task 4.3.2 tecniche di diagnostica

Indagini e valutazioni dell'efficienza della precompressione negli impalcati da ponte

Autori: Daniele Losanno, Giovanni Plizzari, M. R. Pecce

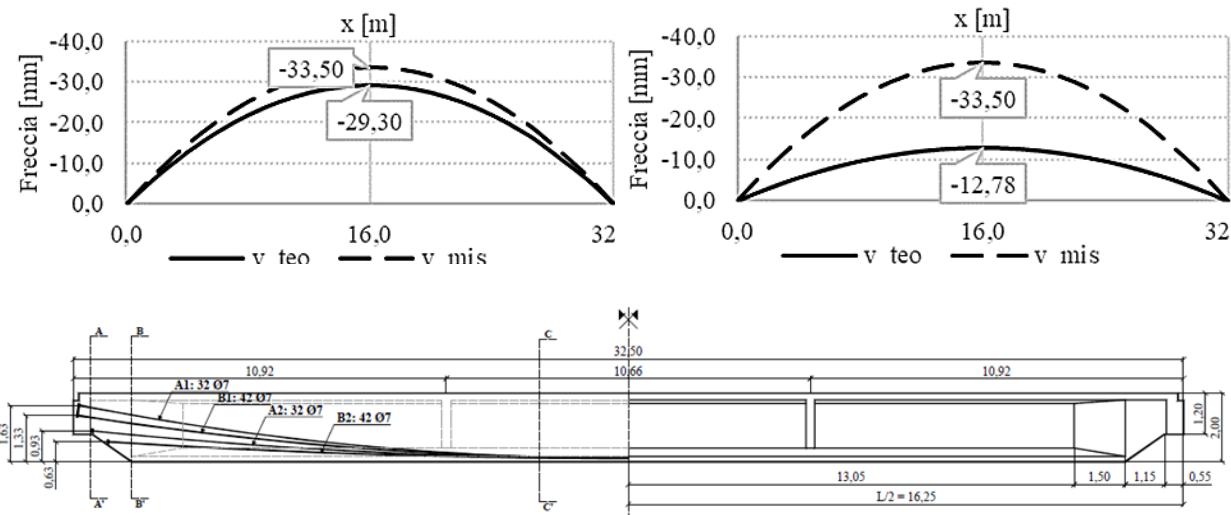


Sommario

1. Introduzione	3
2. Valutazione della precompressione	4
2.1. Misura indiretta attraverso la deformata / monta dell'impalcato	5
2.2. Misura indiretta attraverso la prova di vibrazione ambientale	8
2.3. Misura diretta attraverso le prove di rilascio tensionale	11
2.3.1. Rilascio dei fili	11
2.3.2. Rilascio del calcestruzzo	12
3. Saggi sui cavi di precompressione	14
3.1. Difetti di iniezione di malta nei cavi post-tesi	15
3.2. Le indagini da progettare	16
4. Esempi di applicazione su casi reali o su prove di laboratorio	25
4.1. Misura della monta dell'impalcato - UniNA: Applicazione ad un ponte reale	25
4.2. Rilascio del calcestruzzo - UniBS: applicazione in laboratorio	33
4.3. Misura indiretta attraverso la prova di vibrazione ambientale - UniNA	36
4.4. Difetti di iniezione di malta nei cavi post-tesi - UniNA	44
5. Schede riassuntive	6
6. Appendice - descrizione dei saggi	14
6.1. Saggio S1	14
6.2. Saggio S3-S5-S6 (cavi soletta superiore)	15
6.3. Saggio S2 e S23	17
6.4. Saggio S10, S21, S22, S23, S25, S27, S28	19
6.5. Saggio S17	22
6.6. Saggio S19, S20, S26	23
6.7. Saggio S29	26
6.8. Saggio S30	27
6.9. Saggio S12, S31, S32, S34, S35, S24, S18	27
6.10. Ancoraggi	31
6.11. Saggio 13	33
Bibliografia	34

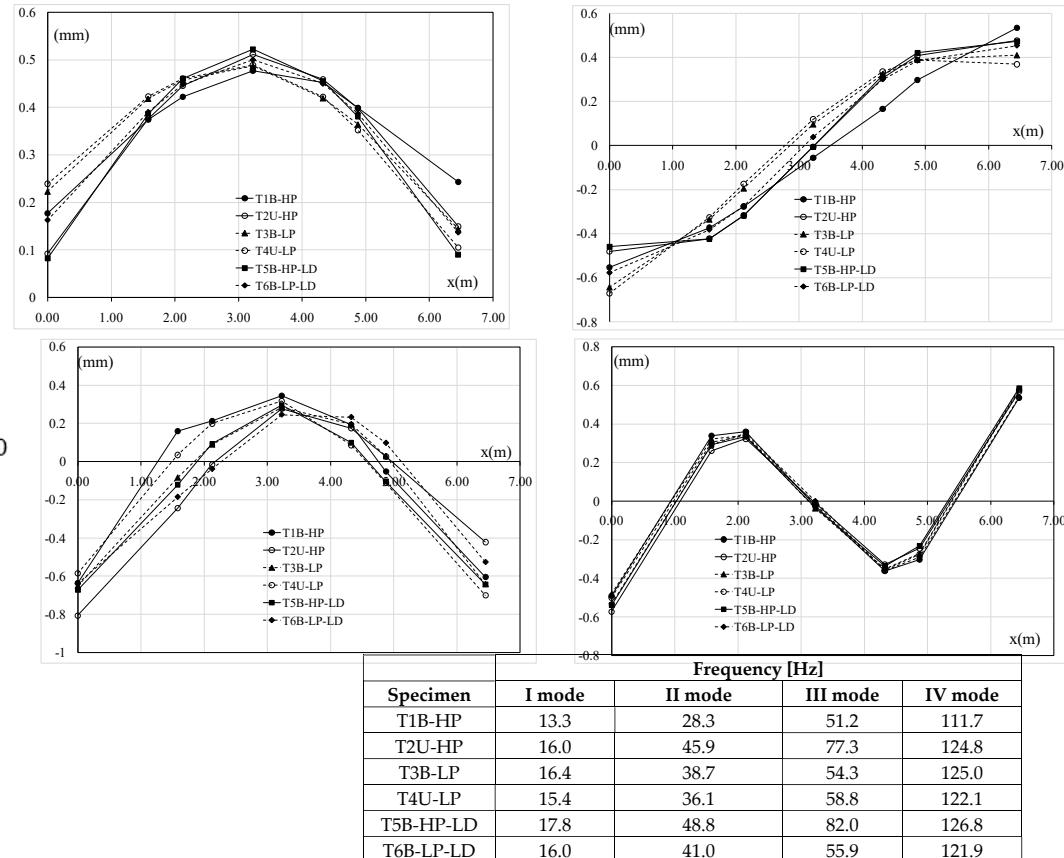
Misura precompressione residua mediante la misura della contrefreccia

Indicazioni per il calcolo della contrefreccia tenendo conto della viscosità ed esempio di applicazione



- Approccio 1: non vengono considerati i tempi di messa in carico delle diverse fasi costruttive valutando di conseguenza un unico coefficiente di viscosità $\phi(t, t_0)$ con cui calcolare le cadute di tensione a tempo infinito e le deformazioni in condizioni di lungo termine.
- Approccio 2: si considerano i tempi di messa in carico effettivi, da cui consegue una valutazione del coefficiente di viscosità specifico $\phi(t, t_0)$ per le diverse fasi di costruzione.

4 modi di travi uguali ma con diverso livello di precompressione



il danno dovuto alla fessurazione si rileva con la variazione di frequenze e modi solo quando è avanzato (step 2)

Variazione percentuale della frequenza

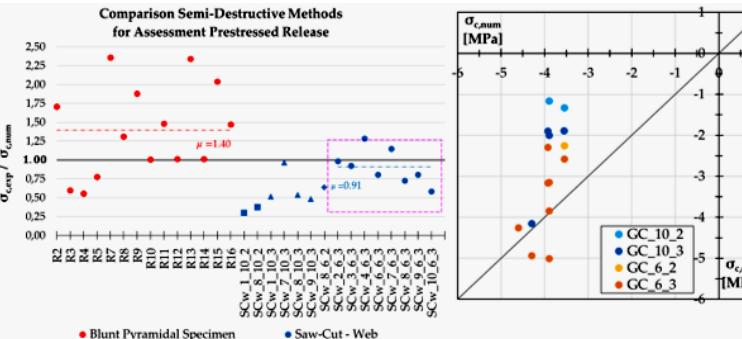
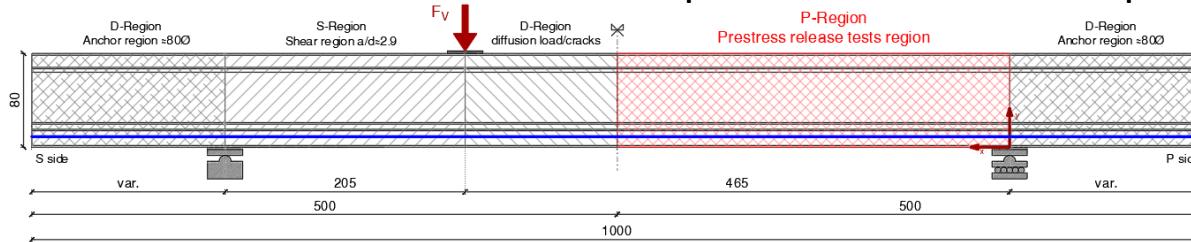
Provino	T1B-HP		T2U-HP		T3B-LP		T4U-LP	
Modo	$\Delta f_{1,0}$	$\Delta f_{2,0}$						
1	8.81	-8.81	0.00	-8.55	-4.75	-30.96	-3.82	-24.04
2	9.68	3.46	0.00	8.52	0.00	-2.02	-4.84	-7.56
3	-6.10	-3.81	-3.03	-2.77	-1.09	-4.33	1.99	-17.95
4	2.62	-12.76	0.00	-5.79	-0.15	-24.06	2.08	-13.92

Prove di rilascio tensionale nel cls per stimare il livello di precompressione

NUOVA PROPOSTA UniBS



#15 Tagli sull'anima



La tecnica è illustrata anche nel documento del WP3.2 in questo documento ci sono alcune prescrizioni

- Possibilmente dove le sollecitazioni sono modeste. Nel caso di travi isostatiche quindi, se la prova viene eseguita nell'anima (come ad esempio per carotaggi, coppie di tagli nell'anima e eventualmente i provini tronco piramidali) è bene che venga realizzata in mezzeria della luce della trave, dove il taglio è minore, e quindi lontano dagli appoggi, dove il taglio è massimo.
- Al contrario se la prova viene eseguita nella flangia inferiore (come, ad esempio, per coppie di tagli all'intradosso e provini tronco piramidali) è bene che venga realizzata in a circa 1/3 della luce della trave.
- lontana da zone di disturbo, come i carichi concentrati e lontana da fessure;
- lontano dalle zone fessurate (la sezione deve essere in campo elastico);
- lontano dalle armature trasversali e dall'armatura da precompressione in modo da evitare che vengano tagliate durante la prova. In generale si consiglia di eseguire i test tra una staffa e l'altra. Invece per evitare di danneggiare la armatura da precompressione, per l'esecuzione di coppie di tagli o provini tronco piramidali, bisogna verificare lo spessore del copriferro mediante scasso limitato (a una distanza di circa 100 cm dal punto di esecuzione della prova). **Se il copriferro è 35 mm è possibile eseguire la prova, se è < 35 mm, identificare un nuovo punto che non interessi l'armatura da precompressione.** I carotaggi invece sono sconsigliati in presenza di armatura da precompressione nella zona adiacente a quella individuata per l'esecuzione del test, ovvero tendenzialmente nell'anima.

Si raccomanda di eseguire tale prova nei casi in cui si osservano quadri fessurativi e danneggiamenti che, in una struttura precompressa, sia essa pretesa o post-tesa, possono essere ricondotti a perdite da precompressione.

#49 PROVE DI RILASCIO TENSIONALE

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

I tagli sull'anima forniscono il risultato più affidabile e conservativo

Ispezioni dirette dei cavi post-tesi

Documento di riferimento per stabilire il numero di saggi diretti sui cavi per valutare i difetti di iniezione di malta:
"Sampling, Assessing, and Resoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning" FHWA-HRT-13-028

I difetti di iniezione di malta non comportano sempre lo sviluppo della corrosione
La corrosione si verifica in presenza di acqua

Indicatori di probabilità del difetto

Condizione del ponte	Probabilità di degrado	Valore	Registri di costruzione e ispezione	Valore
Scarsa	Molto alta	5	Non esistono registrazioni di costruzione e ispezione	5
Moderata	Alta	4	Esistono registri di costruzione e ispezione limitati	4
Buona	Nella media	3	Esistono alcuni record di costruzione e ispezione	3
Molto buona	Bassa	2	Esistono registrazioni di costruzione e ispezione complete	2
Eccellente	Molto bassa	1	Esistono registrazioni di costruzione e ispezione molto complete	1

Categoria di ispezione visiva	Difetto maggiore	Difetto moderato	Difetto piccolo	Difetto molto piccolo	Nessun difetto
Segni di fuoriuscita di malta	5	4	3	2	1
Lavorazione	5	4	3	2	1
Cemento fessurato	5	4	3	2	1
Condizione della guaina (cavo visibile)	5	4	3	2	1
Vuoti (cavo visibile)	5	4	3	2	1

Geometria e lunghezza del cavo	Valore
Cavi lunghi multi campata con grandi variazioni di curvatura/grande distanza il punto più basso e quello più alto; cavi verticali alti	5
Cavi corti a campata singola con grandi variazioni di curvatura/grande distanza tra i punti più bassi e più alti; cavi verticali corti	4
Cavi lunghi con piccole variazioni di curvatura	3
Cavi dritti lunghi o corti con piccole variazioni di curvatura	2
Cavi corti dritti/orizzontali	1

$$P = \sum P_i W_{pi}$$

Contributo	W _{pi}
Condizione del ponte	0.15
Registri di costruzione	0.15
Valutazione dello stato visivo	0.30
Geometria e lunghezza del cavo	0.40

Si assume una distribuzione di probabilità ipergeometrica



esempio di applicazione
ad un caso di sono disponibili i saggi

Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale



Accordo CSLLPP e ReLUIS

2022-2024

WP4 SPERIMENTAZIONE SU COMPONENTI STRUTTURALI E/O SPECIALI

TASK 4.3 SISTEMI IN C.A.P.

Sub-Task 4.3.5

Sperimentazione su componenti strutturali e/o speciali

Autori: Belletti, La Mendola, Losanno, Pavese, Pecce, Plizzazi, Recupero



1	Indice dei contenuti	1
2	Premesse e finalità	4
2.1	Finalità dello studio:	4
2.2	Stato dell'arte	4
3	Quadro sinottico delle attività sperimentali	21
	Programmi sperimentali	25
4.1	Sperimentazione su travi in c.a.p. post-tese con difetti di iniezione (UNINA)	25
4.1.1	Finalità dei test	25
4.1.2	Geometria provini e peculiarità	25
4.1.3	Sistema di precompressione	27
4.1.4	Caratteristiche dei materiali	27
4.1.5	Prove preliminari sui materiali e sui provini	27
4.1.6	Modalità di prova (monotona, ciclica) e livelli di carico applicati anche con riferimento ai valori di norma	27
4.1.7	Risultati e curve sperimentali	28
4.1.8	Catalogazione dei dati e quadro fessurativo, descrizione delle modalità di collasso	30
4.1.9	Documentazione fotografica	31
4.1.10	Analisi e modellazione con particolare riferimento all'influenza dei difetti e del degrado	32
4.1.11	Modelli di capacità normativi	32
4.1.12	Risultati delle prove di identificazione dinamica	33
4.1.13	Conclusioni e proposte di modifica Linee Guida	34
4.1.14	Riferimenti:	35
4.2	Sperimentazione su travi in c.a.p. post-tese con danneggiamento del cavo (UNINA)	36
4.2.1	Finalità dei test	36
4.2.2	Geometria provini e peculiarità	36
4.2.3	Sistema di precompressione	36
4.2.4	Caratteristiche dei materiali	37
4.2.5	Prove preliminari sui materiali e sui provini	37
4.2.6	Modalità di prova (monotona, ciclica) e livelli di carico applicati anche con riferimento ai valori di normativa	37
4.2.7	Risultati e curve sperimentali (forza-spostamento)	39
4.2.8	Catalogazione dei dati e quadro fessurativo, descrizione delle modalità di collasso	41
4.2.9	Documentazione fotografica	42
4.2.10	Analisi e modellazione con particolare riferimento all'influenza dei difetti e del degrado	44
4.2.11	Modelli di capacità normativi	44
4.2.12	Conclusioni e proposte di modifica Linee Guida	45
4.2.13	Riferimenti:	46
4.3	Test su travi prelevate da strutture reali (UniPV/EUCENTRE)	47
4.3.1	Finalità dei test	47
4.3.2	Geometria dei provini	47
4.3.3	Sistema di precompressione	48
4.3.4	Caratteristiche dei materiali	49
4.3.5	Prove preliminari sui materiali e sui provini	50
4.3.6	Prove sperimentali sulla trave L=24.3 m	51
4.3.7	Prove sperimentali sulla trave L=32.8 m	55
4.3.8	Analisi numeriche di confronto e modellazione con particolare riferimento all'influenza dei difetti e del degrado	67
4.3.9	Modelli di capacità normativi	68
4.3.10	Proposte di modifica e Impatto sulle Linee Guida	69
4.4	Sperimentazione su travi in c.a. post-tese (UNIPA)	71
4.4.1	Finalità dei test	71
4.4.2	Geometria dei campioni	71
4.4.3	Sistema di precompressione	72
4.4.4	Layout di prova e posizionamento della strumentazione	73
4.4.5	Caratteristiche dei materiali	73
4.4.6	Prove preliminari sui materiali	74
4.4.7	Modalità di prova e risultati	74
4.4.8	Risultati e curve sperimentali	74
4.4.9	Catalogazione dei dati e quadro fessurativo, descrizione delle modalità di collasso	76
4.4.10	Documentazione fotografica	77
4.4.11	Analisi e modellazione	78
4.4.12	Modelli di capacità normativi	79
4.4.13	Proposte di modifica e Impatto sulle Linee Guida	80
4.4.14	Riferimenti:	80
4.5	Prove di carico a taglio su travi in c.a.p. con diversi livelli di precompressione (UniBS)	82
4.5.1	Finalità dei test	82
4.5.2	Geometria provini e peculiarità	82
4.5.3	Sistema di precompressione	83
4.5.4	Caratteristiche dei materiali	84
4.5.5	Prove preliminari sui materiali e sui provini	84
4.5.6	Modalità di prova (monotona, ciclica) e livelli di carico applicati anche con riferimento ai valori di norma	85
4.5.7	Risultati e curve sperimentali (forza-spostamento, ecc)	85
4.5.8	Catalogazione dei dati e quadro fessurativo, descrizione delle modalità di collasso	88
4.5.9	Documentazione fotografica	90
4.5.10	Analisi e modellazione con particolare riferimento all'influenza dei difetti e del degrado	90
4.5.11	Modelli di capacità normativi	90
4.5.12	Proposte di modifica e Impatto sulle Linee Guida	95
4.6	Test su provini di nuova costruzione/as-built (UniPR)	96
4.6.1	Finalità dei test	96
4.6.2	Geometria provini e caratteristiche dei materiali	96
4.6.3	Produzione	97
4.6.4	Setup di prova	99
4.6.5	Risultati provini non corrosi	99
4.6.6	Calibrazione legge di aderenza – provini non corrosi	100
4.6.7	Preparazione provini e descrizione del processo corrosivo	101
4.6.8	Controllo processo corrosivo	103
4.6.9	Risultati provini corrosi	104
4.6.10	Analisi e modellazione con particolare riferimento all'influenza dei difetti e del degrado	105
4.6.11	Modelli di capacità normativi	105
4.6.12	Proposte di modifica e Impatto sulle Linee Guida	105

