

Accordo Tecnico tra il CSLPP ed il Consorzio ReLUIS attuativo del DM 578/2020 e DM 204/2022

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
<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 Vanzì</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

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

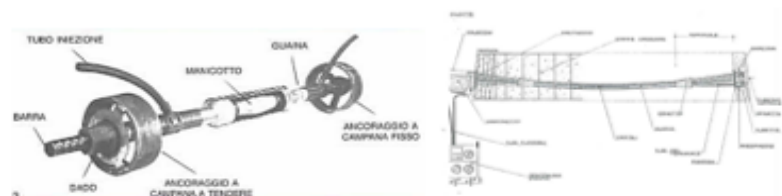
WP4 SPERIMENTAZIONE SU COMPONENTI STRUTTURALI E/O SPECIALI

TASK 4.3 SISTEMI IN C.A.P.

Sub-Task 4.3.1

La tecnologia del precompresso nei ponti esistenti

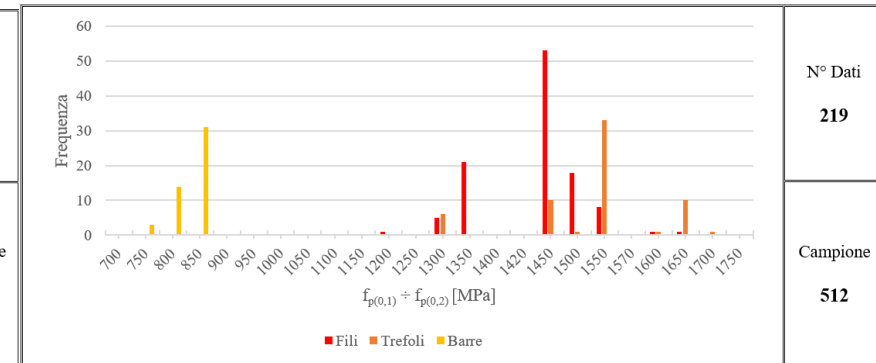
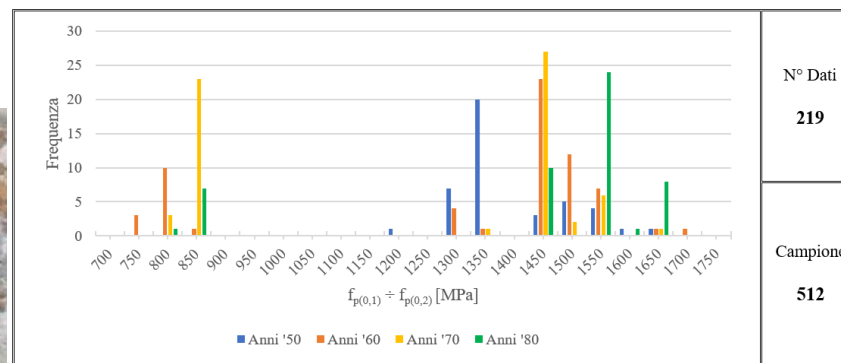
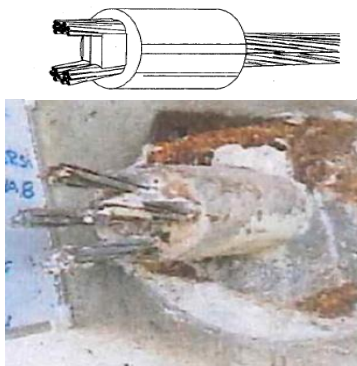
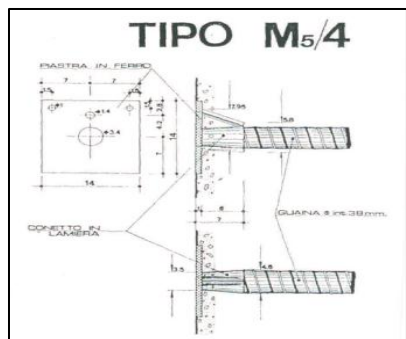
Beatrice Belletti, Daniele Losanno, Maria Rosaria Pecce



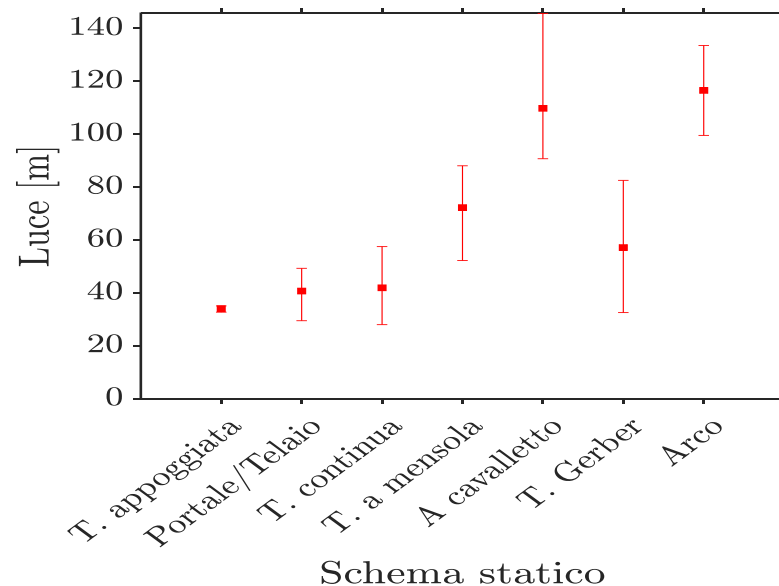
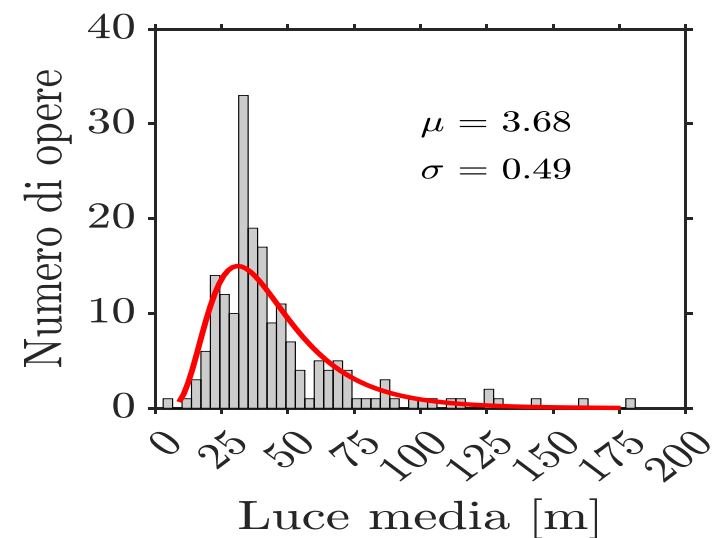
SOMMARIO

1	- Tecnologia della precompressione.....	4
1.1	Albordi 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 Balducchi.....	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 f_{pt}	31
3.4.2	Tensione di snervamento acciai armonici: $f_{p(0,1)} + f_{p(0,2)}$	33
3.4.3	Precompressione al tiro acciai armonici: $\sigma_{sp,i}$	36
3.4.4	Precompressione in esercizio acciai armonici: $\sigma_{sp,e}$	37
3.4.5	Cadute di tensione stimate (%): $\Delta\sigma_{sp}$	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

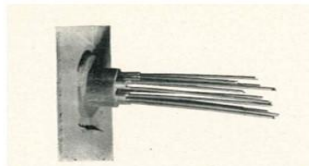


461 prove eseguite su trefoli di varie misure (3/8", 1/2", 6/10") Nel laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche tra il 1987 e il 1995

	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

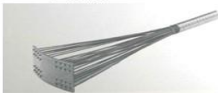
Mobilità

- Mobili (di tiro)