Unità Reluis	Origine	Riferimento sito prelievo	Scala provino t:s (Indicare s)	Numero di provini per la tipologia	Metodo di applicazione dei carichi	Modalità di prova speciale (descrizione)	Obiettivo prova	Tipo di precompressione	Armatura per precompressione	Presenza di difetti	Presenza di degrado	Luce trave (m)	Sezione	h (m)	b (m)	w (m)	s (m)	b1 (m)	b2 (m)	sd (m)	su (m)	Sale tta	
UniNA	Replica in laboratorio		5	8	Carichi puntuali (M trapezoidale)		Resist. Flessione	Cavi scorrevoli	Trefoli	iniezione guaine	Nessuno/Non rilevabile	6.6	T (definire w, b, h, s)	0.44	0.48	0.15	0.06					Senza soletta	
UniPV	Prelevato in situ (rifer. sito →)	Non divulgabile	1	3	Carichi puntuali (M trapezoidale)		Resist. Taglio	Aderenti-scorrevoli	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	24.2	Doppio T (definire w, b1, b2, sd, su, h)	1.2		0.17	0.06	0.46	0.46	0.12	0.07	Senza soletta	
UniPV	Prelevato in situ (rifer. sito →)	Non divulgabile	1	1	Carichi puntuali (M triangolare)		Resist. Flessione	Cavi scorrevoli	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	32.6	Doppio T (definire w, b1, b2, sd, su, h)	1.42		0.24	0.06	0.6	0.72	0.2	0.22	Senza soletta	
UniPA	Replica in laboratorio		2	3	Carichi puntuali (M trapezoidale)	Trave in c.a. non precompressa	Resist. Flessione			Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	5.4	T (definire w, b, h, s)	0.6	0.6	0.2	0.15					Senza soletta	
	Replica in laboratorio		2	3	Carichi puntuali (M trapezoidale)	Trave precedente in c.a. rinforzata	Resist. Flessione	Esterne	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	5.4	T (definire w, b, h, s)	0.6	0.6	0.2	0.15					Senza soletta	
	Replica in laboratorio		2	3	Carichi puntuali (M trapezoidale)	trave originaria in c.a. direttamente rinforzata	Resist. Flessione	Esterne	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	5.4	T (definire w, b, h, s)	0.6	0.6	0.2	0.15					Senza soletta	
UniPR	Replica in laboratorio			24				Cavi aderenti	Trefoli	iniezione guaine	Nessuno/Non rilevabile	0.36	Rettangolare (definire b, h)	0.15	0.15								Senza soletta
UniBS	Replica in laboratorio		1	2	Carichi puntuali (M triangolare)		Resist. Taglio	Cavi aderenti	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	10	Doppio T (definire w, b1, b2, sd, su, h)	0.8		0.18		0.5	0.5	0.18	0.15	Senza soletta	
UniBS	Replica in laboratorio		1	2	Carichi puntuali (M triangolare)		Resist. Taglio	Cavi scorrevoli	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	10	Doppio T (definire w, b1, b2, sd, su, h)	0.8		0.18		0.5	0.5	0.18	0.15	Senza soletta	
Totale				49																			

- Quadro sinottico
- Sintesi delle attività sperimentali
- Osservazioni sui risultati e proposte per le Linee Guida
- Confronti con formule normative

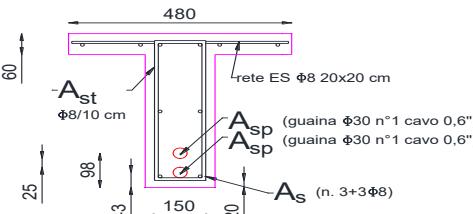
Prove a flessione di travi in scala 1:5 in c.a.p. con danneggiamento dei trefoli

PIANO PROVE Sperimentali

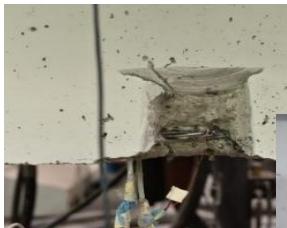
8 Travi

- **#2** Travi perfettamente iniettate (HP e LP)
 - **#2** Travi senza iniezione (HP e LP)
 - **#2** Travi con 1 m di difetto di iniezione (HP e LP)
 - **#2 Travi con taglio del cavo** (HP e LP)

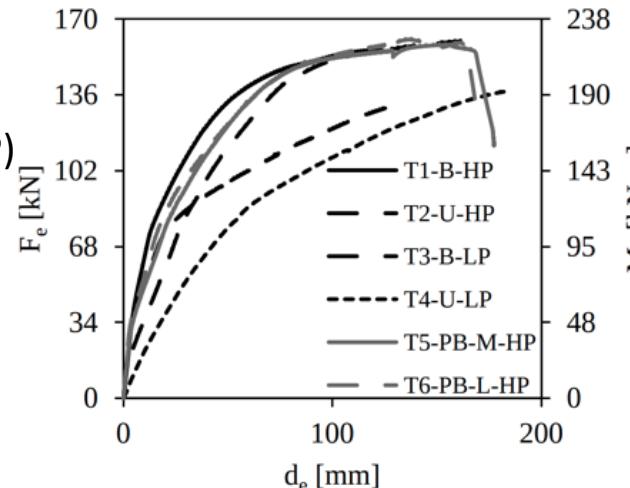
Effetto del danno/degrado su travi in c.a.p.



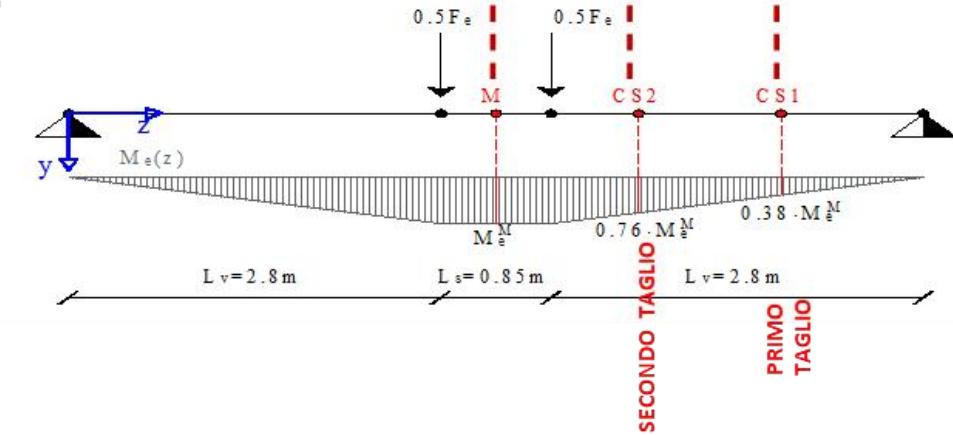
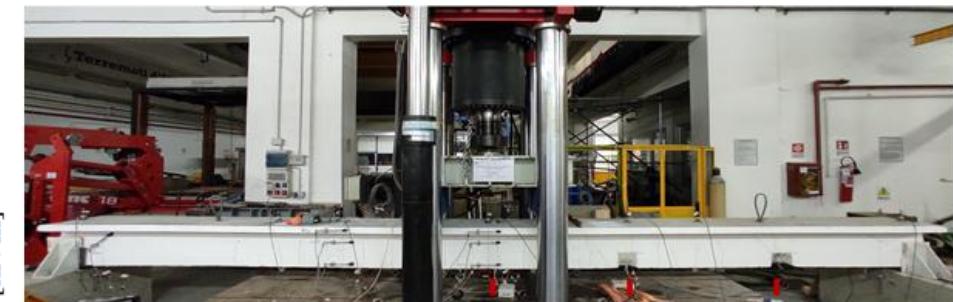
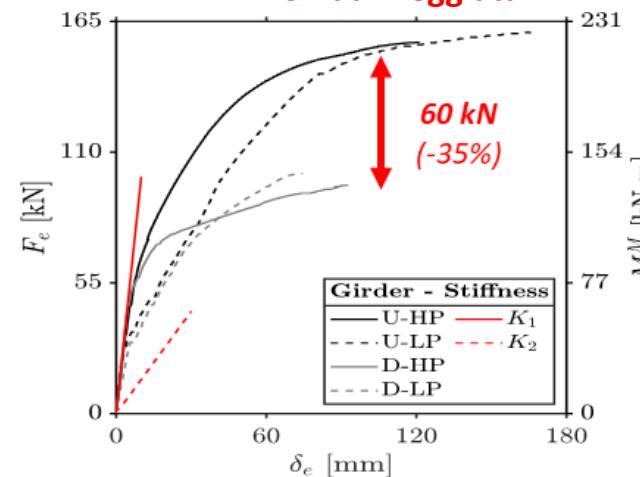
CAVO INFERIORE INTEGRO



... TAGLIATO



Confronto tra danneggiata e non danneggiata

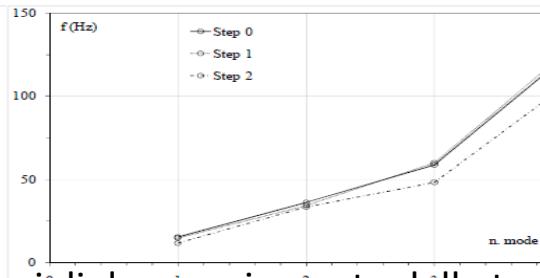
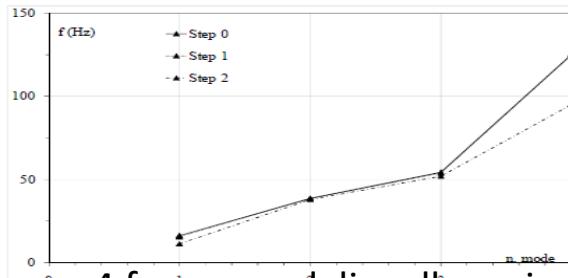
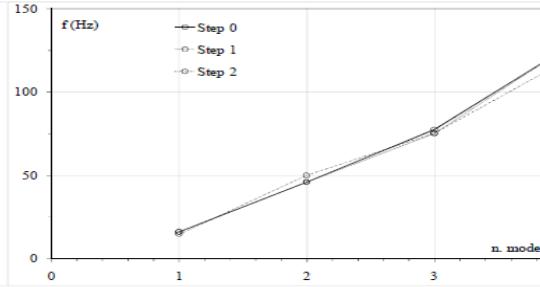
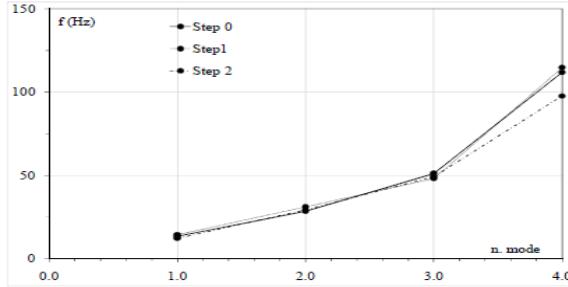


IMPATTO sulle Linee Guida

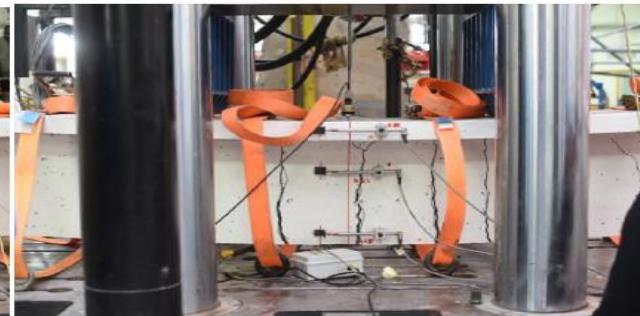
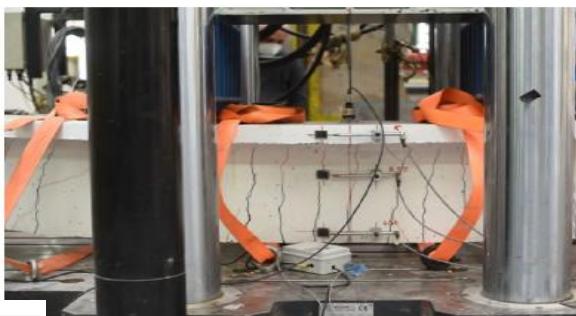
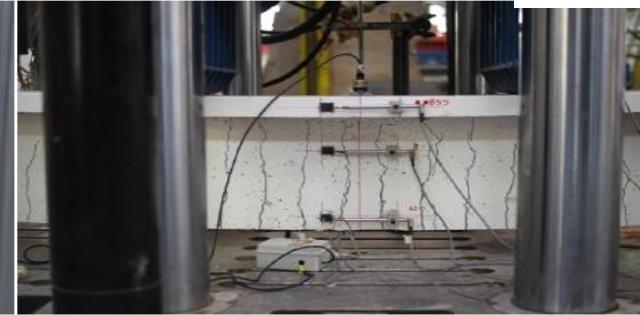
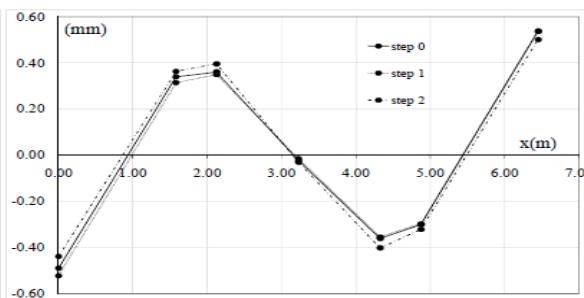
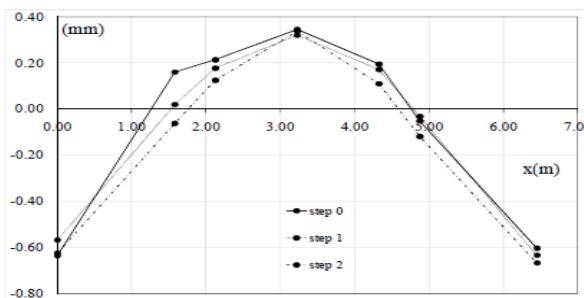
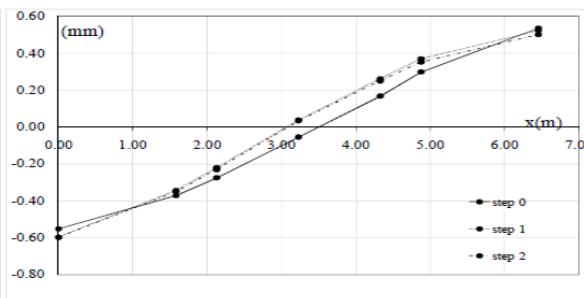
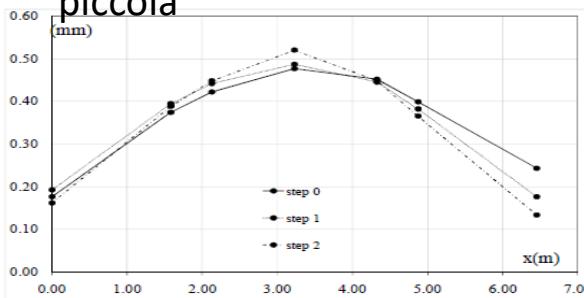
I difetti di malta non evidenziano effetti sulla risposta deformativa e sulla resistenza

Il taglio del cavo non è rilevante in condizioni di esercizio

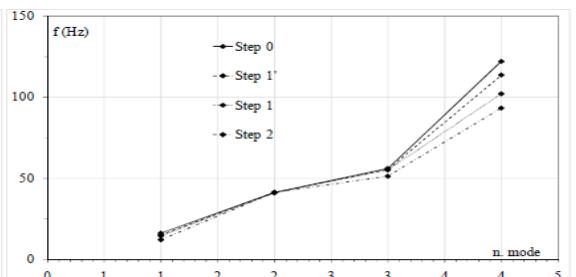
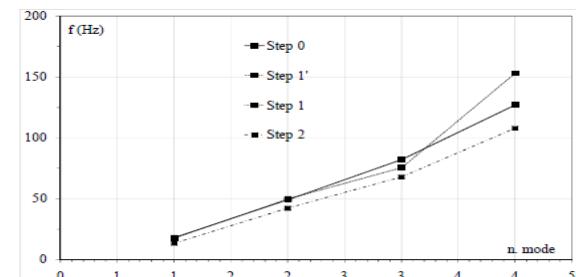
Prove dinamiche per il damage detection



4 forme modali nelle varie fasi di danneggiamento delle travi :
piccola



Frequenze per i 4 modi delle 2 travi in cui viene tagliato il cavo

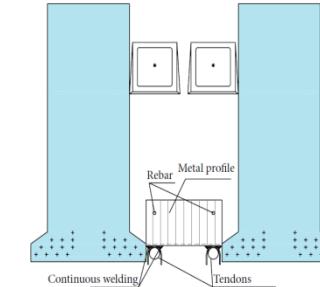
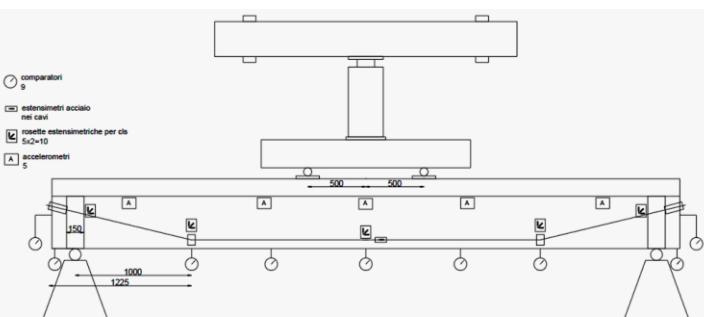
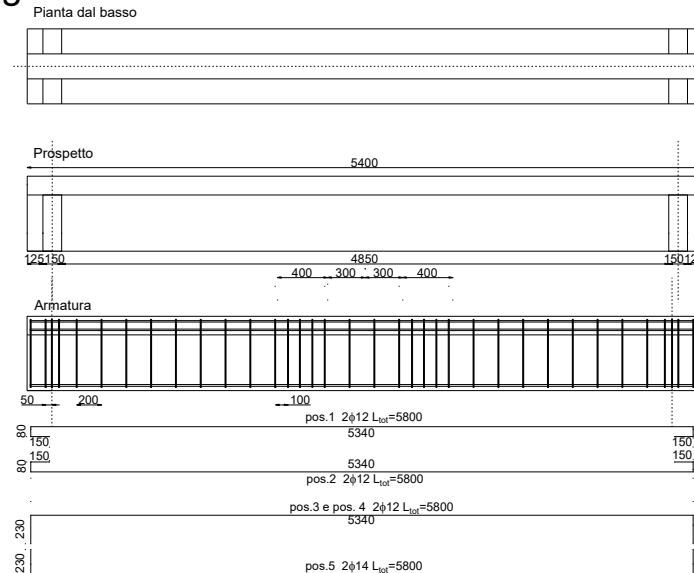


Il taglio dei cavi viene evidenziato dopo la fessurazione estesa

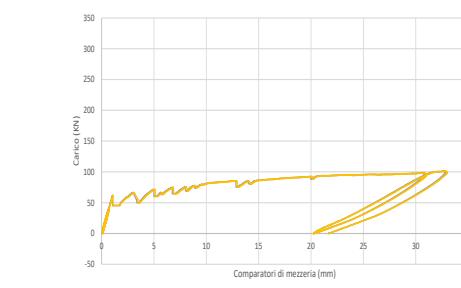
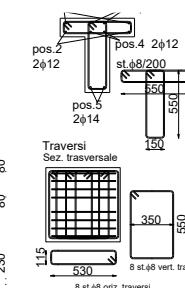
Prove sperimentali su travi in c.a. rinforzate con cavi esterni

La campagna sperimentale prevede la realizzazione di n. 6 travi in c.a. ordinario con sezione a T di lunghezza 5.40 m, che rappresentino (in scala) delle travi da ponte con soletta. L'obiettivo è quello di simulare una situazione realistica in situ in cui si vuole incrementare la resistenza di una trave danneggiata.

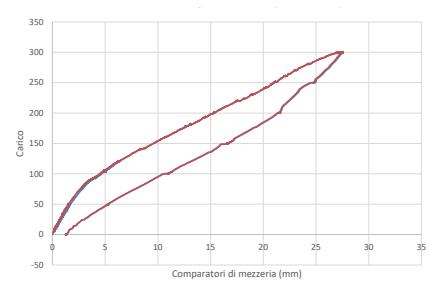
Delle 6 travi: 3 vengono rinforzate direttamente; 3 vengono pre-danneggiate e poi rinforzate. Sarà effettuata una campagna analoga a Messina



Un applicazione
reale sul ponte
Terdoppio



Carico-freccia trave in c.a. nella fase di pre-fessurazione



Carico-freccia trave rinforzata

Carico massimo trave in c.a.: 110 kN

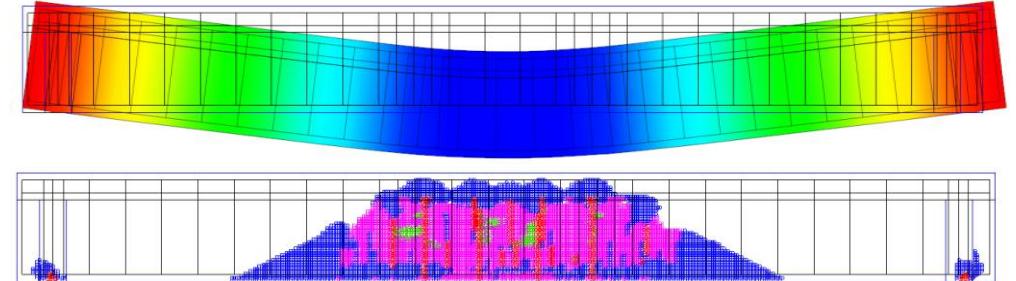
Spostamento massimo in mezzeria: 30 mm

Precompressione: 2 trefoli T15, P = 160 kN per trefolo

Carico massimo dopo precompressione: 320 kN

Sistema di rinforzo efficiente

Esecuzione delle prove e modello FE di riferimento

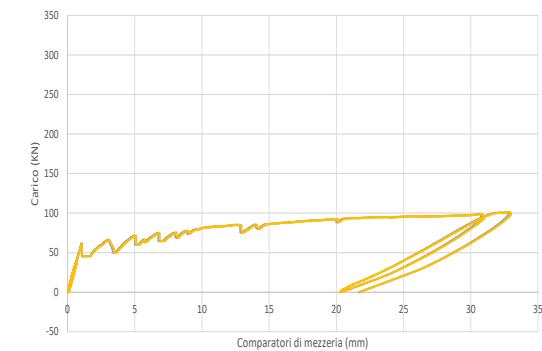
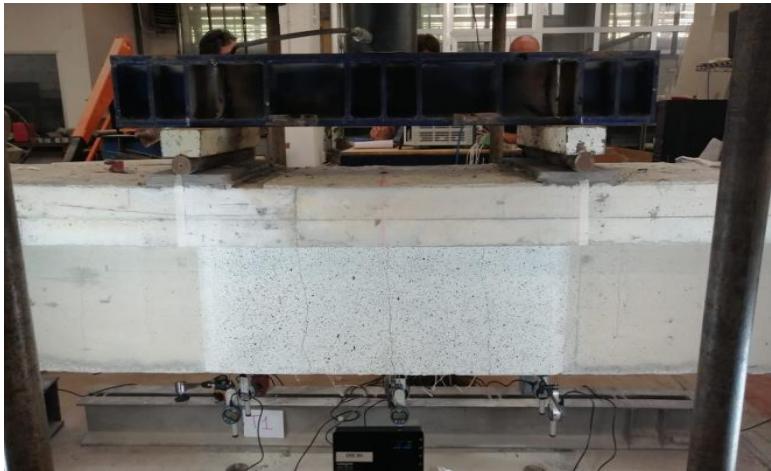


Carico massimo trave in c.a.: 110 kN

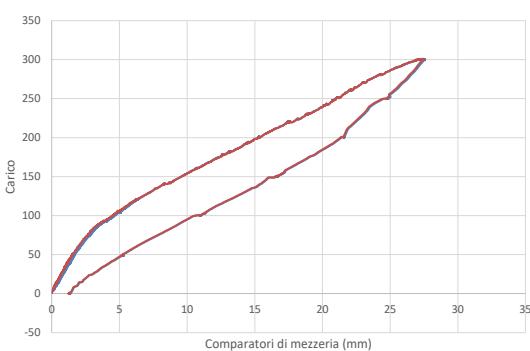
Spostamento massimo in mezzeria: 30 mm

Precompressione: 2 trefoli T15, $P = 160$ kN per trefolo

Carico massimo dopo precompressione: 320 kN



Carico-freccia trave in c.a. nella fase di pre-fessurazione



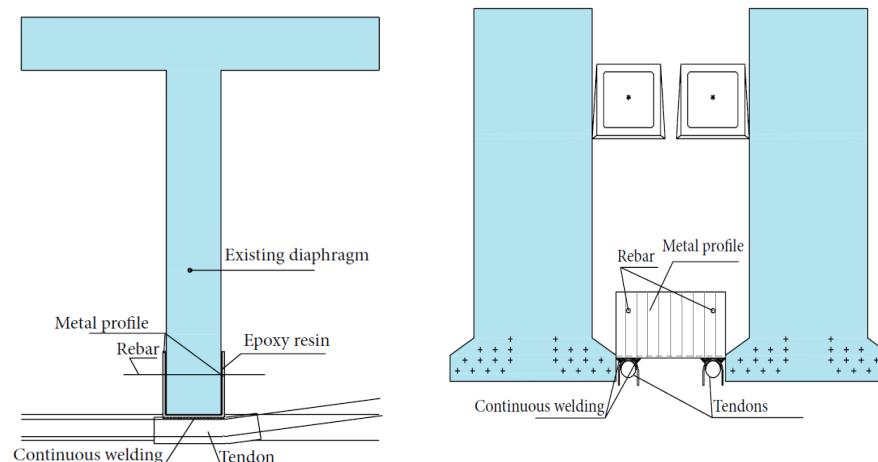
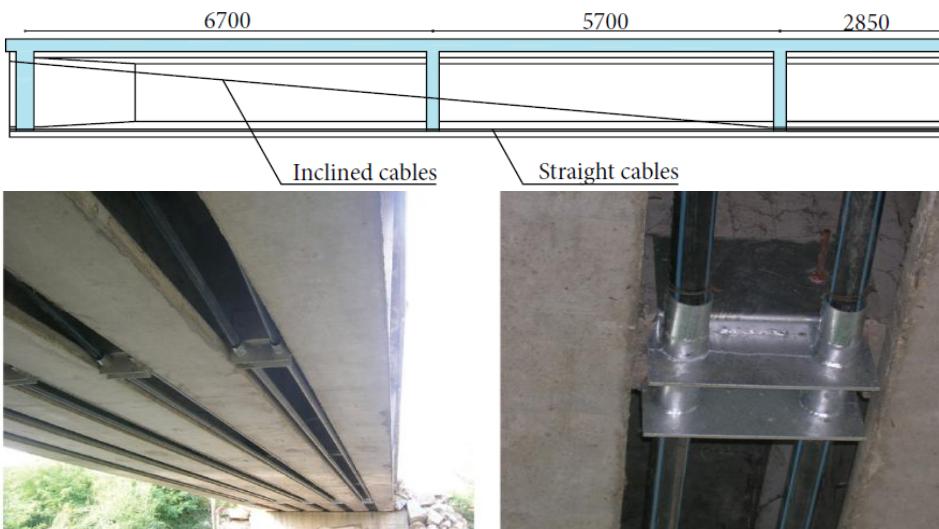
Carico-freccia trave rinforzata

La campagna sperimentale è analoga a quella di Palermo. Sono state confezionate n. 6 travi in c.a. ordinario con sezione a T di lunghezza 5.40 m,

Queste sono state studiate per rappresentare (in scala) delle travi da ponte con porzione di soletta. L'obiettivo è quello di studiare il rinforzo degli impalcati da ponte esistenti tramite precompressione esterna.

Durante l'installazione del rinforzo e durante le prove saranno effettuati dei test diagnostici per valutare la validità di tali tecniche nella stima della precompressione realmente introdotta nelle strutture.

Delle 6 travi: 3 vengono rinforzate direttamente; 3 vengono pre-danneggiate e poi rinforzate.



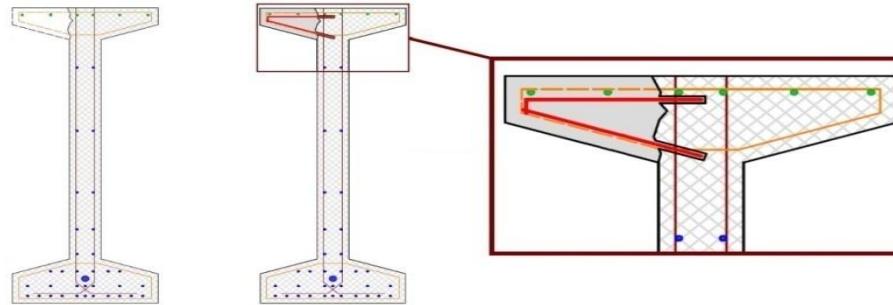
Un applicazione reale sul ponte Terdoppio

Prove a collasso con carichi monotoni, 4 test di travi as-built a seguito di un intervento di sostituzione e ripristino, da un ponte esistente con sistema misto di precompressione

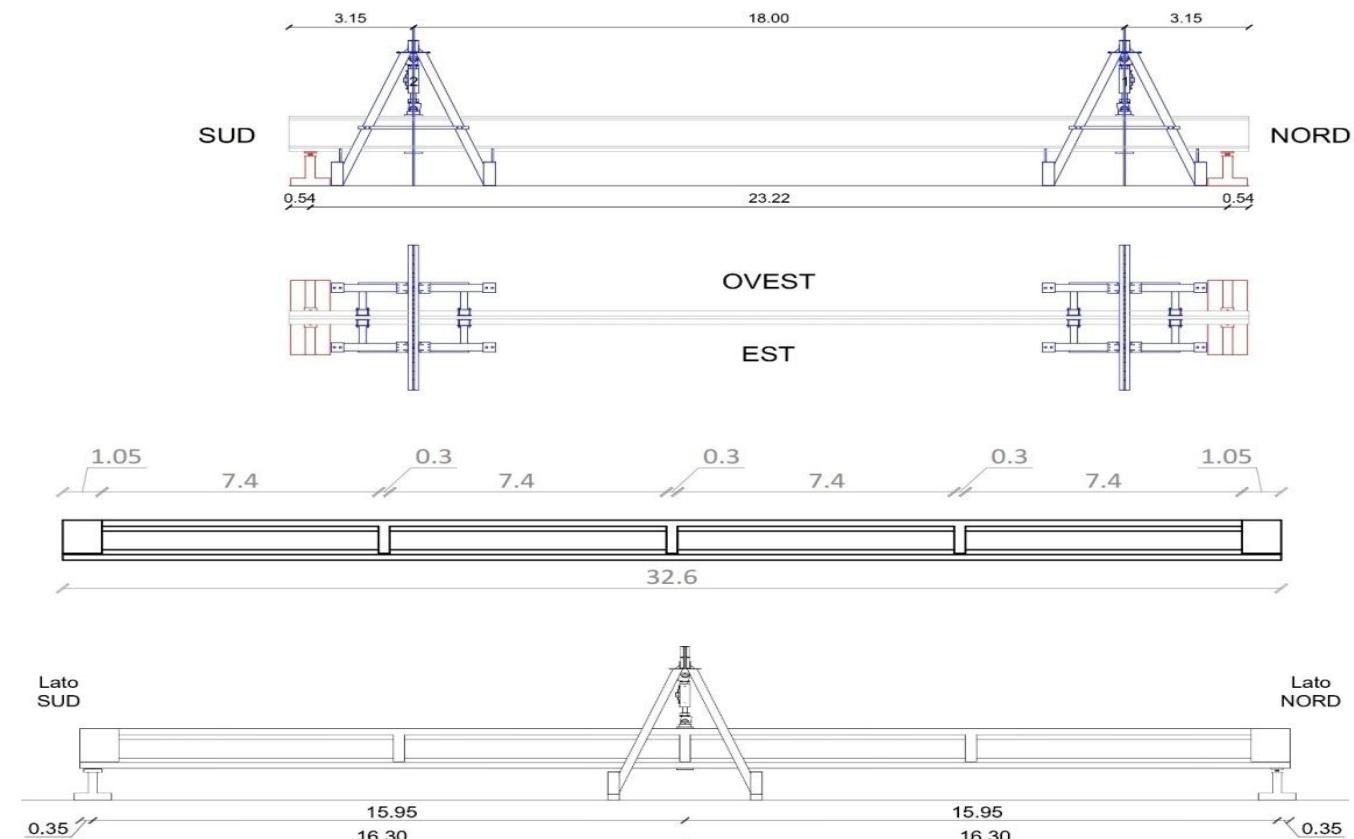
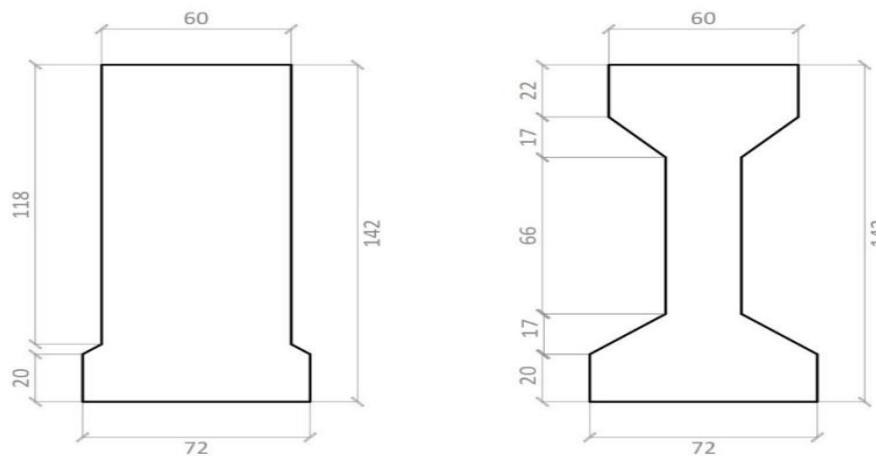
- 3 travi $h_{seziona} = 1.20$ m, luce = 24.30 m
- 1 trave $h_{seziona} = 1.42$ m, luce = 32.80 m

Prove non distruttive e semi distruttive (in parziale sovrapposizione con il task 3.2)

Travi 24.30 m



Trave 32.80 m



Indagini preliminari, valutazione delle caratteristiche dei materiali e delle condizioni di danno preesistente sulle travi



Prove su cilindri prelevati con carotaggi

Travi 1 e 2

	[MPa]	[MPa]
In mezzeria	38,26	51,48
In mezzeria	32,37	51,06
Al quarto	35,19	46,01
Al quarto	32,19	49,47
Media	34,50	49,51

Prove su trefoli – Trave 3

	[kg/cm ²]	[MPa]
Limite convenzionale allo 0,1% di deformazione	12500	1226
Limite convenzionale allo 0,2% di deformazione	14000	1373
Sollecitazione a rottura	16500	1618

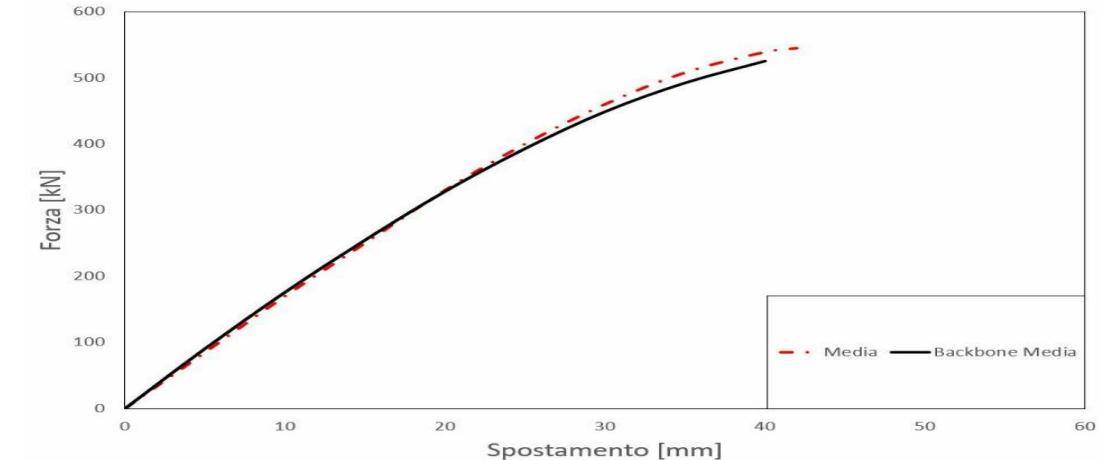
Prove su armatura lenta – Travi 1 e 2 diametri 8 mm e 10 mm

	Sezione [mm ²]	Snervamento [MPa]	Rottura [MPa]
Barra 1	52,56	510,8	728,3
Barra 2	52,82	497,8	644,3
Barra 3	52,92	509,4	718
Media	52,8	506	696,9

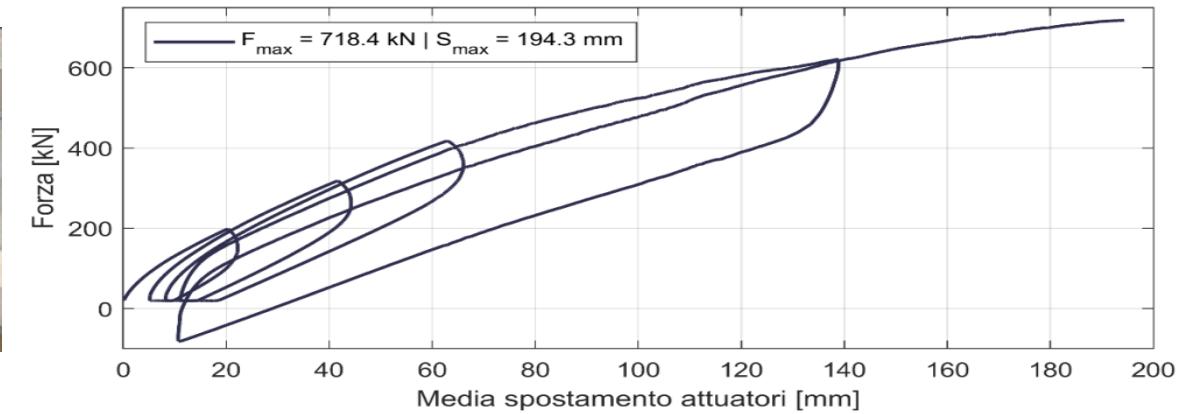
	Sezione [mm ²]	Snervamento [MPa]	Rottura [MPa]
Barra 1	116,84	430	648
Barra 2	116,69	443	650
Barra 3	113,35	438	633
Media	115,63	436,9	643,5

Prove a collasso delle travi, valutazione delle resistenza e delle modalità di collasso