Rinaldi

- Fissi



BBRV

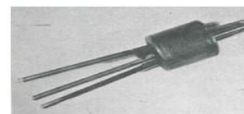


Azione esercitata

- A cuneo

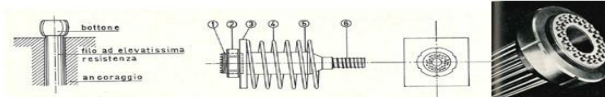


Freyssinet



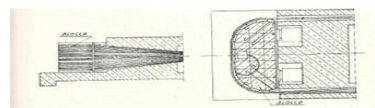
Morandi

- Sostegno diretto



BBRV

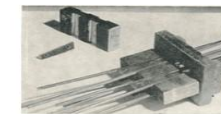
- Avvolgimento



Baur-Leonhardt

Elemento tesato

- Fili



- Trefoli



BBRV

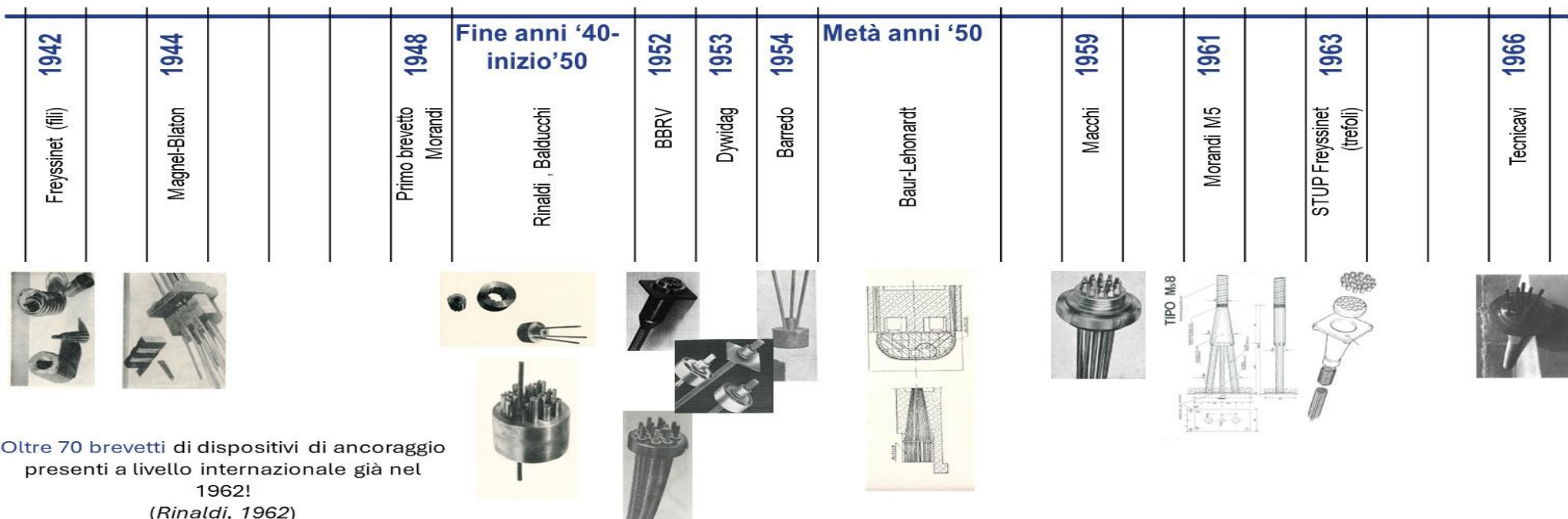
- Barre



Dywidag-Finsterwalder

SUCCESSIONE CRONOLOGICA* DEI PRIMI BREVETTI PER ANCORAGGI

* Si riporta qui l'anno di pubblicazione del brevetto (se noto); l'anno di priorità e di utilizzo può precedere di 1 – 2 anni, a seconda dei casi, quello ufficiale di pubblicazione.

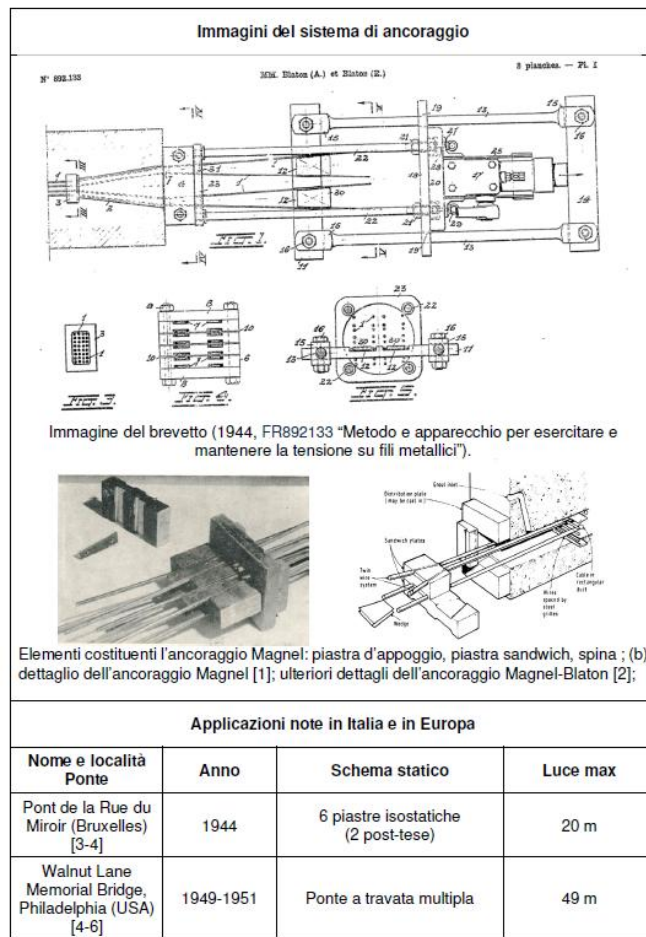


Oltre 70 brevetti di dispositivi di ancoraggio presenti a livello internazionale già nel 1962!

(Rinaldi, 1962)

7.7 SISTEMA MAGNEL/BLATON

Nome del sistema	Magnet/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 $\phi 7$).</p> <p>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 boiaccia di iniezione, essenziale per la protezione contro la corrosione.</p>



Descrizione

Anni di applicazione

Immagini per riconoscimento

Bibliografia

Eventuali osservazioni in sito delle criticità

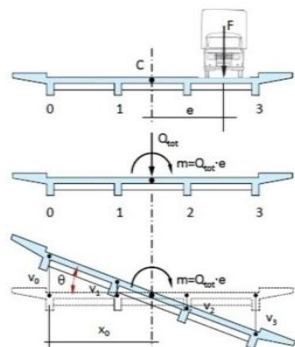
Ponte sul Samoggia (BO). [7]	1950	Travata semplicemente appoggiata	26 m
Possibili criticità del sistema			
da compilare in seguito alla fase ispettiva			
<p>Riferimenti bibliografici</p> <p>[1] Rinaldi, G., 1962. La pratica del cemento armato precompresso, Vitali e Ghianda.</p> <p>[2] CIRIA Report 106 - 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>			

Progetto simulato: importante in assenza di documenti progettuali

Diagramma di flusso

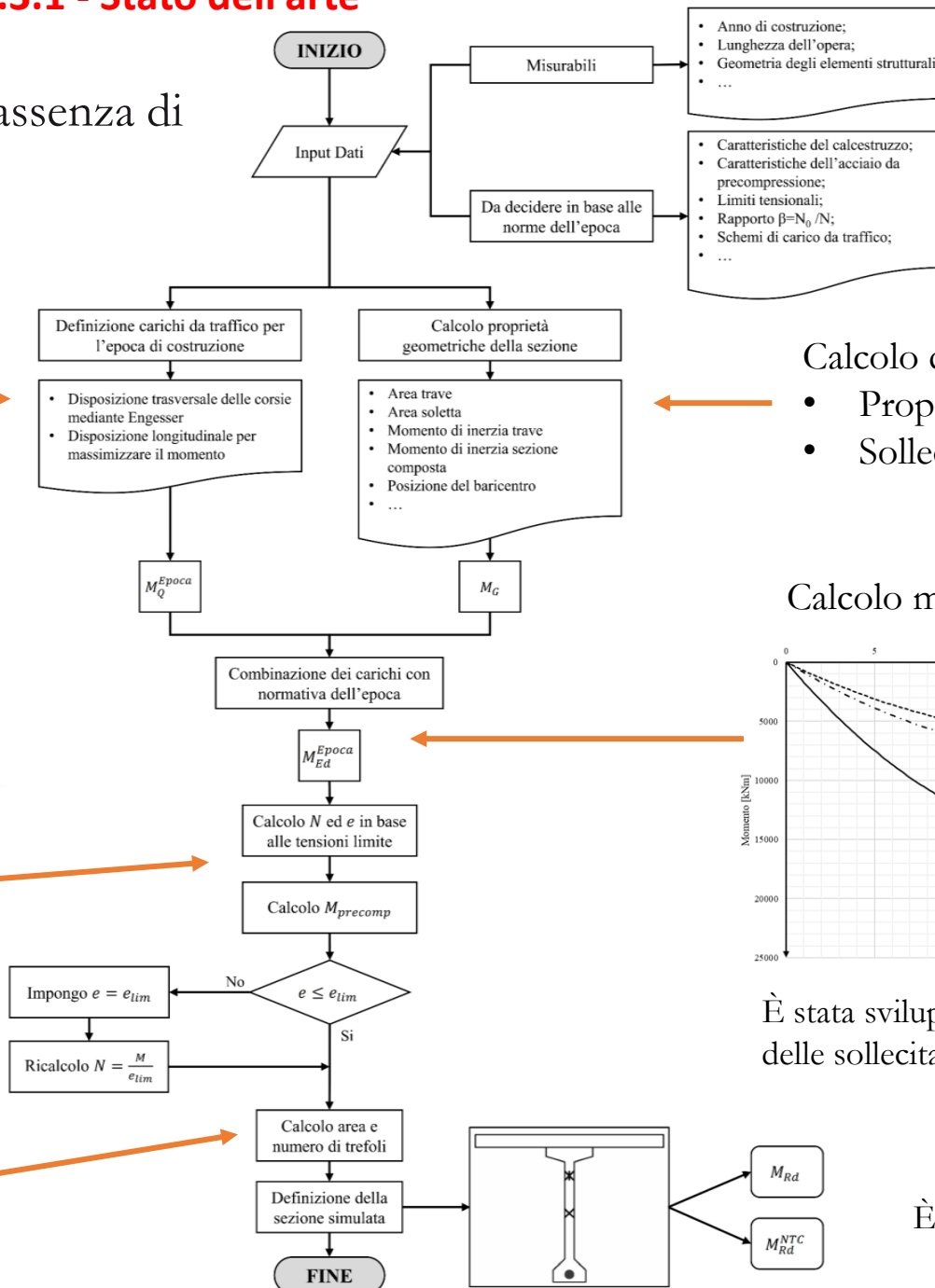
Carichi variabili:

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



Calcolo dell'eccentricità del cavo risultante

Calcolo dell'area del cavo risultante



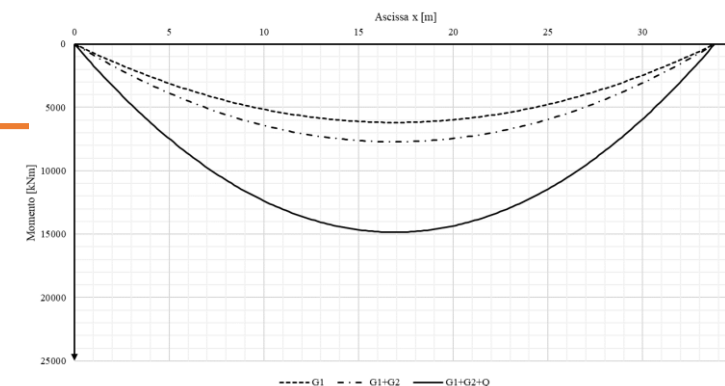
Dati d'ingresso:

- Anno di costruzione
- Geometria dell'opera

Calcolo delle:

- Proprietà geometriche
- Sollecitazione carichi permanenti

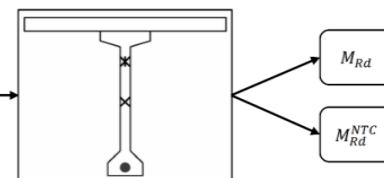
Calcolo momento sollecitante (M_{var})

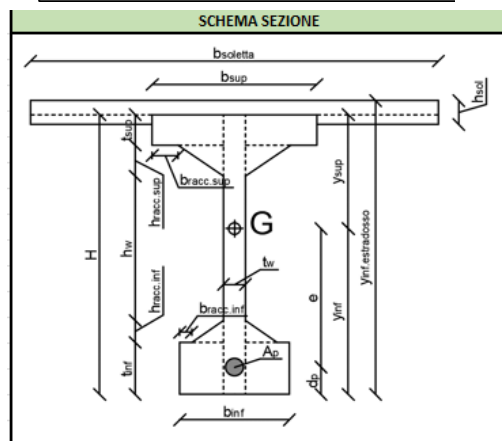
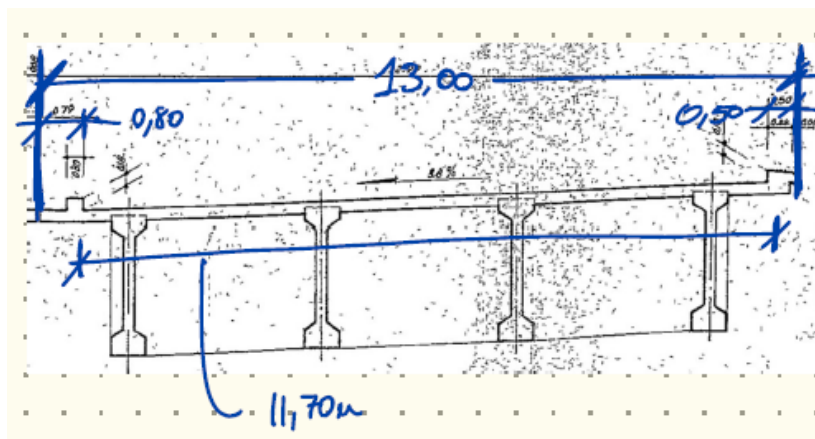
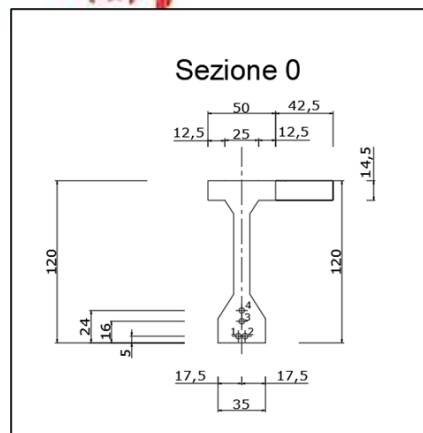


È stata sviluppata anche una routine per il calcolo delle sollecitazioni per transiti eccezionali

Sezione simulata

È possibile calcolare la resistenza della sezione





GEOMETRIA SEZIONE			
Trave		Luce della trave	
h_{tot} [m]	2.40	L [m]	35.5
b_{sup} [m]	0.60		
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_{inf} estradosso [m]	2.50
$h_{racc.sup}$ [m]	0.15	$A_{soletta}$ [m ²]	0.73
$h_{racc.inf}$ [m]	0.15	R_{ck} [MPa]	34.34
$b_{racc.sup}$ [m]	0.00	f_{ck} [MPa]	-
$b_{racc.inf}$ [m]	0.00		
h_w [m]	1.60	Posizione Travi	
A_{trave} [m ²]	0.78	n° travi (n+1)	4
		n	3
γ_{vel} [kN/m ³]	25.00	Interasse [m]	3.30
R_{ck} [MPa]	41.20	$x_{prima\ trave}$ [m]	1.65
f_{ck} [MPa]	-	$x_{gi\ travi}$ [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
		$y_{c.inf}$ [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

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

materiali tipici

Rc=40MPa

Secondo caso (ponte cavi post-tesi 1968)

dalla simulazione

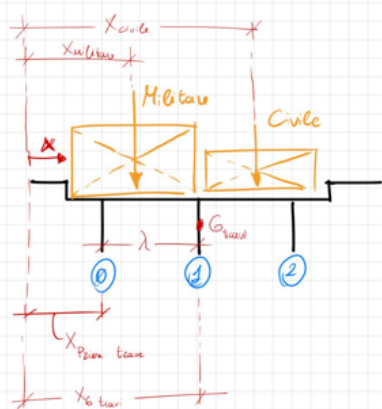
dai dati della Relazione

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_{pud0} [%]	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