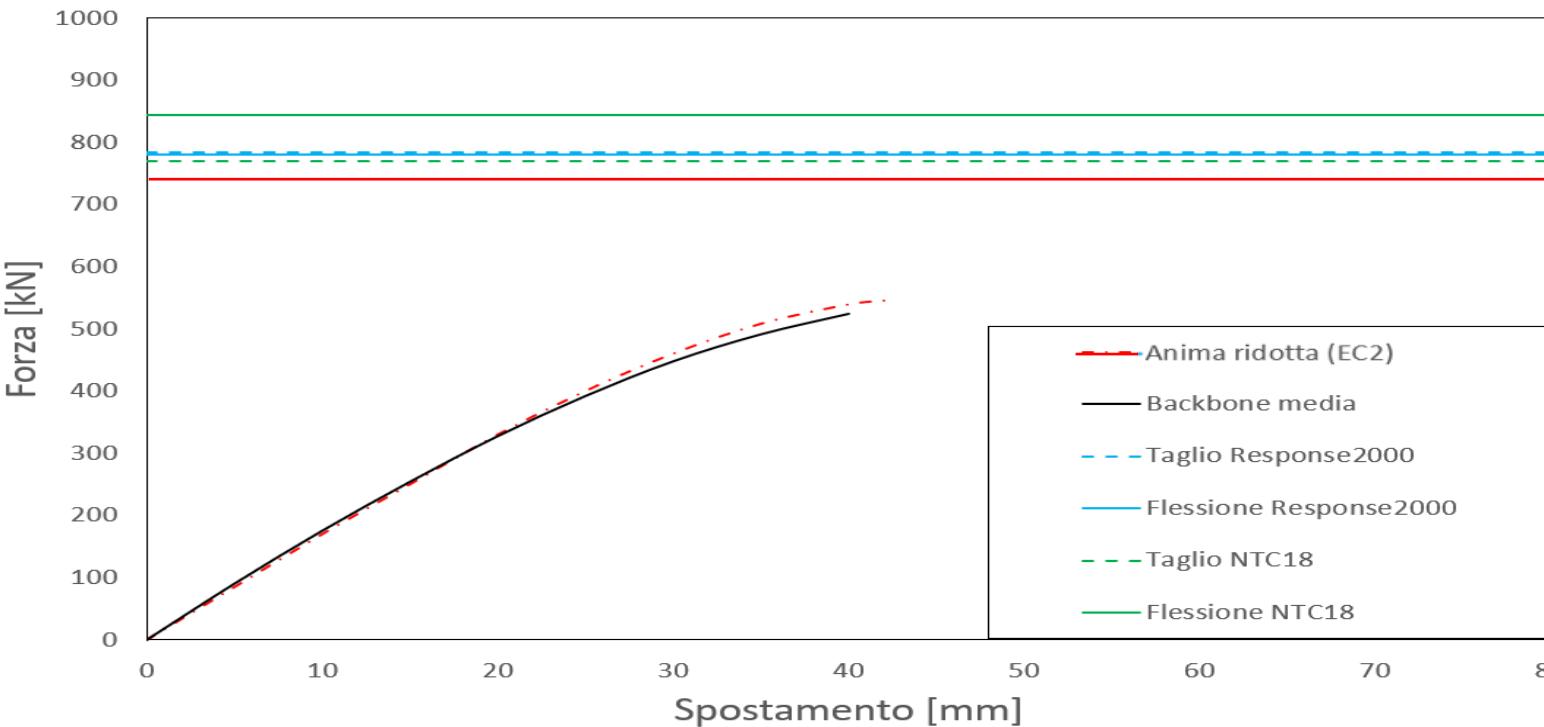
Travi 24.30 m



Trave 32.80 m



Valutazione preliminare delle resistenze raffrontate ai modelli di normativa calcolate utilizzando NTC18, EC2 e Response2000 (E. Bentz)



L'Eurocodice2, per il calcolo della resistenza a taglio, prevede una riduzione della larghezza dell'anima della trave pari a metà del diametro della guaina contenente il cavo post-teso

Attività conclusive

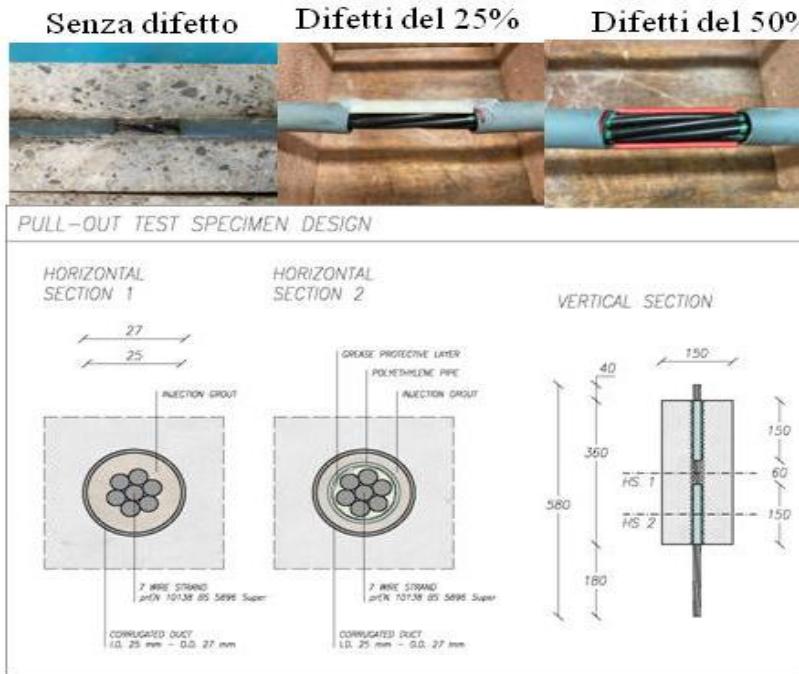
- Valutazione accurata delle modalità di collasso
- Valutazione prestazioni-danno preesistente
- Valutazione deviazione rispetto ai modelli di normativa relativamente alle resistenze a taglio e flessionale (attività in cooperazione con **UniPV**)

Obiettivo: definire una legge di aderenza di interfaccia tra trefoli e boiacca di iniezione tramite prove di PULL - OUT con particolare attenzione all'effetto combinato di:

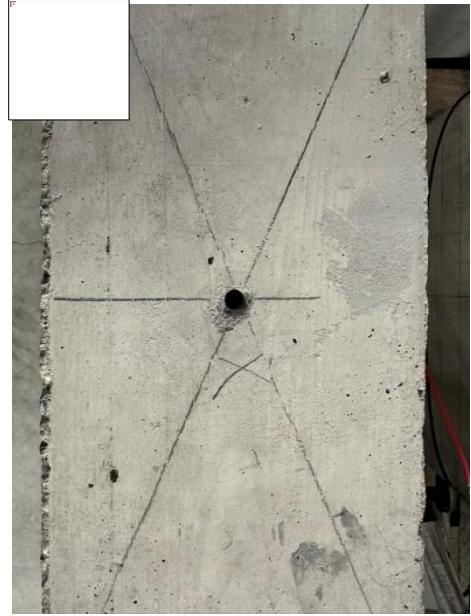
- **Corrosione dei trefoli** (2 scenari di 3 mesi e 6 mesi)
- **Difetti nel getto di boiacca** riconducibili a mancanza locale di boiacca. Il difetto è simulato inserendo un elemento in plastica all'interno del tubo zincato. La zona di aderenza considerata è di 60mm.

Totale provini: 36 (12 senza difetto, 12 con difetto 25% e 12 con difetto 50%).

Data inizio processo corrosivo: 05/04/2024



Geometria provini



Metodo di corrosione eletrolitico

1. I provini sono stati forati su due facce longitudinali opposte (diametro di 8mm).
2. Utilizzo di un tubo in PCV fissato con silicone alla base in corrispondenza del foro come serbatoio per la soluzione $H_2O - NaCl$ al 3% rabboccata con acqua quotidianamente per mantenere livello costante



Obiettivo: definire una legge di aderenza di interfaccia tra trefoli e boiacca di iniezione tramite prove di PULL - OUT con particolare attenzione all'effetto combinato di:

- **Corrosione dei trefoli** (2 scenari di 3 mesi e 6 mesi)
- **Difetti nel getto di boiacca** riconducibili a mancanza locale di boiacca. Il difetto è simulato inserendo un elemento in plastica all'interno del tubo zincato. La zona di aderenza considerata è di 60mm.

Totale provini: 36 (12 senza difetto, 12 con difetto 25% e 12 con difetto 50%).



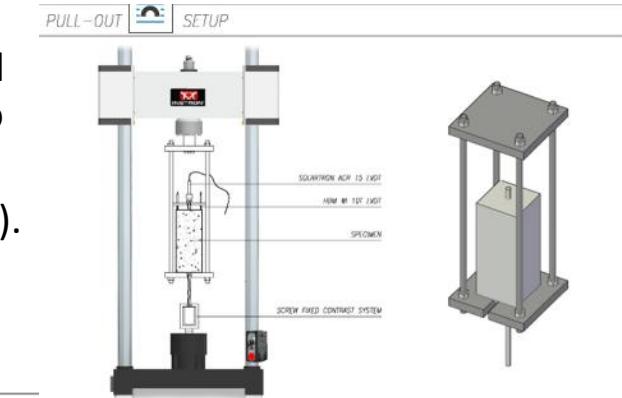
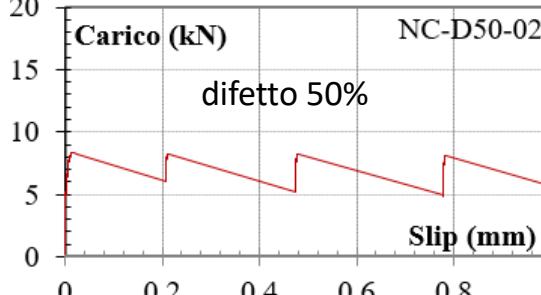
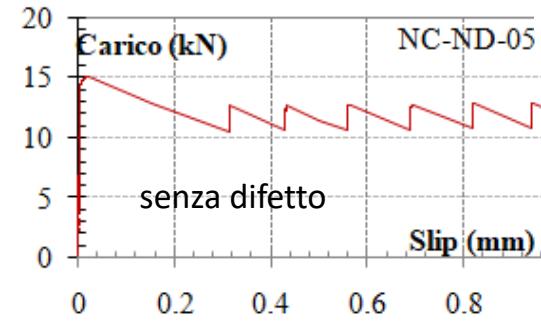
Geometria provini

Metodo di corrosione elettrolitico

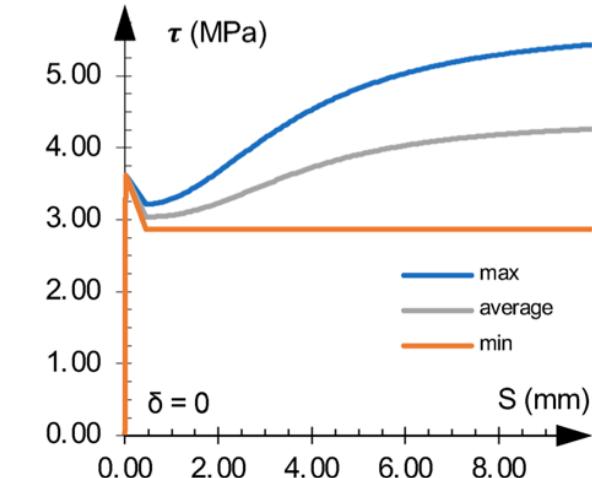
1. I provini sono stati forati su due facce longitudinali opposte (diametro di 8mm).
2. Utilizzo di un tubo in PCV fissato con silicone alla base in corrispondenza del foro come serbatoio per la soluzione $H_2O - NaCl$ al 3% rabboccata con acqua quotidianamente per mantenere livello costante

Riduzione del 30% della tensione tangenziale

Legame di aderenza
Provini non corrosi



Calibrazione di modelli

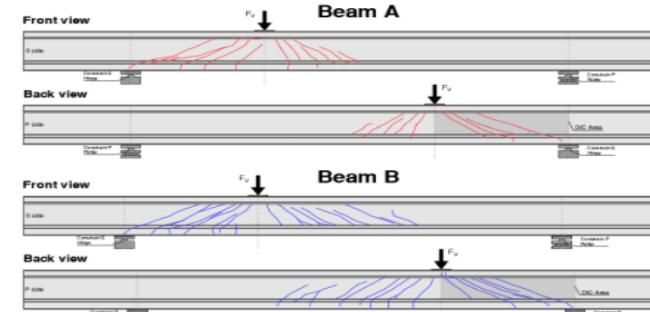
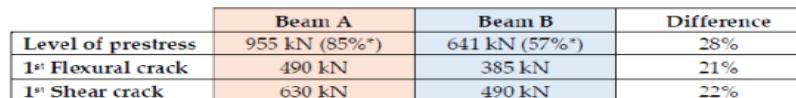


Prove a taglio

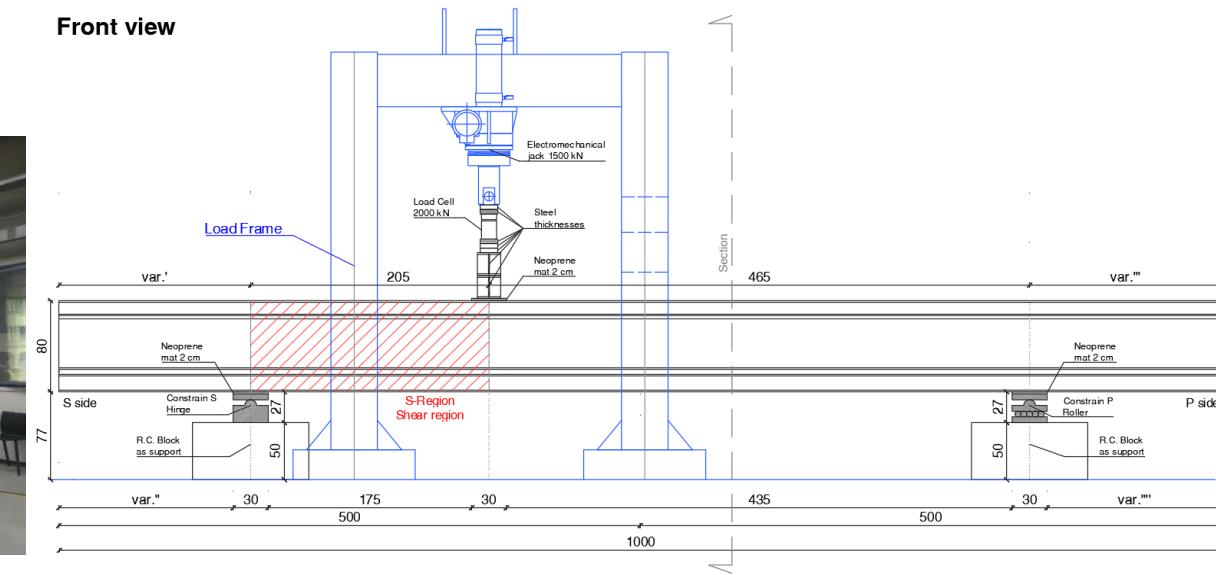
#4 Travi – prove a taglio	
Sezione trasversale	I - Beam
Altezza	80 cm
Lunghezza	10 m
Materiale	C50/60
a/d	2.9

Armatura	
Trasv.	2 Ø8/30
Long.	Trave A: 4 Ø8 – $\rho = 0,08\%$
	Trave B: 4 Ø8 + 2 Ø26 – $\rho = 0,5\%$
	Trave C: 4 Ø12 – $\rho = 0,18\%$
Trefoli	$\varnothing = 6/10 \text{ in.} = 15.2 \text{ mm}$

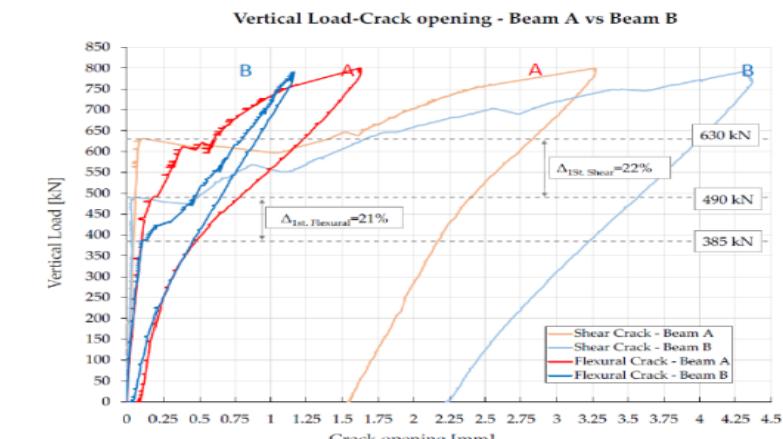
Tipologia	Quantità	Precompressione	
Trave A	1	Pre-Tens.	100%
Trave B	1	Pre-Tens.	70%
Trave C	2	Post-Tens.	Variabile 60%÷100%



Front view



Setup di prova



RIDUZIONE DELLA PRECOMPRESIONE

MAGGIOR CRITICITA' A TAGLIO

Accordo CSLPP e ReLUIS
2022-2024

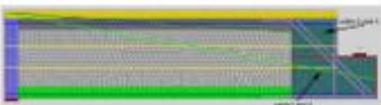
WP4 SPERIMENTAZIONE SU COMPONENTI STRUTTURALI E/O SPECIALI

TASK 4.3 SISTEMI IN C.A.P.

Sub-Task 4.3.3

Approcci di modellazione e analisi

Autori: Belletti, La Mendola, Losanno, Recupero, Povese



Indice

1. Introduzione. L'attività di modellazione nell'ambito del Task 4.3 – Precompressione
2. Tipologie di modelli implementati dalle U.R. e obiettivi della modellazione strutturale
3. Modelli sezionali
4. Modelli locali
5. Modelli globali
6. Metodologie utilizzate e risultati conseguiti nell'ambito dell'attività del Task
7. Conclusioni

Bibliografia e prodotti connessi al task

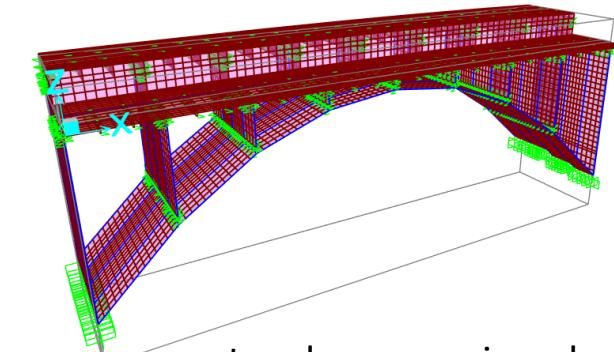
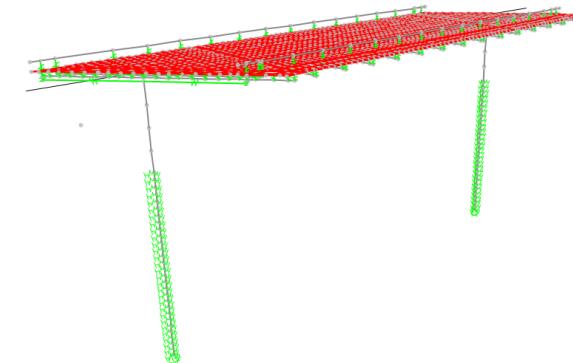
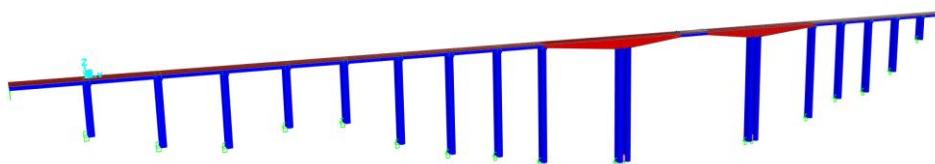
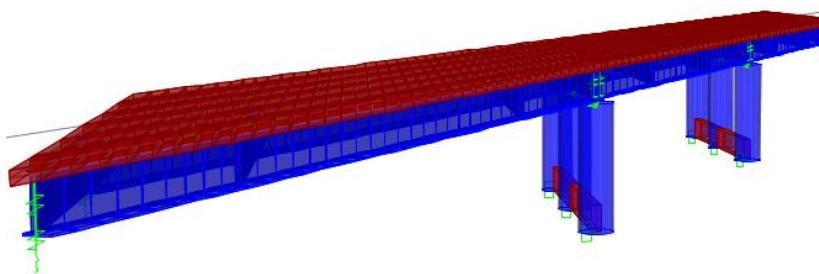
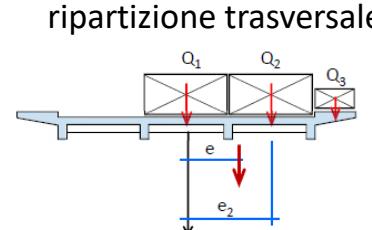
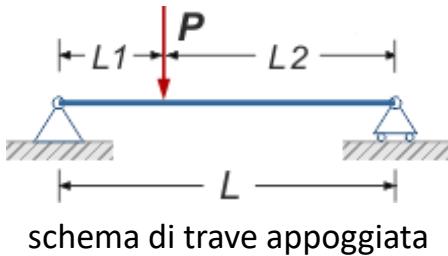
Task 4.3.3 Modellazione e analisi