CALCOLO MOMENTO RESISTENTE MEZZERIA			
DATI DA RELAZIONE			
Parametri		M_{rd}	
N_0 [kN]	9810	Acciaio armonico infinitamente resistente	
N [kN]	7848	x [mm]	201.52
A_{sp} [mm ²]	8918	ε_{pud0} [%]	4.84%
$n_{trefoli}$ [-]	96	ε_{sp} [%]	3.76%
$A_{effettiva}$ [mm ²]	8918.4	$y_{g.sp}$ [mm]	1638.63
f_{pyd} [MPa]	1445.00	$y_{g.c}$ [mm]	648.68
f_{cd} [MPa]	24.22	M_{rd} [kNm]	29476.70
		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

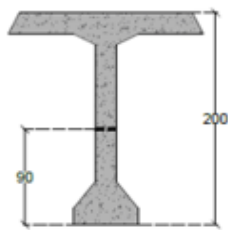
WP4 SPERIMENTAZIONE SU COMPONENTI STRUTTURALI E/O SPECIALI

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

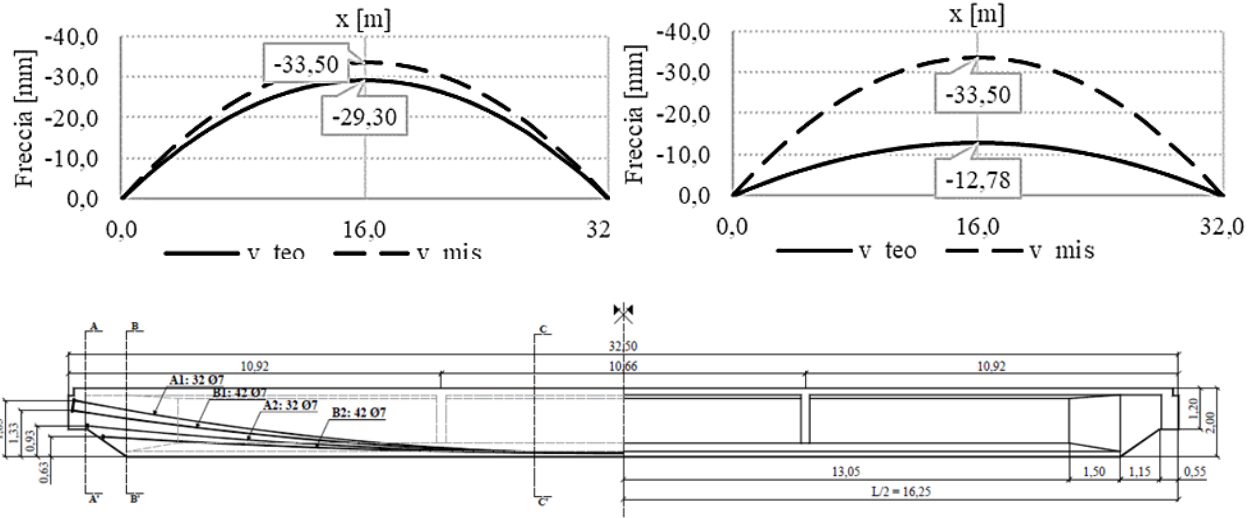


Sommario

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 controfreccia

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

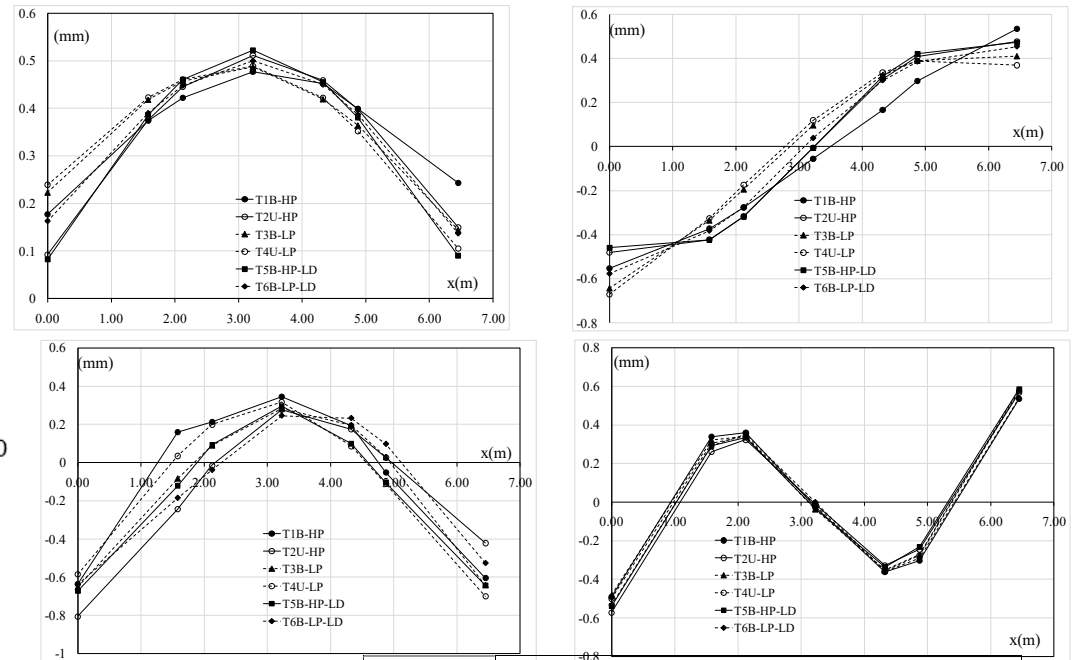


- Approccio 1: non vengono considerati i tempi di messa in carico delle diverse fasi costruttive valutando di conseguenza un unico coefficiente di viscosità $\phi(t, t_0)$ con cui calcolare le cadute di tensione a tempo infinito e le deformazioni in condizioni di lungo termine.

- 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.

UNINA

4 modi di travi uguali ma con diverso livello di precompressione



Specimen	Frequency [Hz]			
	I mode	II mode	III mode	IV mode
T1B-HP	13.3	28.3	51.2	111.7
T2U-HP	16.0	45.9	77.3	124.8
T3B-LP	16.4	38.7	54.3	125.0
T4U-LP	15.4	36.1	58.8	122.1
T5B-HP-LD	17.8	48.8	82.0	126.8
T6B-LP-LD	16.0	41.0	55.9	121.9

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

Variazione percentuale della frequenza

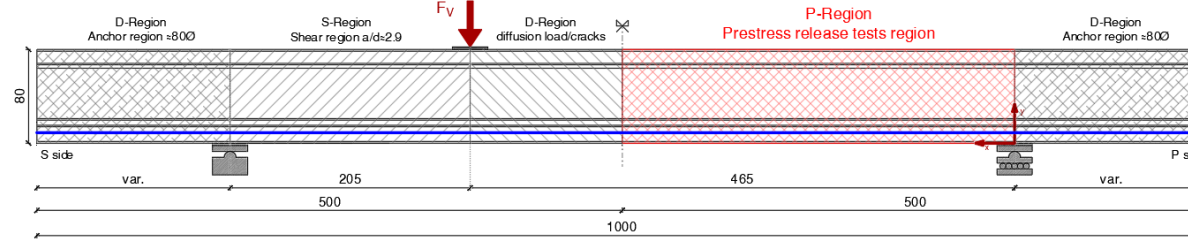
Provino	T1B-HP		T2U-HP		T3B-LP		T4U-LP	
Modo	$\Delta f_{1,0}$	$\Delta f_{2,0}$	$\Delta f_{1,0}$	$\Delta f_{2,0}$	$\Delta f_{1,0}$	$\Delta f_{2,0}$	$\Delta f_{1,0}$	$\Delta f_{2,0}$
1	8.81	-8.81	0.00	-8.55	-4.75	-30.96	-3.82	-24.04
2	9.68	3.46	0.00	8.52	0.00	-2.02	-4.84	-7.56
3	-6.10	-3.81	-3.03	-2.77	-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



#15 Tagli sull'anima

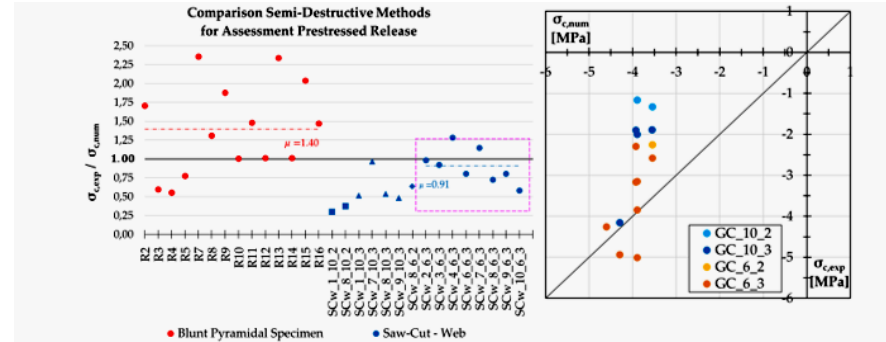
Subtask 4.3.2 – tecniche di diagnostica

Prove di rilascio tensionale nel cls per stimare il livello di 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

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 mezzera 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;
- lontana 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.