TIPO DI MODELLO	UNIPR - 1	UNIPR - 2	UNIPA1D	UNIPA2D	UNIPA-ME analitico	UNIME
TIPOLOGIA DI ANALISI	Misto	Analitico	Numerico	Numerico	Analitico	Numerico
CAMPO DI APPLICAZIONE	Non lineare	A rottura	Non lineare	Non lineare	A rottura	Non lineare
TARGET DI MODELLO	Altro Modello analitico e numerico per l'applicazione ad elementi pre-tesi o post-tesi	Armatura post-tesa resa aderente	Armatura mista aderente e non aderente	Armatura post-tesa resa aderente o pretesa	Armatura mista aderente e non aderente	Armatura pre-tesa o post-tesa
STRUTTURA DI APPLICAZIONE	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza/Fessurazione dell'elemento strutturale
LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO	Travi	Selle Gerber	Travi	Selle Gerber	Travi	Altro Sia per zone specifiche che per intere travi
METODO DI CALIBRAZIONE	Altro Modello sezionale e in fase di estensione all'elemento strutturale	Di dettaglio su elemento strutturale	Globale su struttura	Locale su elemento strutturale	Sezionale	Altro Locale su elemento strutturale (trave, Sella Gerber)
APPLICAZIONI A CASI STUDIO REALI?	Dati sperimentali di letteratura	Dati sperimentali di letteratura	Simulazioni numeriche su casi studio	Simulazioni numeriche su casi studio	Dati sperimentali di letteratura	Dati sperimentali di letteratura o di prove sui materiali
TIPO DI MODELLO	UNIPV	UNINA 1D	UNINA 2D	UNINA 3D	UNINA Fragilità	UNIBS
TIPOLOGIA DI ANALISI	Numerico	Numerico	Numerico	Numerico	Analitico	Numerico
CAMPO DI APPLICAZIONE	Non lineare	Non lineare	Non lineare	Non lineare	Lineare	Non lineare
TARGET DI MODELLO	Armatura post-tesa resa aderente	Armatura pre-tesa e post-tesa resa aderente	Armatura pre-tesa e post-tesa resa aderente	Armatura mista aderente e non aderente anche in presenza di difetti	Altro Armatura pre- e post-tesa aderente	Sia armatura pre-tesa aderente, sia armatura post-tesa non aderente
STRUTTURA DI APPLICAZIONE	Resistenza dell'elemento strutturale	Resistenza dell'elemento strutturale- Comportamento non lineare	Resistenza dell'elemento strutturale- Comportamento non lineare	Resistenza dell'elemento strutturale- Comportamento non lineare- Effetto dei difetti locali	Resistenza dell'elemento trave di bordo- Analisi trasversale di impalcato con massimizzazione dei carichi	Fessurazione del calcestruzzo- Resistenza dell'elemento strutturale
LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO	Travi	Travi	Travi	Travi	Altro Impalcati a graticcio	Travi
METODO DI CALIBRAZIONE	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Sezionale	Globale su struttura
APPLICAZIONI A CASI STUDIO REALI?	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali di letteratura	Simulazioni numeriche su casi studio	Dati sperimentali propri

I modelli per le verifiche possono essere sviluppati secondo diversi approcci in base alla finalità

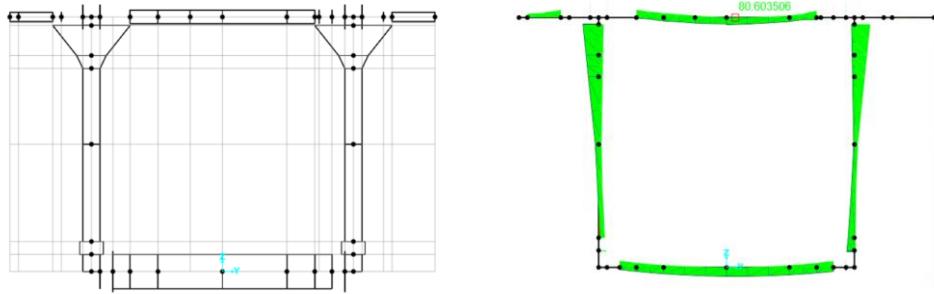
Schemi isostatici di ponti a travata:

- modelli semplificati e verifiche delle sezioni e altri componenti separatamente
- modelli completi che forniscono automaticamente la combinazione più sfavorevole sulle pile intermedie
- modelli completi anche con spalla e fondazioni e interazione terreno

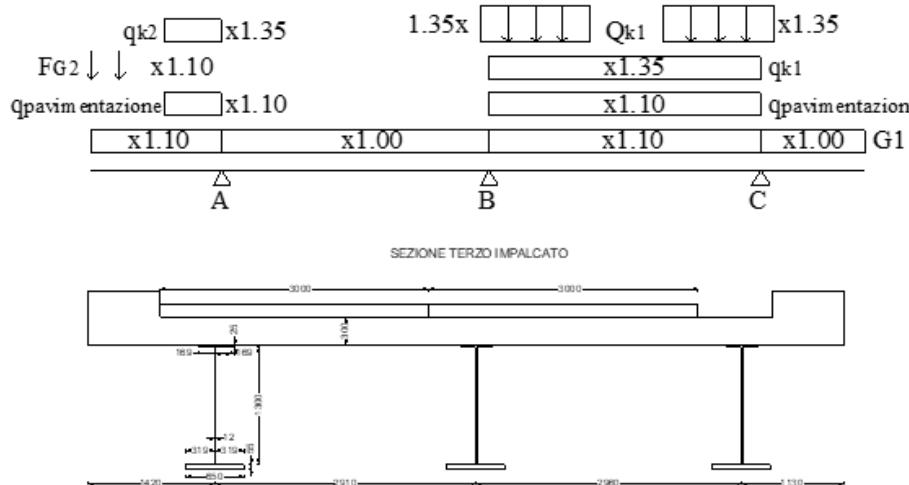


Al modello globale si affiancano modelli di dettaglio per la verifica di zone con azioni concentrate (selle Gerber, pulvini tozzi, zone di appoggio) o per le solette, collegamenti bullonati o saldati, ecc...

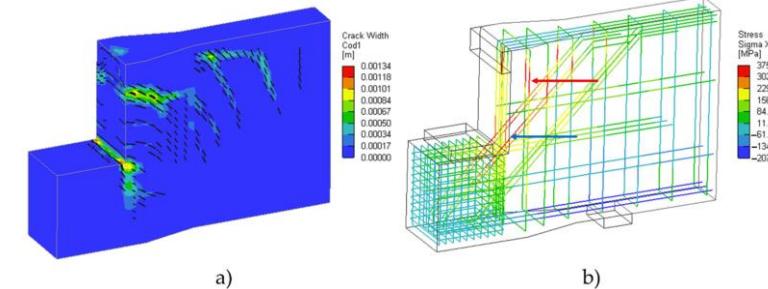
modello solette di impalcato a cassone



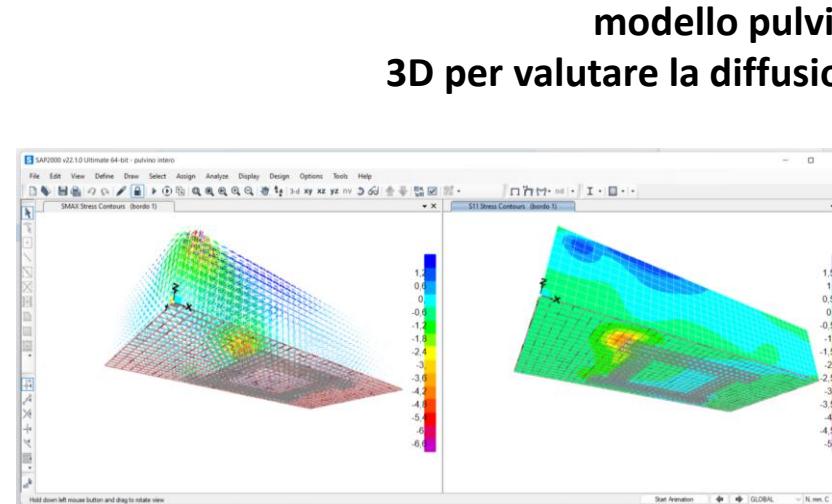
modello soletta di impalcato a travata



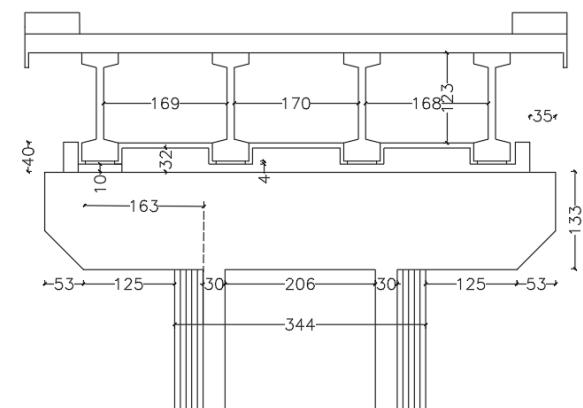
modello sella Gerber



modello soletta di impalcato a travata



modello pulvino 3D per valutare la diffusione dei carichi

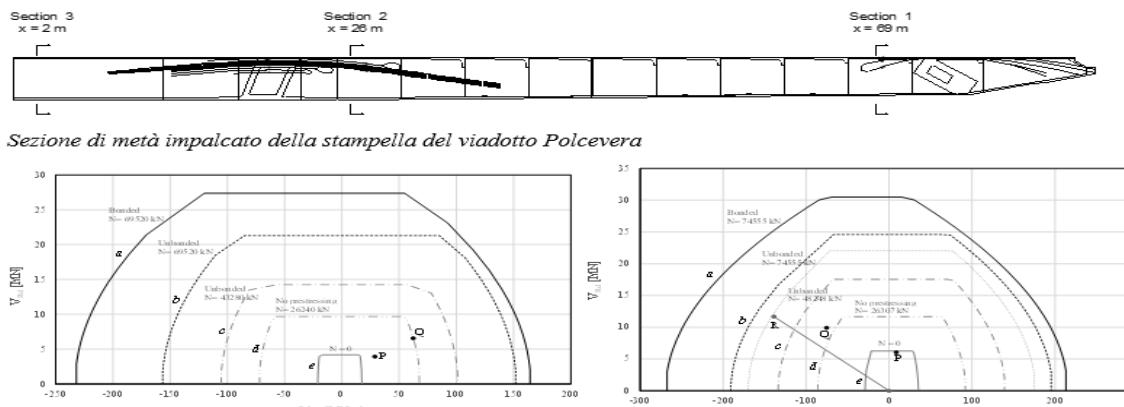


Organizzazione dei contenuti

Scheda di sintesi per ogni modello

TIPOLOGIA DI ANALISI	A rottura
CAMPO DI APPLICAZIONE	Armatura mista aderente e non aderente
TARGET DI MODELLO	Resistenza dell'elemento strutturale
STRUTTURA DI APPLICAZIONE	Travi
LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO	Sezionale
METODO DI CALIBRAZIONE	Dati sperimentali di letteratura
APPLICAZIONE A CASI STUDIO REALI	SI
SIMULAZIONI	Analitiche (10)

Esempio di applicazione



Sezione di metà impalcato della stampella del viadotto Polcevera

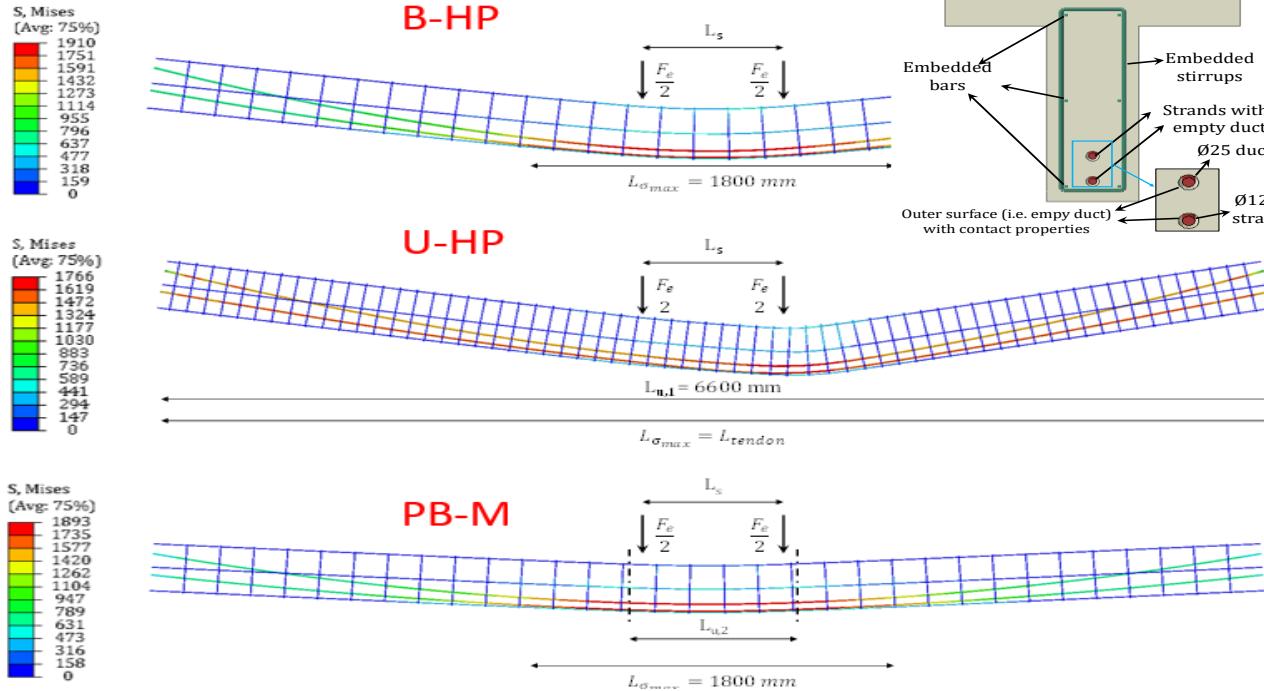
Domini sezione 1 in prossimità dello strallio e domini sezione 2 in prossimità della pila per diversi valori di N

Suggerimenti Applicativi

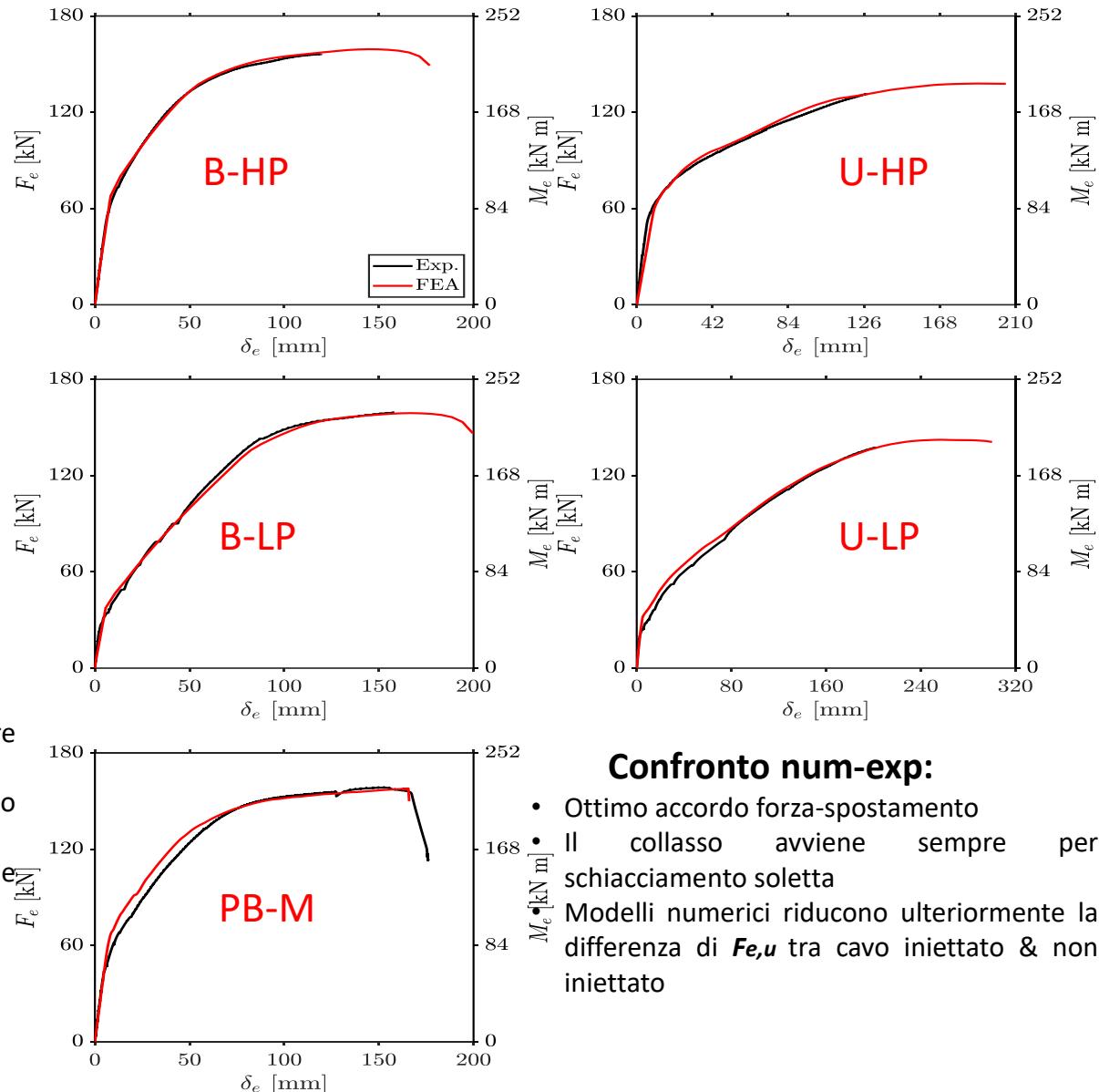
Il modello analitico di interazione M-V è uno strumento avanzato ma facilmente implementabile su un codice di calcolo Excel o Matlab e si rivela particolarmente utile per la valutazione dei coefficienti di sicurezza strutturale delle sezioni precomprese dei ponti, anche nel caso della presenza di uno sforzo normale e di un momento flettente aggiuntivi dovuti ad iperstaticità o alle caratteristiche proprie dello schema statico (ponti a telaio, ponti a cavalletto precompressi, ponti strallati, etc...). In particolare, la presenza dei carichi mobili può rendere alcune sezioni critiche per la interazione taglio-momento in quanto i carichi concentrati possono fornire tagli significativi anche in sezioni dove il momento flettente è generalmente preponderante o viceversa. Le verifiche separate per taglio ultimo e momento flettente ultimo di queste sezioni possono comportare una sottostima dell'effetto di interazione ed una sovrastima dei coefficienti di sicurezza ed alcuni ponti ne mostrano gli effetti attraverso una fessurazione inaspettata. ...

Bibliografia e prodotti connessi al task

- Vecchio, F. J. and M. P. Collins. (1986). "MODIFIED COMPRESSION-FIELD THEORY FOR REINFORCED CONCRETE ELEMENTS SUBJECTED TO SHEAR." Journal of the American Concrete Institute 83(2):219–31. <https://doi.org/10.14359/10416>
- Vecchio, F. J. (2000). "Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation." Journal of Structural Engineering 126(9):1070–77. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2000\)126:9\(1070\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:9(1070)).
- De Domenico D., Mazzeo M., Messina D., Recupero A. - Experimental and numerical investigation on PC beams with artificially corroded post-tensioned tendons - Proc. of the 14th fib International PhD Symposium in Civil Engineering - Sep. 5 to 7, 2022, Rome, Italy
- Galano, S., Losanno, D., Miluccio, G., Parisi, F. Multidimensional nonlinear numerical simulation of post-tensioned concrete girders with different prestressing levels. Structural Concrete. 2023.
- Franceschini, L., Belletti, B., Tondolo, F. and Sanchez Montero, J. 2022. A simplified stress-strain relationship for the mechanical behaviour of corroded prestressing strands: the SCPS-model. Structural Concrete 24(1), pp. 189–210.