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

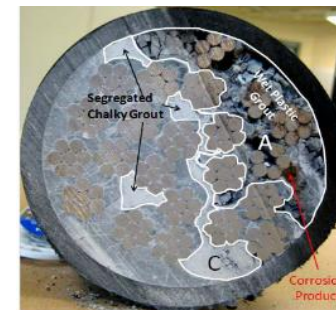
Categoria di ispezione visiva	Difetto maggiore	Difetto moderato	Difetto piccolo	Difetto molto piccolo	Nessun difetto
Segni di fuoriuscita di malta	5	4	3	2	1
Lavorazione	5	4	3	2	1
Cemento fessurato	5	4	3	2	1
Condizione della guaina (cavo visibile)	5	4	3	2	1
Vuoti (cavo visibile)	5	4	3	2	1

Geometria e lunghezza del cavo	Valore
Cavi lunghi <u>multi campata</u> con grandi variazioni di curvatura/grande distanza tra 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



Task 4.3.5 Prove sperimentali

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 danni 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 danni 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 danni 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 danni 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 1:n (Indicare n)	Numero di provini per la tipologia	Metodo di applicazione dei carichi	Modalità di prova speciale (descrizione)	Obiettivo prove	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)	Soletta
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 sito (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 sito (rifer. sito →)	Non divulgabile	1	1	Carichi puntuali (M triangolare)		Resist. Flessione	Cavi scorrevoli	Trefoli	Nessuno/Non rilevabile	Nessuno/Non rilevabile	32.8	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	Esterni	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	Esterni	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																		

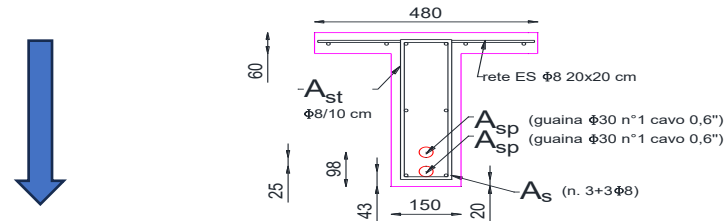
- Quadro sinottico
- Sintesi delle attività sperimentali
- Osservazioni sui risultati e proposte per le Linee Guida
- Confronti con formule normative

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.

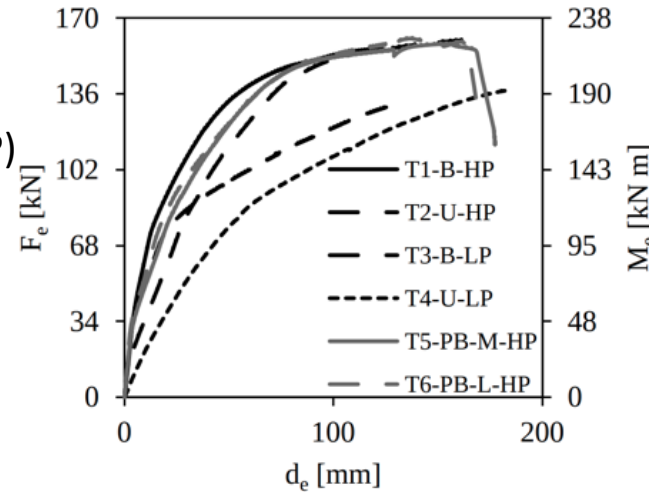


CAVO INFERIORE INTEGRO

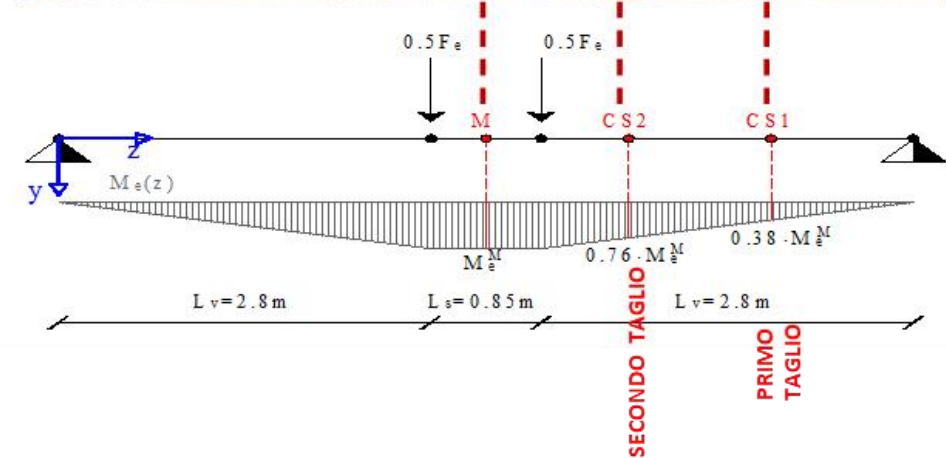
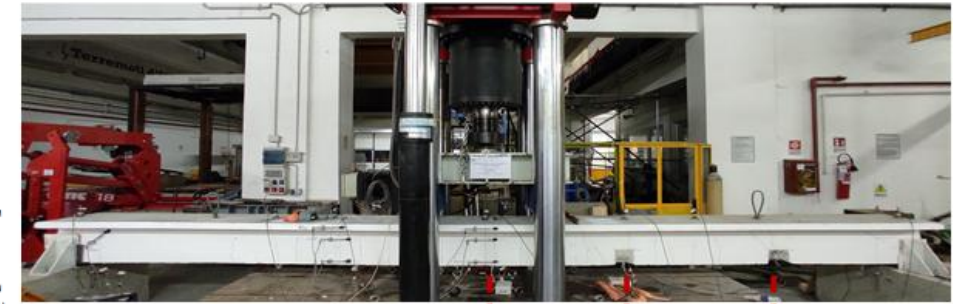
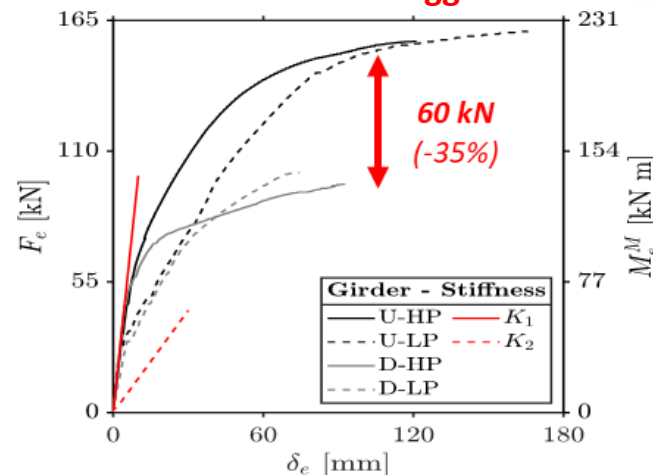