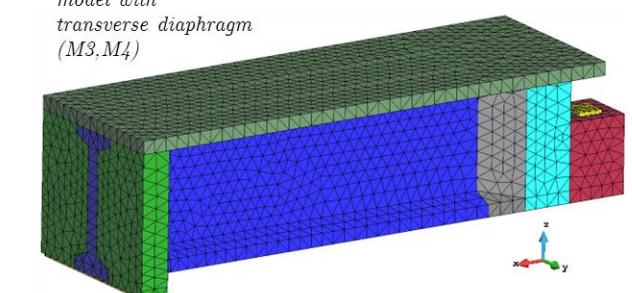
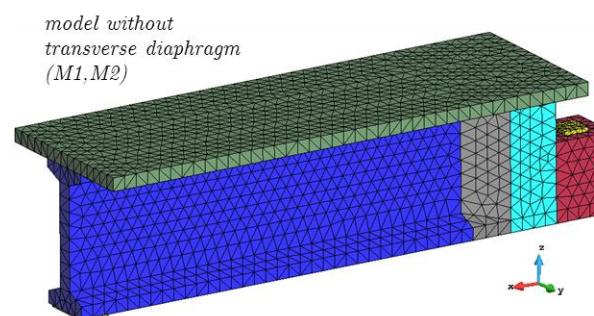
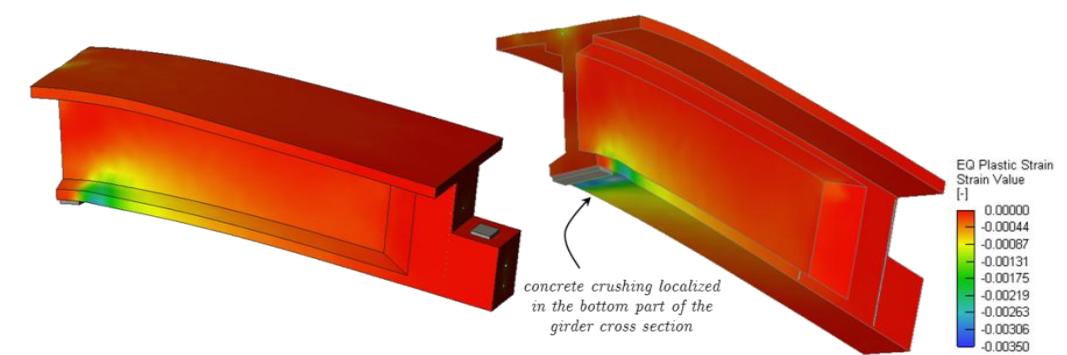
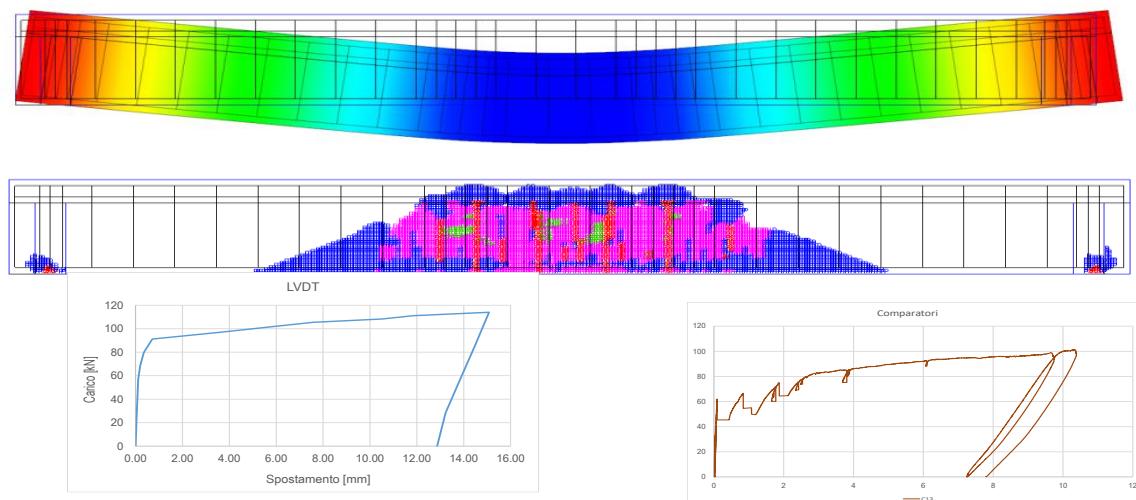
Travi con difetti di iniezione vs travi perfettamente iniettate



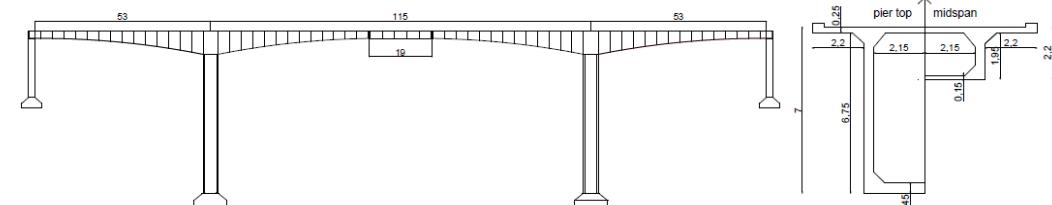
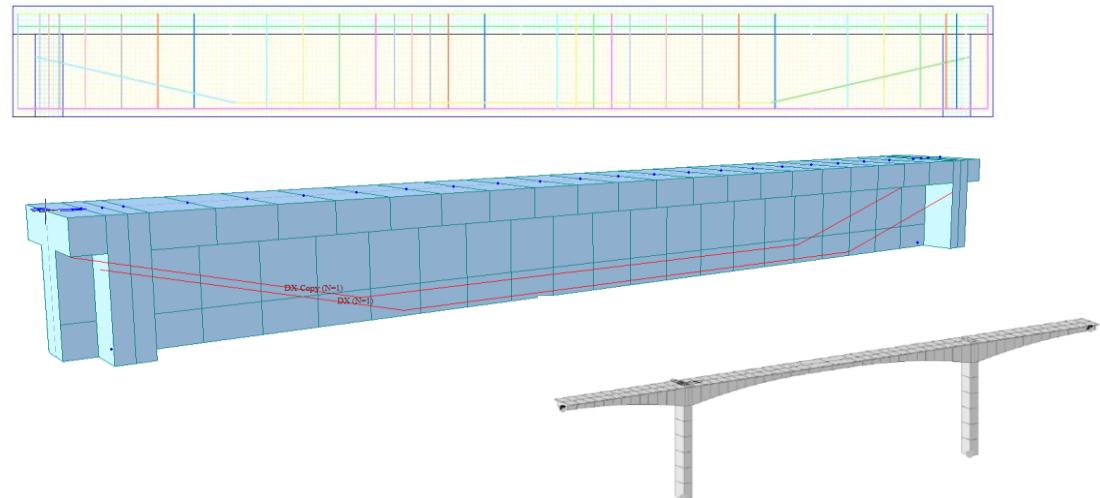
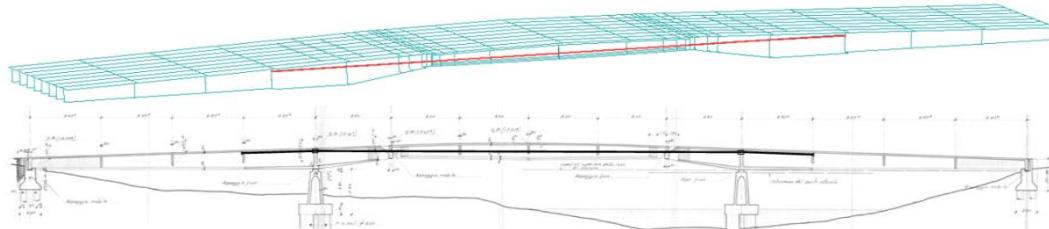
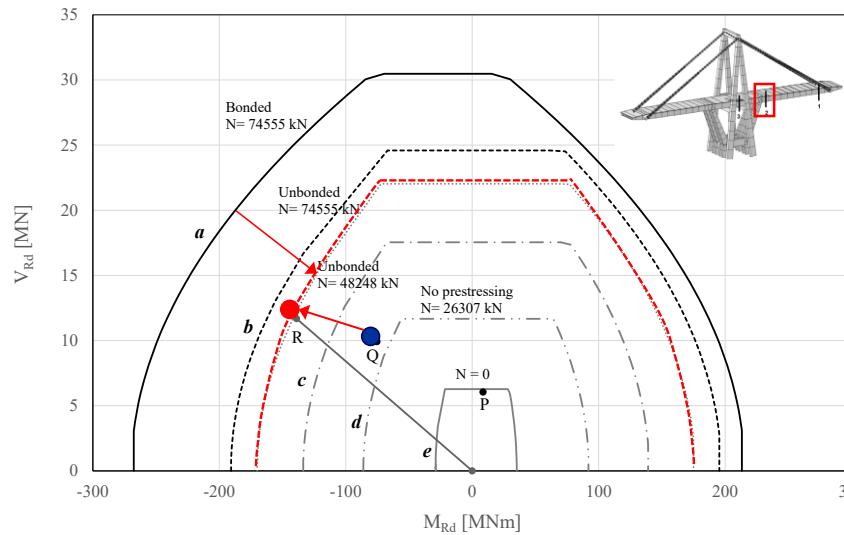
IMPATTO sulle Linee Guida:

- Modesta influenza dei vuoti delle guaine di PT

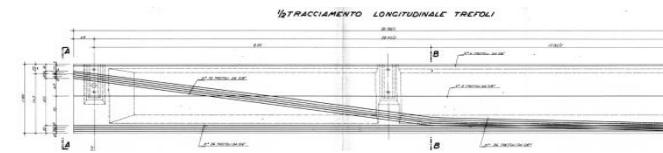
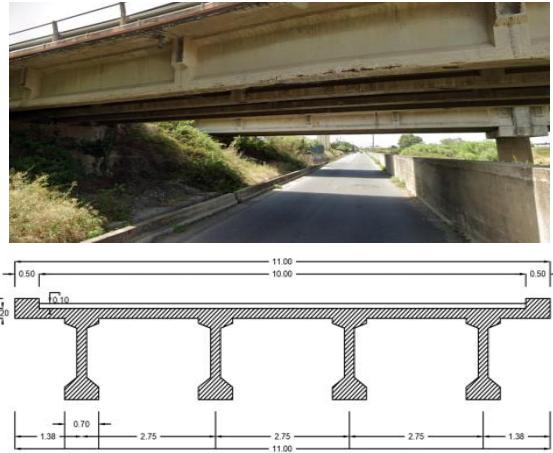
Sono stati sviluppati diversi modelli numerici ad Elementi Finiti 1D, 2D e 3D per la valutazione della capacità portante di travi ed impalcati precompressi, di selle Gerber con ancoraggi di cavi post-tesi e per modelli locali tramite analisi non lineari push-down, con applicazioni a casi-studio reali.



Sono stati sviluppati diversi modelli analitici (con interazione N-M-V, in collaborazione con UNIME) e numerici ad Elementi Finiti 1D, 2D e 3D per la valutazione della capacità portante di travi ed impalcati precompressi, di selle Gerber con ancoraggi di cavi post-tesi e per modelli locali, nonché per la determinazione della robustezza strutturale degli impalcati a graticcio tramite analisi non lineari push-down, con applicazioni a casi-studio reali, anche con precompressione esterna o non aderente e con barre Dywidag, come nel caso dei ponti a conci con schema a stampella.

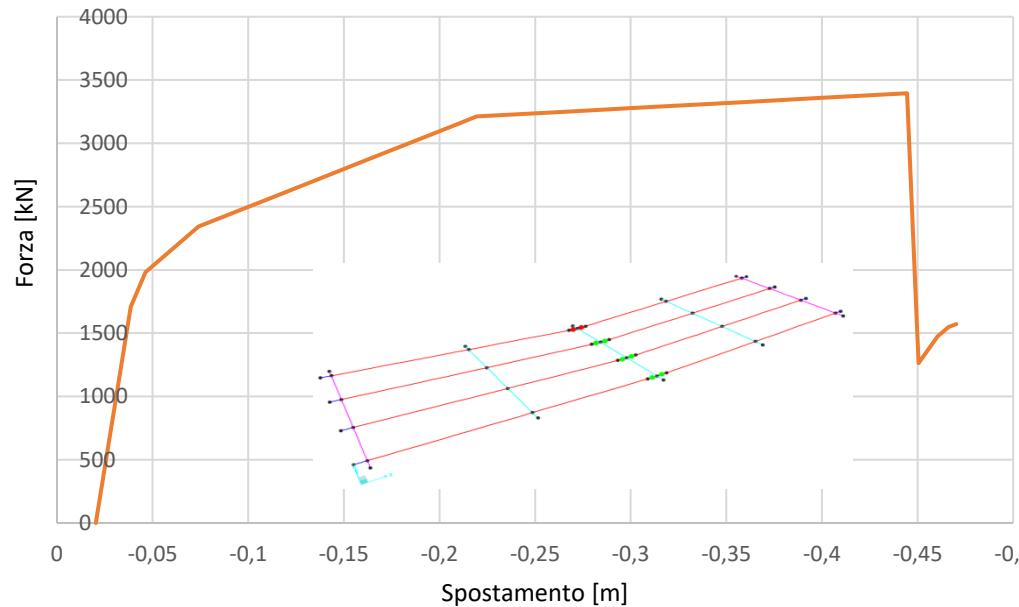


Progetto di Silvano Zorzi



Parziale tranciamento trefoli

Analisi Push-Down Struttura Non Rinforzata



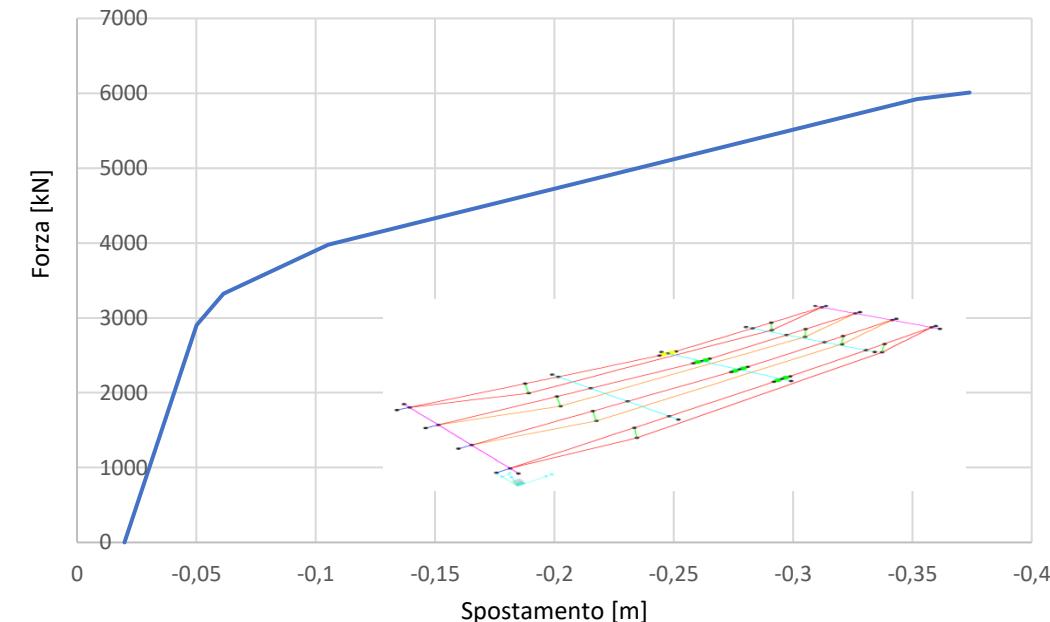
Moltiplicatori dei Carichi (Flessione)

$$\lambda = \frac{\sum R(g_{1d} + g_{2d} + q_{NTCd} + \Delta q) - \sum R(g_{1d} + g_{2d})}{\sum R(g_{1d} + g_{2d} + q_{NTCd}) - \sum R(g_{1d} + g_{2d})}$$

Struttura Non Rinforzata
 $\lambda=0.8$

Struttura Rinforzata
 $\lambda=1.78$

Analisi Push-Down Struttura Rinforzata

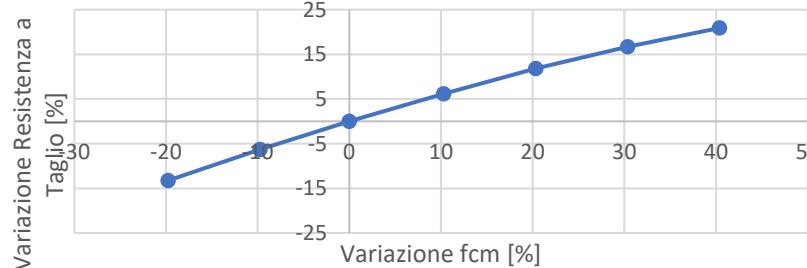


Analisi parametrica - Influenza dei parametri sulle resistenze

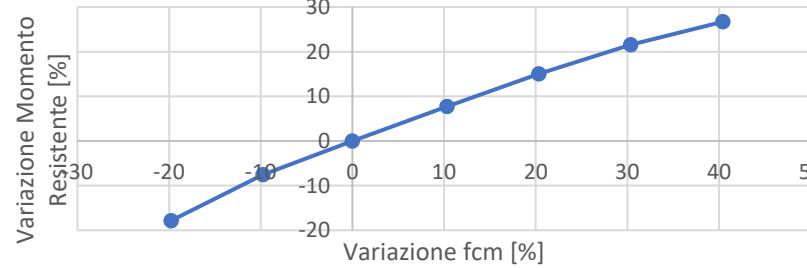
Analisi propedeutiche alla valutazione dell'impatto del danneggiamento e del degrado dei materiali sulle resistenze

Resistenza a compressione calcestruzzo

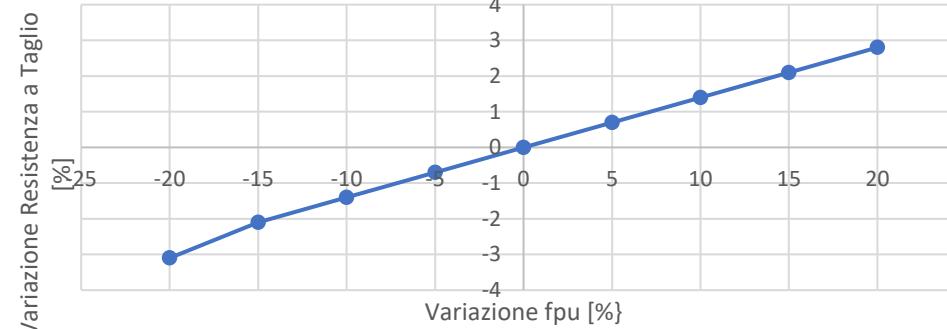
Vrd ($x=21,15$)



Mrd ($x=12,15m$)

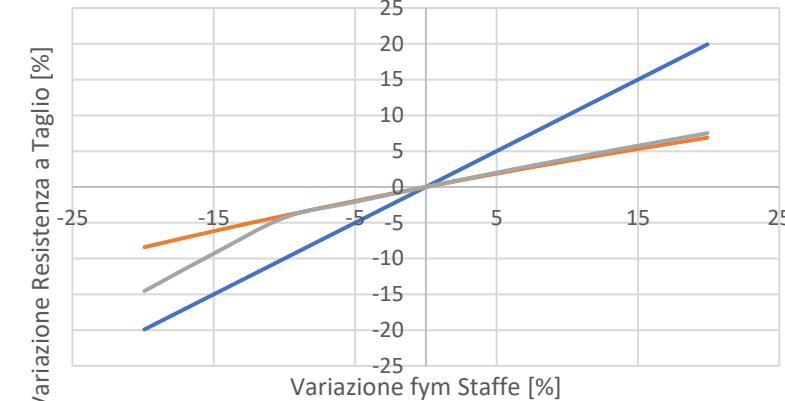


Mrd ($x=12,15m$)