... TAGLIATO

Effetto precompressione e difetti di malta



Confronto tra danneggiata e non danneggiata

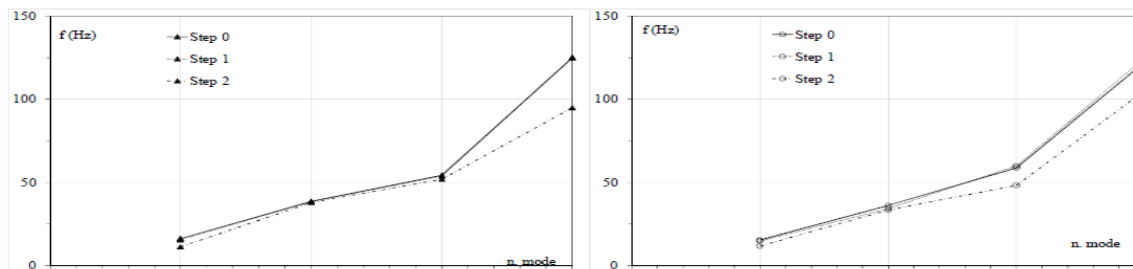
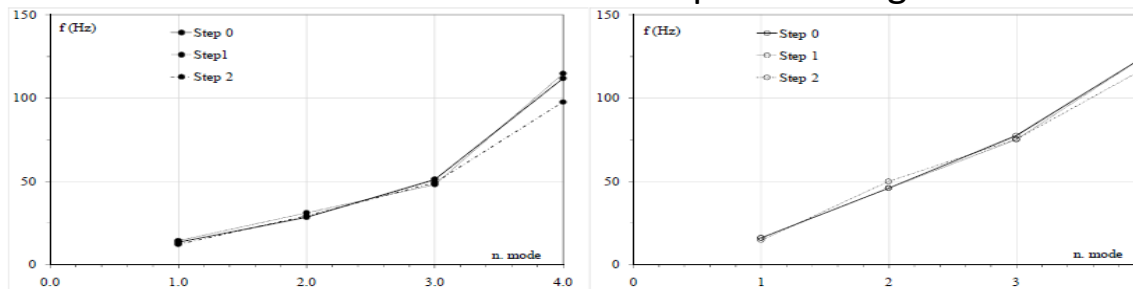


IMPATTO sulle Linee Guida:

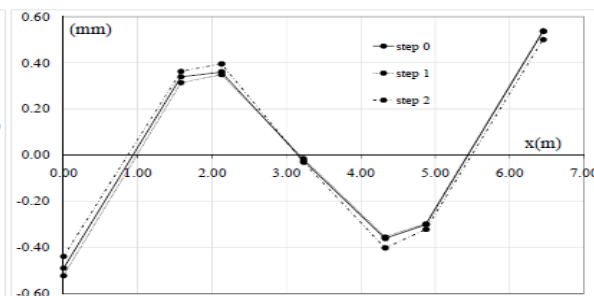
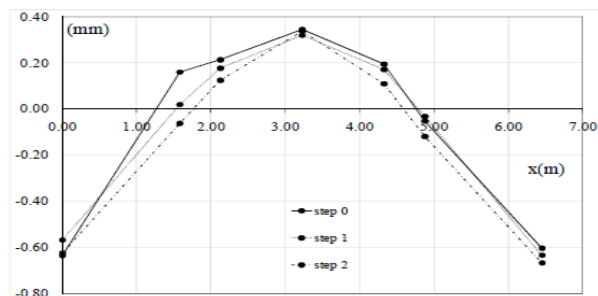
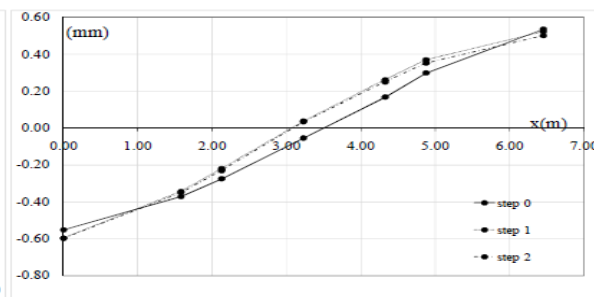
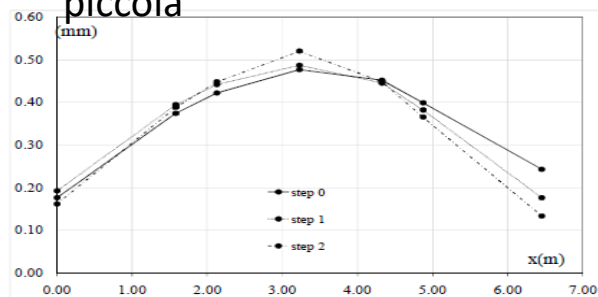
I difetti di malta non evidenziano effetti sulla risposta deformativa e sulla resistenza

Il taglio del cavo non è rilevante in condizioni di esercizio

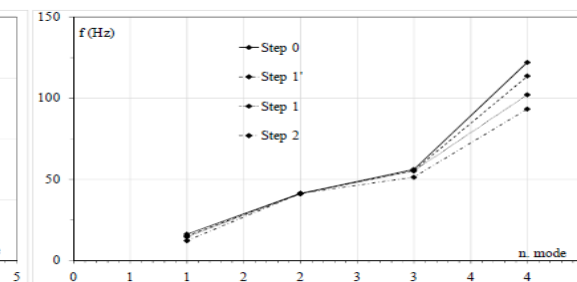
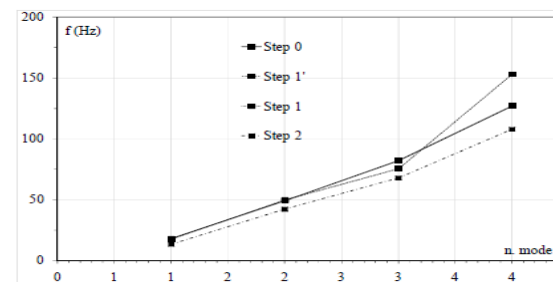
Prove dinamiche per il damage detection



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

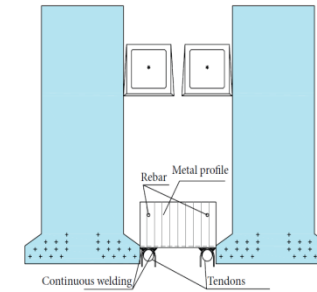


Il taglio dei cavi viene evidenziato dopo la
fessurazione estesa

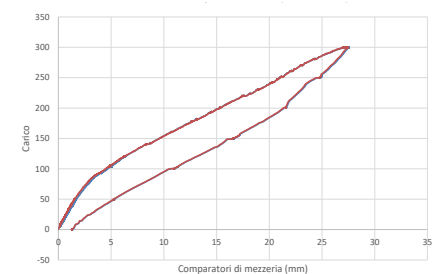
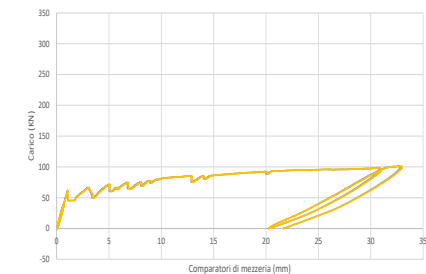
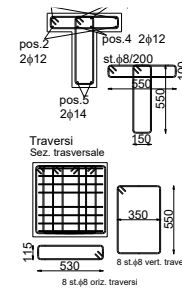
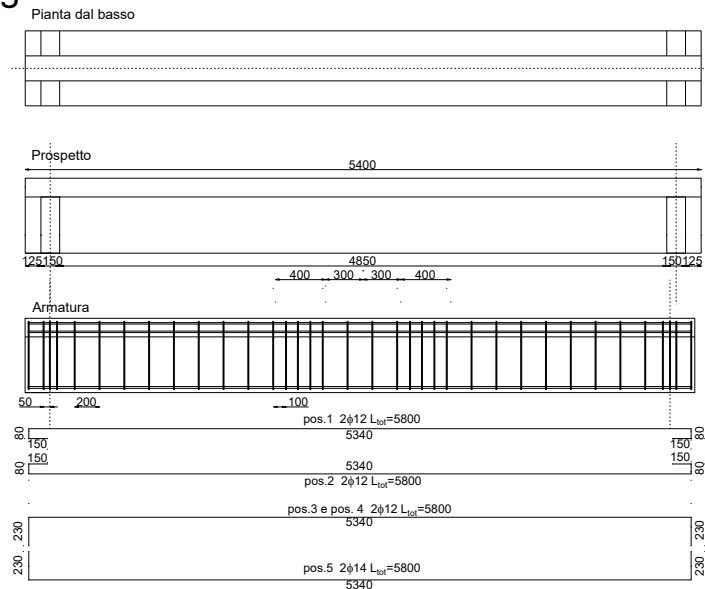
Prove sperimentali su travi in c.a. rinforzate con cavi esterni