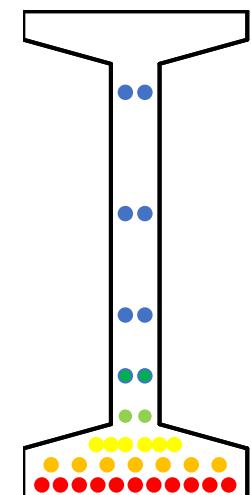
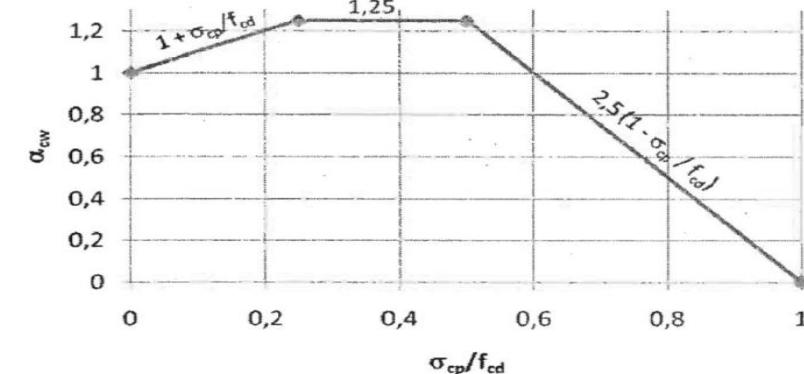


Tensione di snervamento staffe

Vrd ($x=12,15m$)

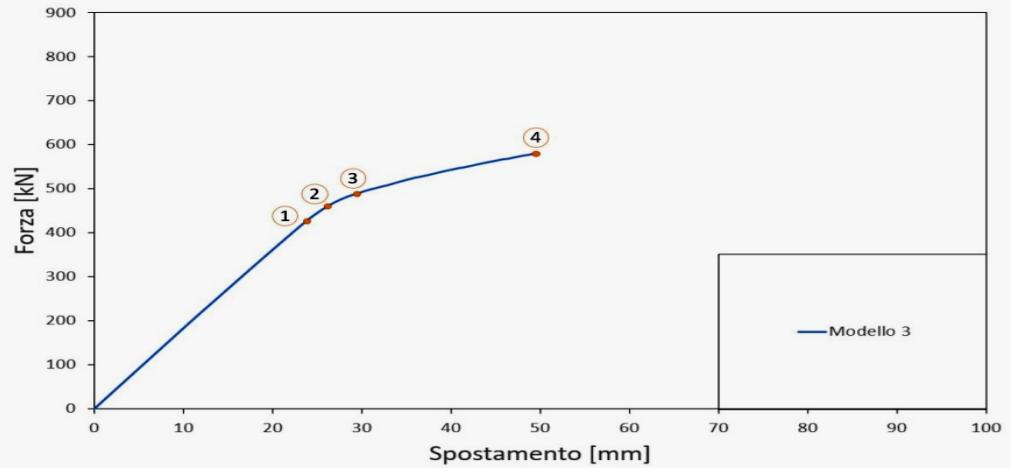


Resistenza a trazione armatura di precompressione

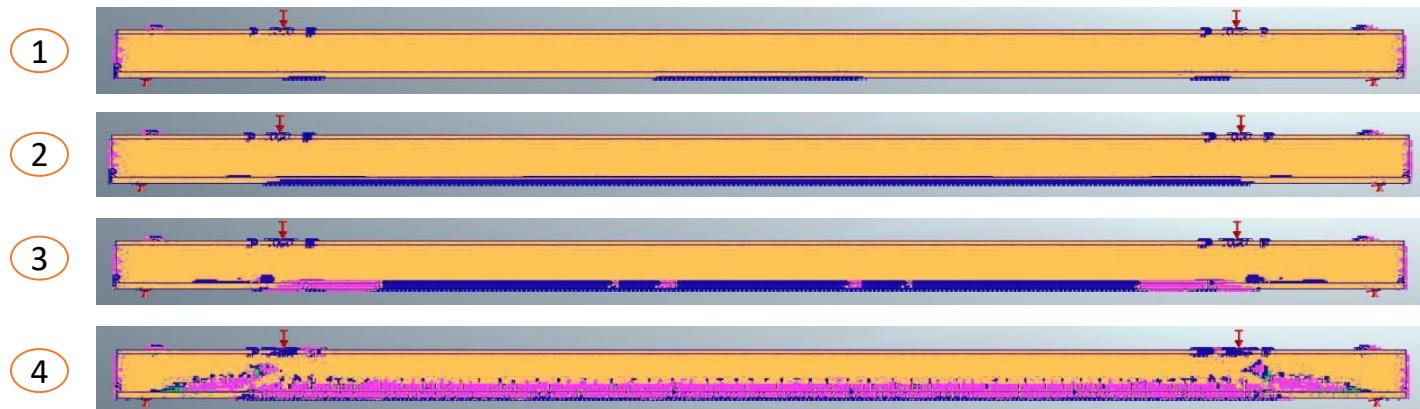
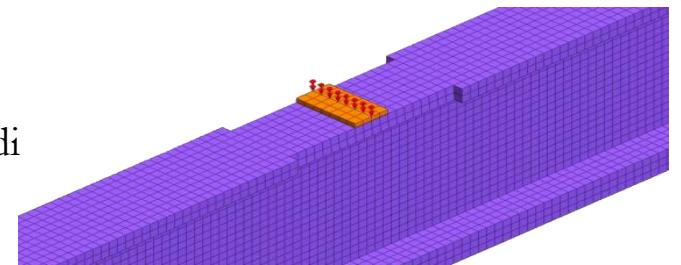


Modellazioni delle prove sperimentali
con MIDAS FEA-NX

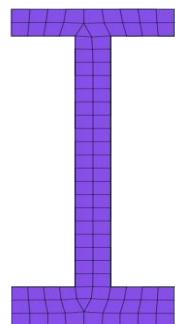
Riproduzione della prova sperimentale, curva carico spostamento ed evoluzione del danno



Modello 1 e 2:
Trave senza e con danno
rilevamento durante il test di
laboratorio

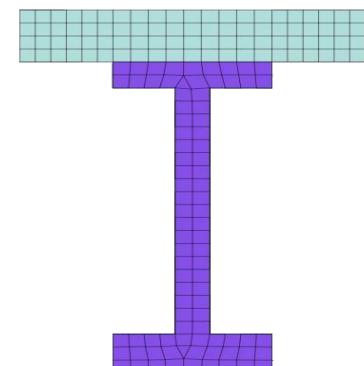


Modello 3:
Trave Non Danneggiata, perdite di tiro

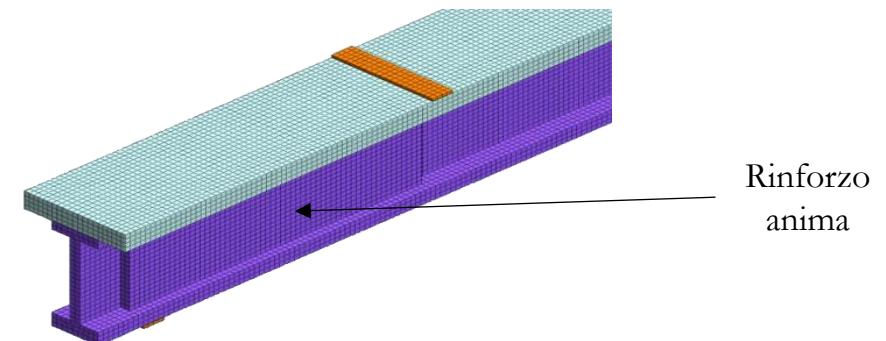


Modelli alternativi

Modello 4: Aggiunta Soletta



Modello 5:
Aggiunta Rinforzo

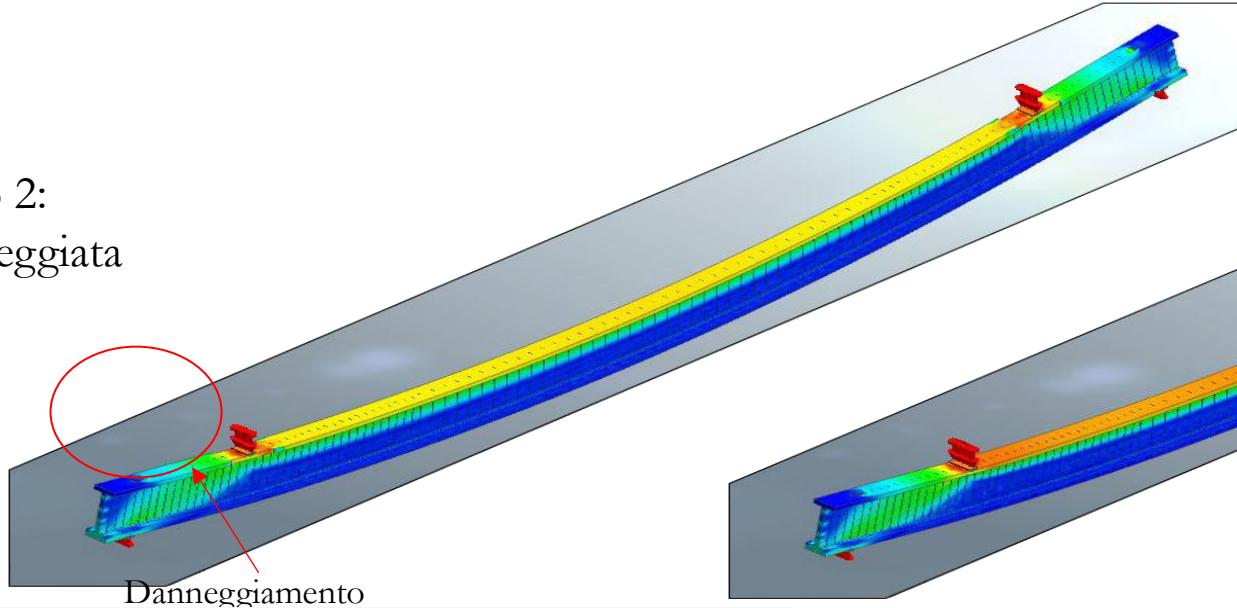


Rinforzo
anima

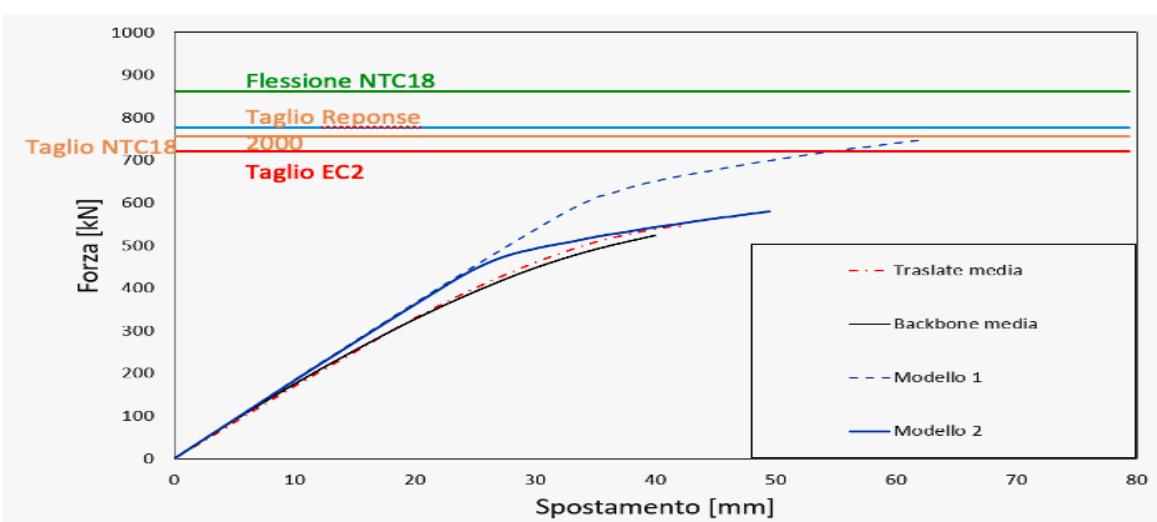
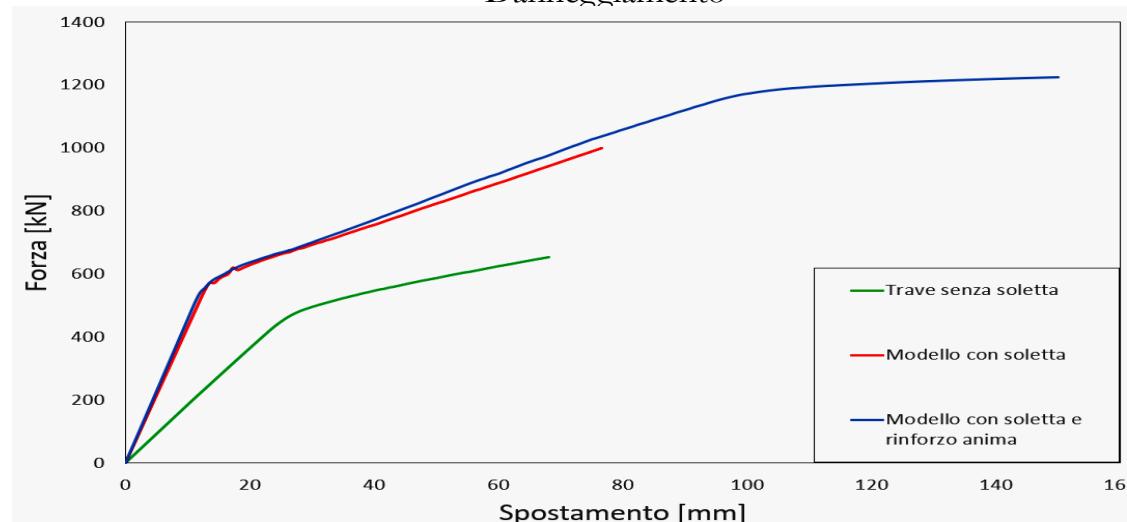
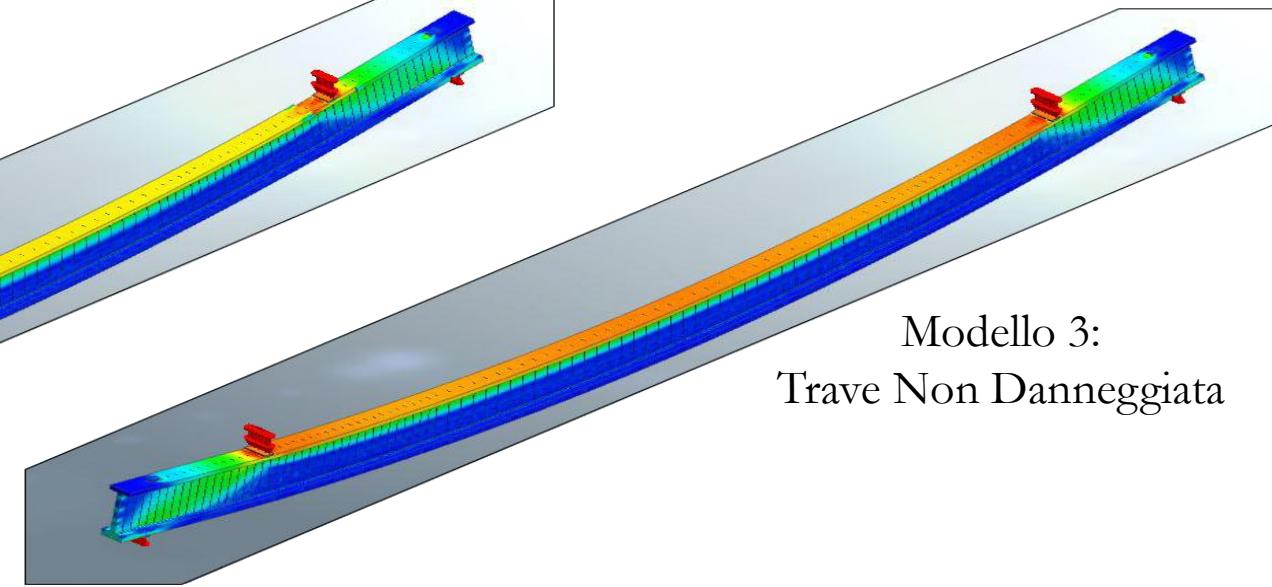
Confronti modelli MIDAS, modelli di capacità e prova sperimentale

Meccanismi di rottura Modello 2-3

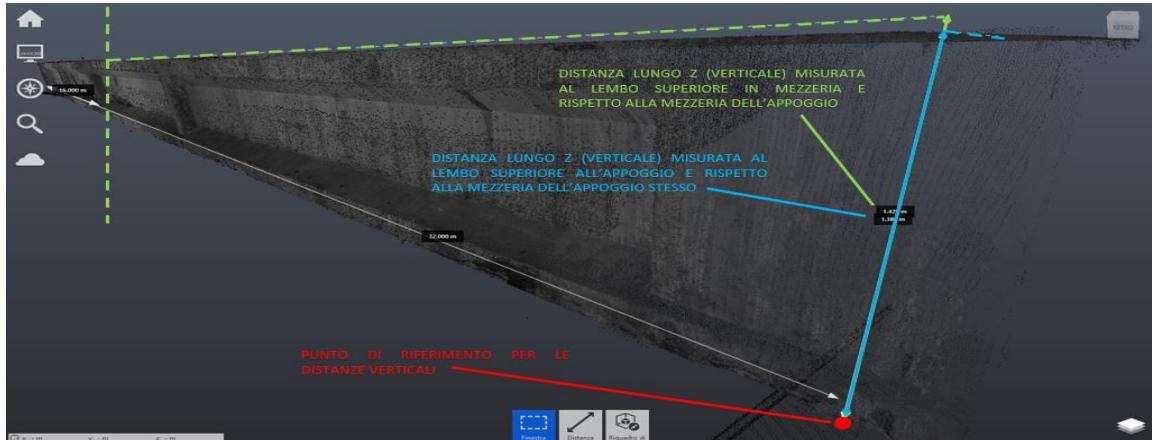
Modello 2:
Trave Danneggiata



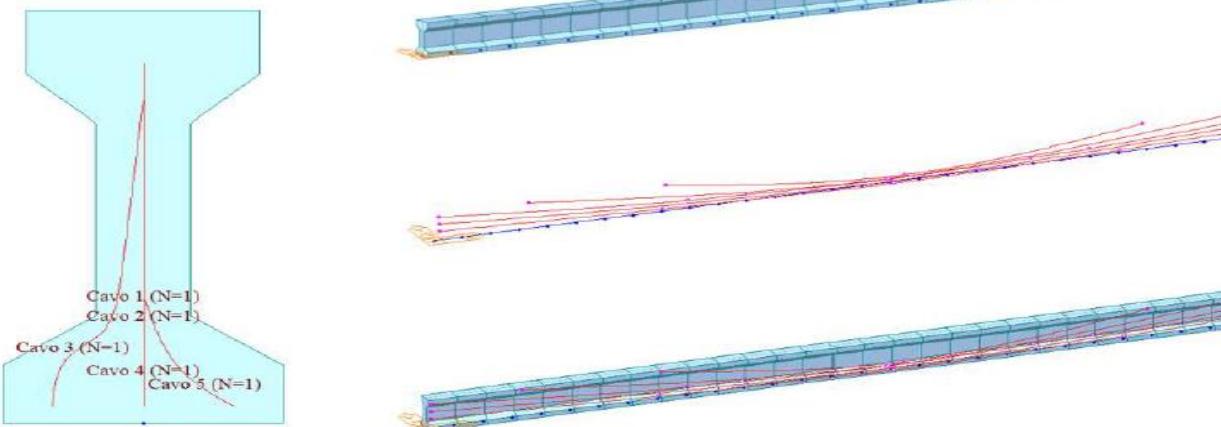
Modello 3:
Trave Non Danneggiata



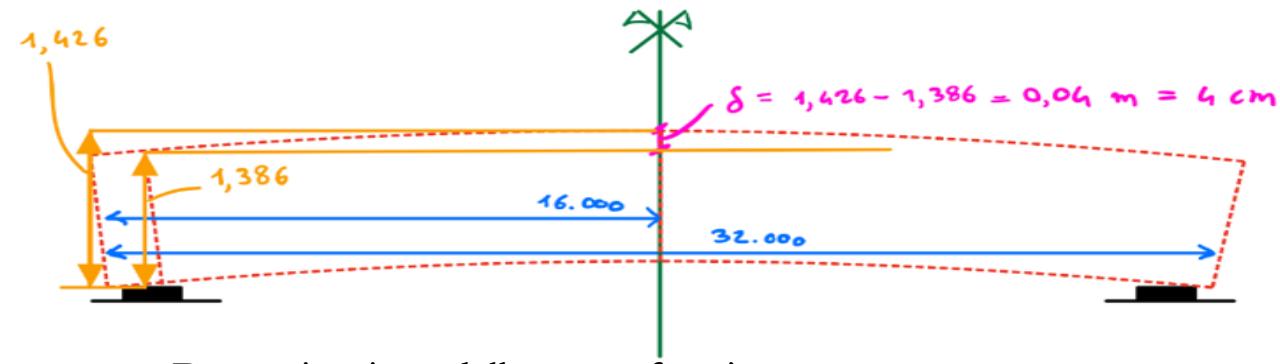
Misura indiretta e stima delle perdite di tiro sui cavi di precompressione



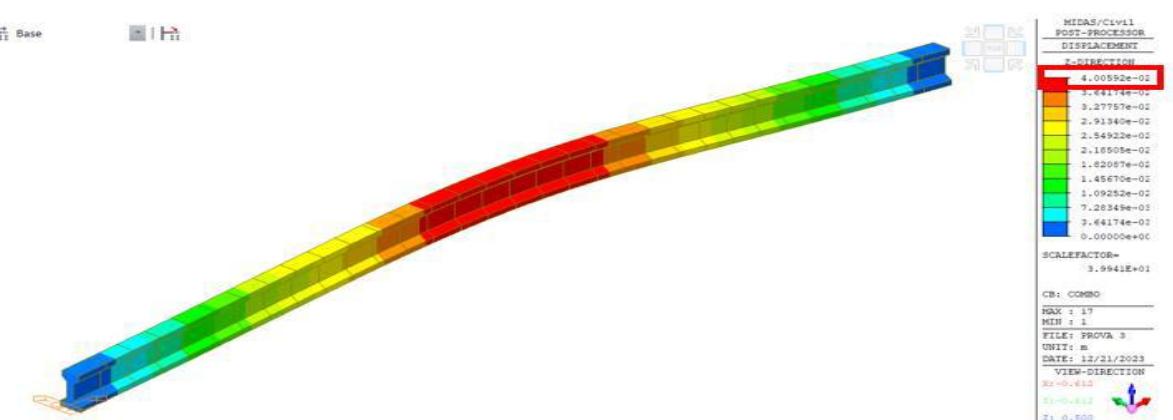
Rilevamento con laser scanner della deformata



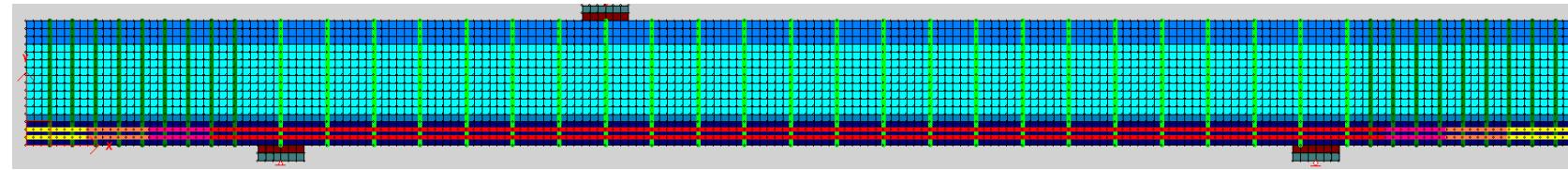
Eseguendo la calibrazione sulla deformata si ottiene una forza di 1641,16 kN applicata a ciascun cavo
Con una riduzione del 17% rispetto alla stima del tiro considerando le perdite (EC2)



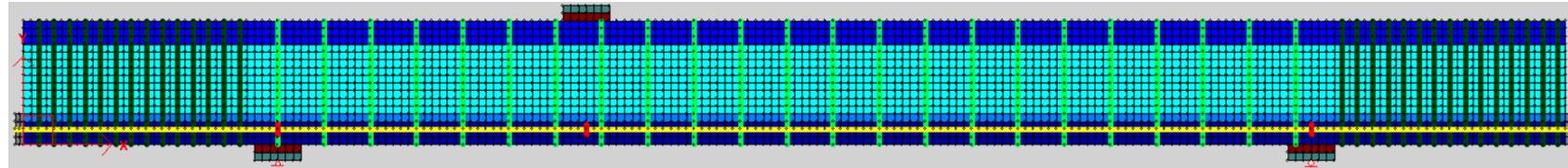
Determinazione della controfrecia



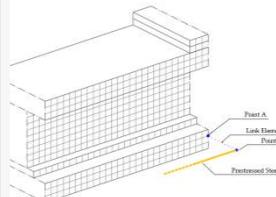
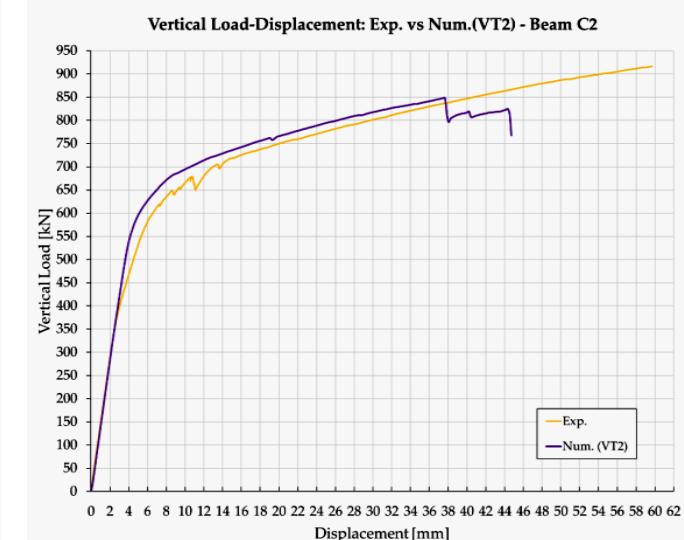
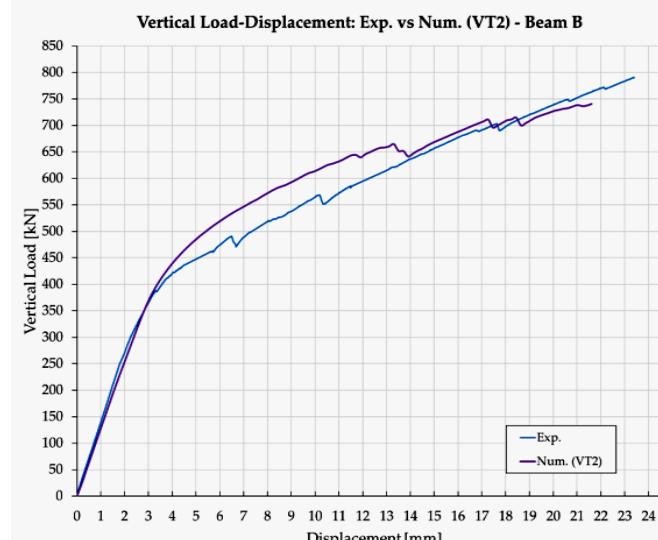
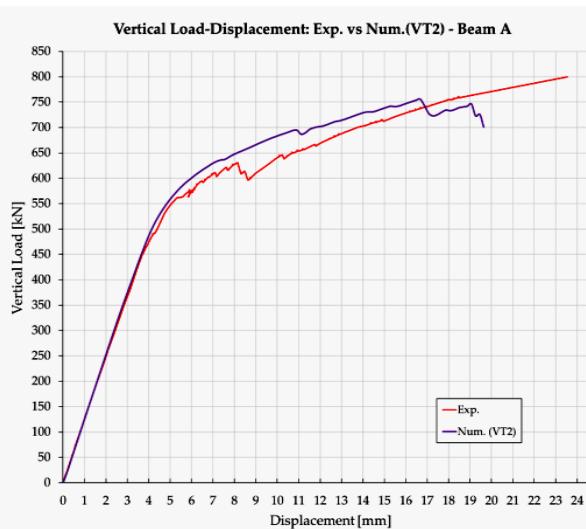
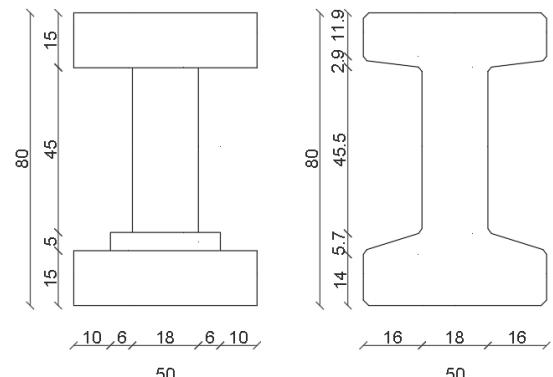
Modello FE Trave Pre-Tesa (Beam A e Beam B)



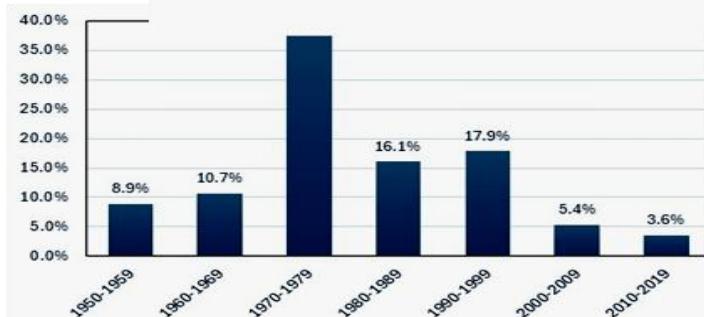
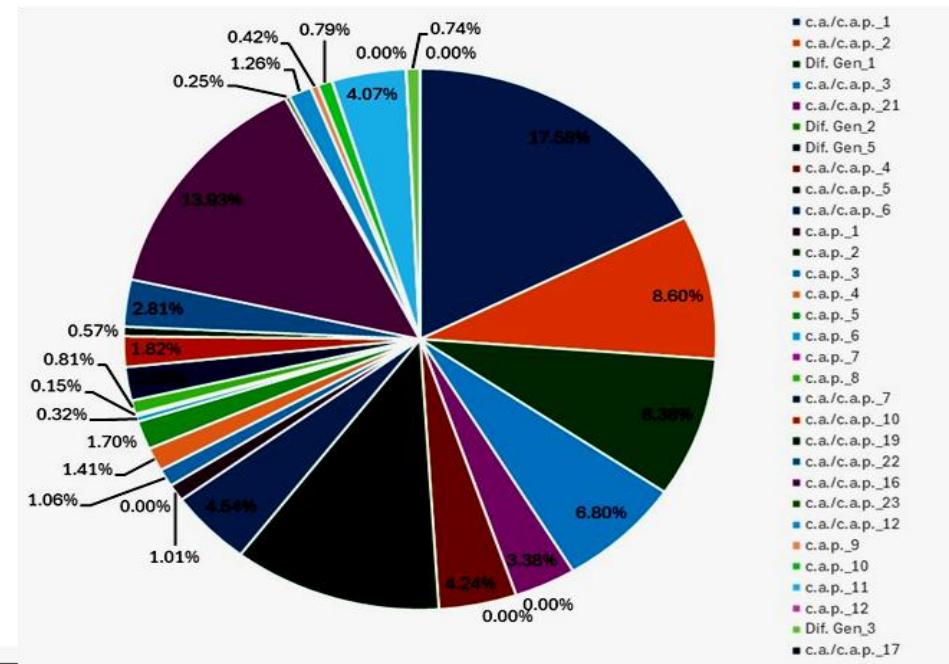
Modello FE Trave Pre-Tesa (Beam C)



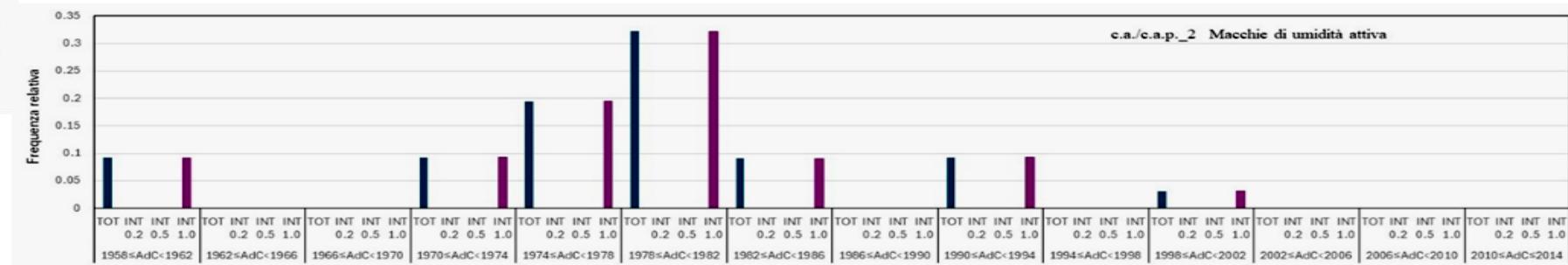
Mesh elementi 5 cm x 5 cm



86 opere



Nº	G	Descrizione	Frequenza %
c.a./c.a.p._1	1	Macchie di umidità passiva	17.58
c.a./c.a.p._2	3	Macchie di umidità attiva	8.60
Dif. Gen_1	3	Tracce di scolo	8.38
c.a./c.a.p._3	3	Cls dilavato/ammalorato	6.80
c.a./c.a.p._21	3	Cls dilavato/ammalorato Testate	3.38
Dif. Gen_2	2	Ristagni d'acqua	0.00
Dif. Gen_5	4	Ristagni d'acqua nei cassoni	0.00
c.a./c.a.p._4	2	Vespa	4.24
c.a./c.a.p._5	2	Distacco del copriferro	11.37
c.a./c.a.p._6	5	Armatura ossidata/corrosa	4.54
c.a./c.a.p._1	1	Lesioni capillari agli ancoraggi	1.01
c.a./c.a.p._2	2	Testate di ancoraggio non sigillate	0.00
c.a./c.a.p._3	1	Distacco tamponi testate	1.06
c.a./c.a.p._4	2	Lesioni su anima lungo i cavi	1.41
c.a./c.a.p._5	2	Lesioni lungo suola del bulbo	1.70
c.a./c.a.p._6	2	Guaine in vista	0.32
c.a./c.a.p._7	4	Guaine degradate e fili ossidati	0.15
c.a./c.a.p._8	4	Fili aderenti in vista ossidati	0.81
c.a./c.a.p._7	1	Lesioni a ragnatela modeste	2.00
c.a./c.a.p._10	5	Fessure diagonali	1.82
c.a./c.a.p._19	5	Fessure trasversali	0.57
c.a./c.a.p._22	3	Lesioni / distacco travi trasversi	2.81
c.a./c.a.p._16	3	Staffe scoperte/ossidate	13.93
c.a./c.a.p._23	4	Rottura staffe	0.25
c.a./c.a.p._12	1	Riprese successive deteriorate	1.26
c.a./c.a.p._9	5	Riduzione armatura di pre compr.	0.42
c.a./c.a.p._10	2	Umidità dall'interno	0.79
c.a./c.a.p._11	2	Arm. Scoperta/ossidata testate	4.07
c.a./c.a.p._12	5	Fuoriuscita barre ancoraggio	0.00
Dif. Gen_3	4	Danni da urto	0.74
c.a./c.a.p._17	5	Armatura longitudinale deformata	0.00



6.3.5.2 Problemi di verifica locale	6.3.5.2 Problemi di verifica locale	<p>6.2.2 INDAGINI PER LA CARATTERIZZAZIONE DEI DETTAGLI COSTRUTTIVI E DEI MATERIALI</p> <p><i>Si sottolinea l'estrema importanza della valutazione di durabilità dei cavi da precompressione nel sistema post-tesi, 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.</i></p> <p>Aggiungere al 6.2.2:</p> <p><i>In presenza di sistemi in c.a.p. che hanno subito una riduzione di sezione resistente delle armature di precompressione (es. cavi o trefoli) dovuta a fenomeni di degrado (es. corrosione) o eventi eccezionali (es. urto), gli effetti del danno potrebbero non essere manifesti a livello globale (es. in termini di perdita di contro-monta) stante l'efficacia della precompressione residua. Tuttavia nelle verifiche di sicurezza occorre tener presente che la sezione in c.a.p. danneggiata, ancorché esterna alla zona di massima sollecitazione nella combinazione delle azioni previste da norma, può diventare comunque critica per riduzione della capacità rispetto alla domanda, per effetto della perdita di precompressione localmente (es. fessurazione) quanto per la riduzione dell'area resistente dell'armatura (SLU).</i></p>	<p>7.4.3.1 Strutture precomprese a cavi post-tesi</p> <p><i>Le prove di carico possono essere eseguite in analogia con quanto prescritto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni al § 9.2 relativamente al collaudo delle opere, con le seguenti precisazioni:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>il carico di prova deve essere rapportato al carico originario di progetto ovvero ai carichi effettivi che possono gravare sul ponte;</i> • <i>la risposta della struttura, in termini di spostamenti, rotazioni e deformazioni, è confrontata con la risposta teorica, determinata attraverso modelli attualizzati della struttura che tengano conto del degrado o del danneggiamento nonché delle variazioni di temperatura e delle condizioni atmosferiche intervenute nel corso della prova;</i> <p>Aggiungere:</p> <p><i>Indagini di tipo non distruttivo e moderatamente distruttivo dovranno essere utilizzate per definire le caratteristiche di calcestruzzo e acciai al fine di valutare adeguatamente le resistenze residue nei confronti delle azioni di flessione e taglio reali. Per il caso del taglio è raccomandato l'uso di più modelli per la valutazione.</i></p>
7.4.3. CASI CHE RICHIEDONO PARTICOLARE ATTENZIONE	7.4.3. CASI CHE RICHIEDONO PARTICOLARE ATTENZIONE	<p>7.4.3.1. Strutture precomprese a cavi post-tesi</p> <p>Aggiungere:</p> <p>7.4.3.2 Strutture precomprese a cavi pretesi</p> <p><i>Le strutture precomprese a cavi pretesi possono essere soggette a criticità a taglio nella zona di diffusione della precompressione o nelle zone iniziali della a precompressione diffusa, a causa di una riduzione della precompressione maggiore rispetto a quanto stimato in fase di progetto, dovuta a molteplici fattori tra cui meccanismi di degrado, corrosione, errori progettuali, ecc.</i></p>	<p>7.4.3.1 Strutture precomprese a cavi post-tesi</p> <p>Aggiungere:</p> <p><i>Laddove la presenza di vuoti nelle guaine risulti circoscritta ad alcuni tratti lungo il tracciato dei cavi, si può ritenere che il difetto non incida significativamente sulla risposta strutturale, accertato il buono stato di conservazione dei cavi e l'assenza di fenomeni di corrosione. Al verificarsi di tali condizioni, nella valutazione della capacità dell'elemento strutturale - sia in condizioni di esercizio che ultime - possono ancora applicarsi le usuali tecniche di modellazione e formulazioni normative.</i></p>
7.4.3.1. Strutture precomprese a cavi post-tesi	7.4.3.2 Strutture precomprese a cavi pretesi	<p>1.3.3.5 Riduzione delle incertezze di modellazione</p> <p><i>I risultati dell'analisi modale sono finalizzati alla calibrazione del modello (c.d. "model updating"), oltre che alla eventuale individuazione di danni o malfunzionamenti strutturali.</i></p>	<p>Aggiungere:</p> <p><i>Con riferimento a questi ultimi due aspetti si deve tenere conto che non tutte le anomalie possono essere rilevate, ad esempio la prova dinamica non può fornire informazioni sul livello di precompressione.</i></p>

Revisione delle schede sui difetti di corrosione con particolare riferimento ai cavi da precompressione

Revisione scheda di ispezione travi in c.a.p.

Considerazioni sull'effetto dei difetti dei cavi da precompressione sulla sicurezza strutturale

Considerazioni sulla inefficienza dell'identificazione dinamica per la definizione della stato di precompressione

Considerazioni sull'effetto della precompressione sulla resistenza a taglio

Alcuni fogli di calcolo per le analisi di livello 3 (ripartizione alla Courbon, progetto simulato cavo ed eccentricità a flessione)

Considerazioni sulla modellazione per le analisi di livello 4: modelli sezionali, globali, degrado

I risultati della ricerca sono la base indispensabile della conoscenza da trasferire nelle metodologie applicative e nelle normative