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



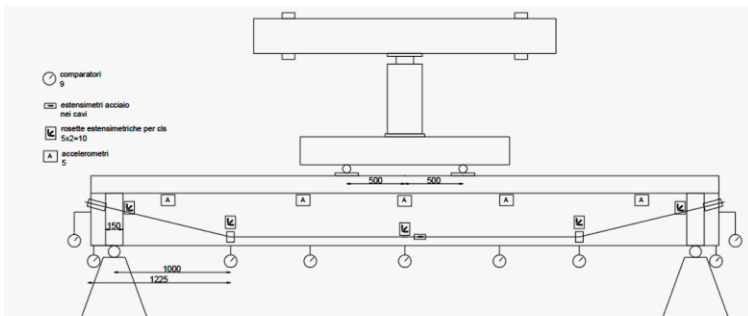
Carico massimo trave in c.a.: 110 kN

Spostamento massimo in mezzzeria: 30 mm

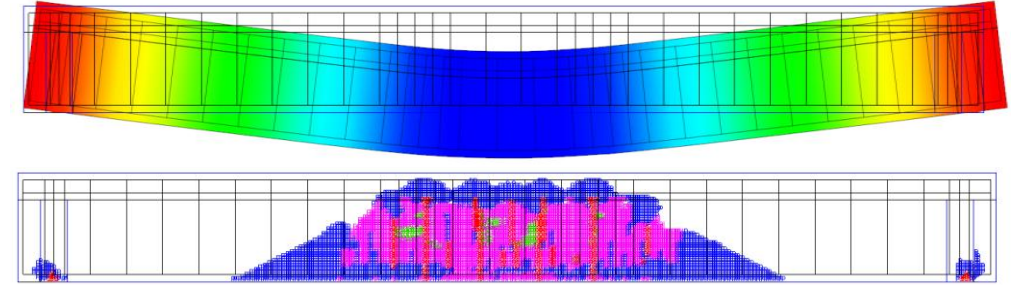
Precompressione: 2 trefoli T15, P = 160 kN per trefolo

Carico massimo dopo precompressione: 320 kN

Sistema di rinforzo efficiente



Esecuzione delle prove e modello FE di riferimento

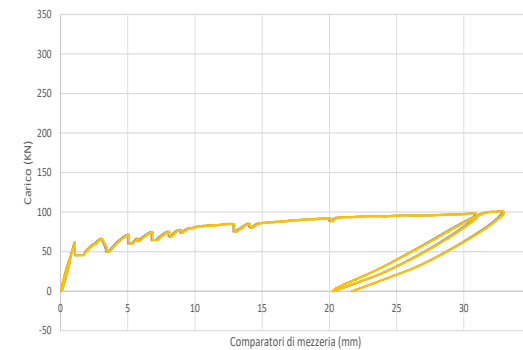
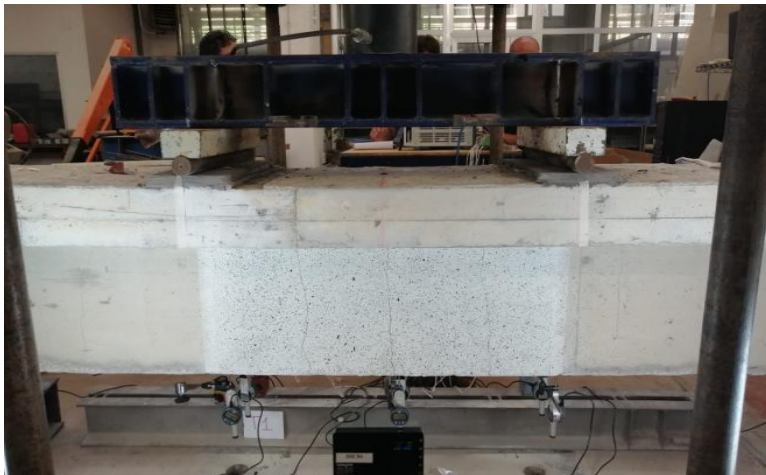


Carico massimo trave in c.a.: 110 kN

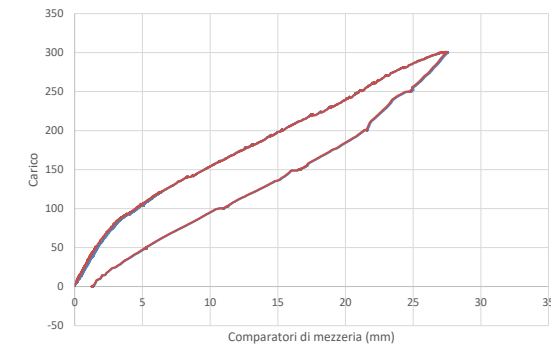
Spostamento massimo in mezzzeria: 30 mm

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



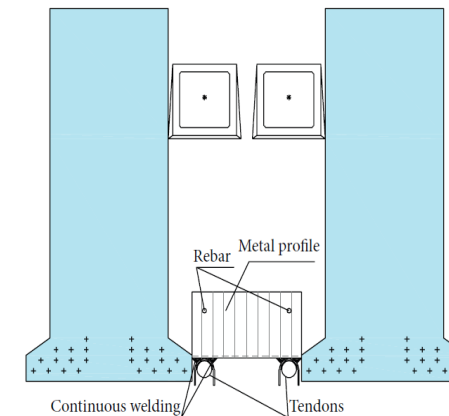
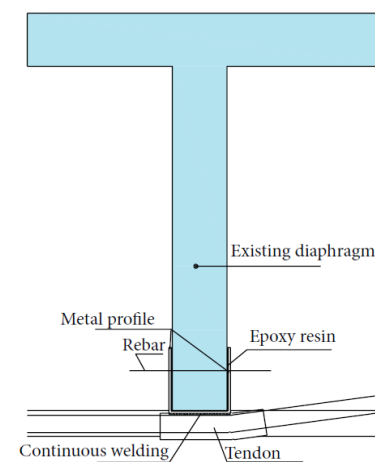
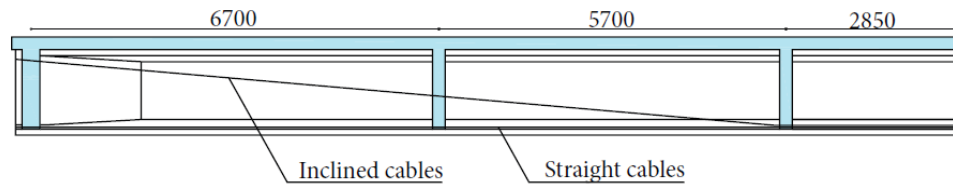
Carico-freccia trave rinforzata

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 nella struttura.

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



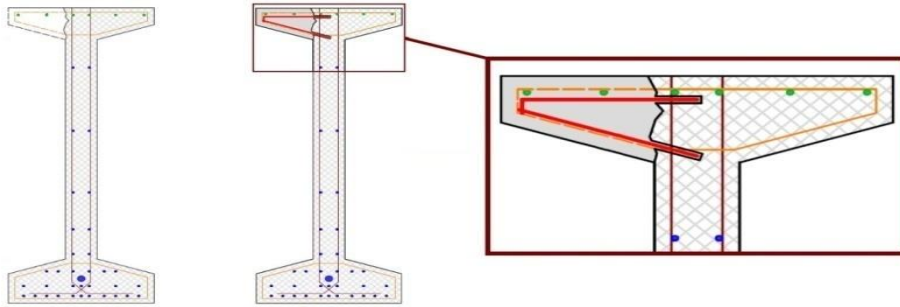
Un applicazione reale sul ponte Terdoppio

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

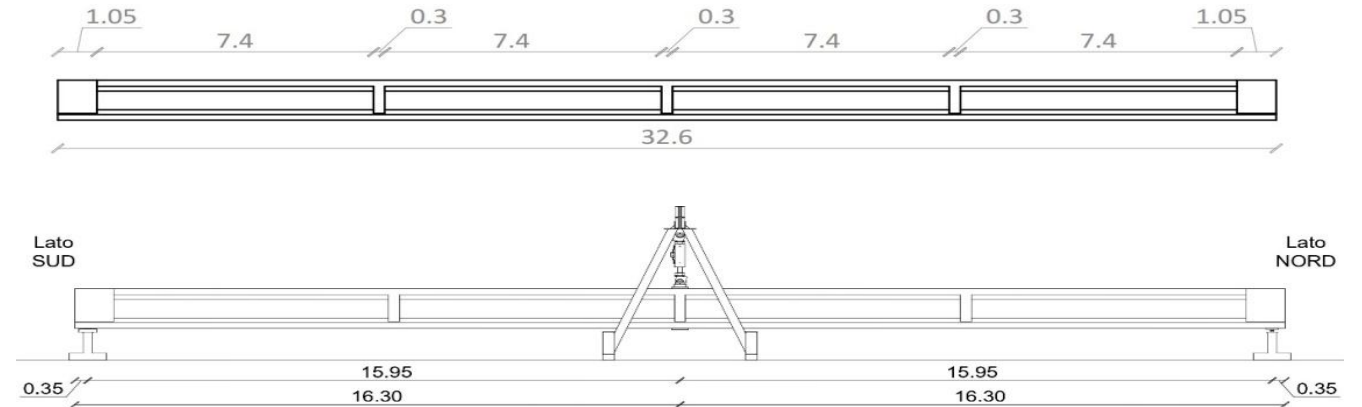
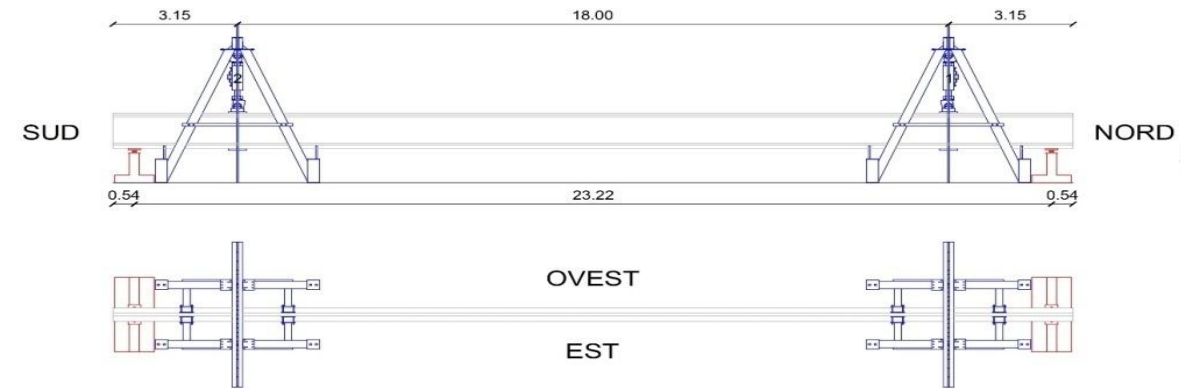
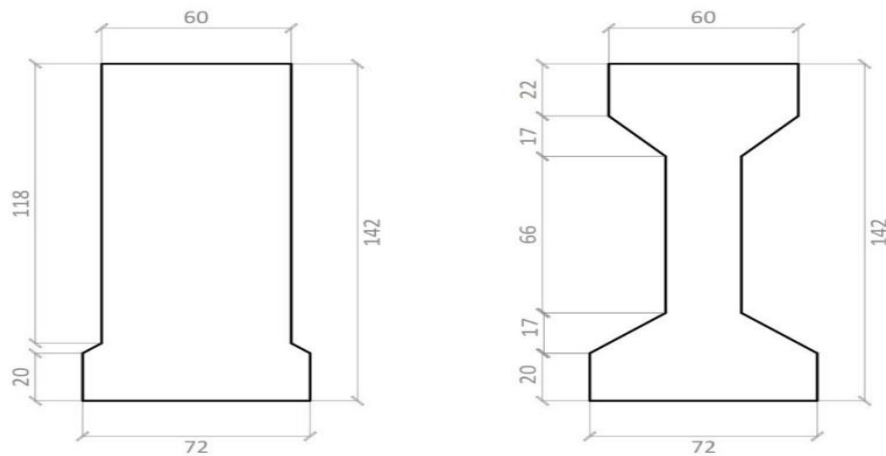
- 3 travi $h_{sezione}=1.20$ m, luce=24.30 m
- 1 trave $h_{sezione}=1.42$ m, luce=32.80 m

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 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 cilindri prelevati con carotaggi
Travi 1 e 2

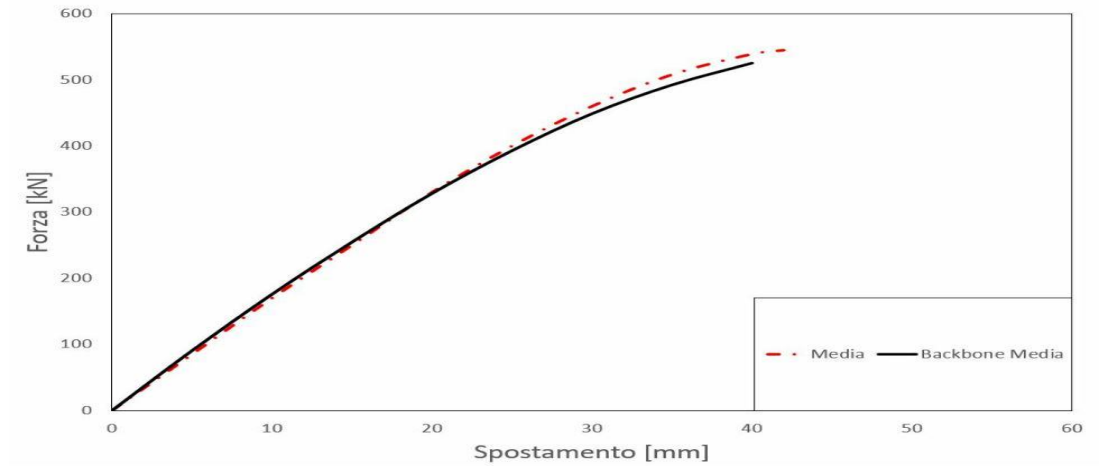
	[MPa]	[MPa]
In mezzeria	38,26	51,48
In mezzeria	32,37	51,06
Al quarto	35,19	46,01
Al quarto	32,19	49,47
Media	34,50	49,51

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

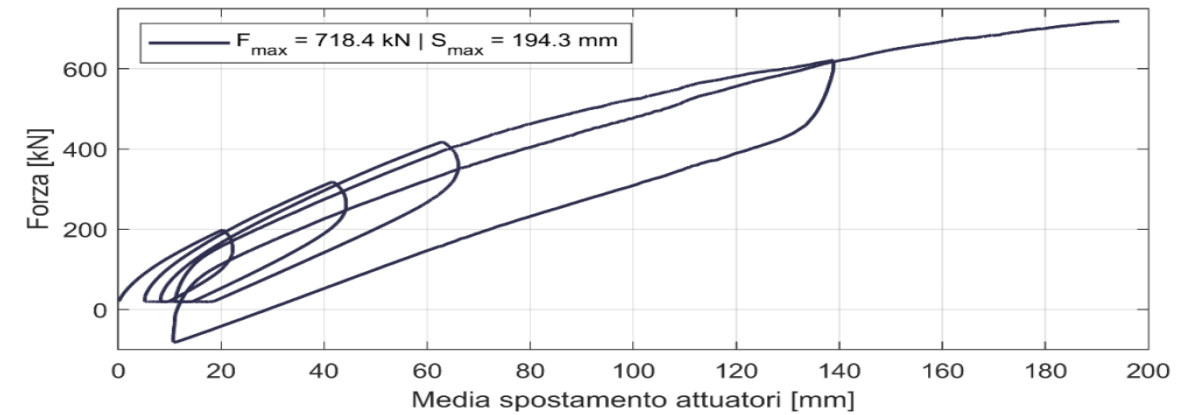
	Sezione [mm ²]	Snervamento [MPa]	Rottura [MPa]		Sezione [mm ²]	Snervamento [MPa]	Rottura [MPa]
Barra 1	52,56	510,8	728,3	Barra 1	116,84	430	648
Barra 2	52,82	497,8	644,3	Barra 2	116,69	443	650
Barra 3	52,92	509,4	718	Barra 3	113,35	438	633
Media	52,8	506	696,9	Media	115,63	436,9	643,5

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

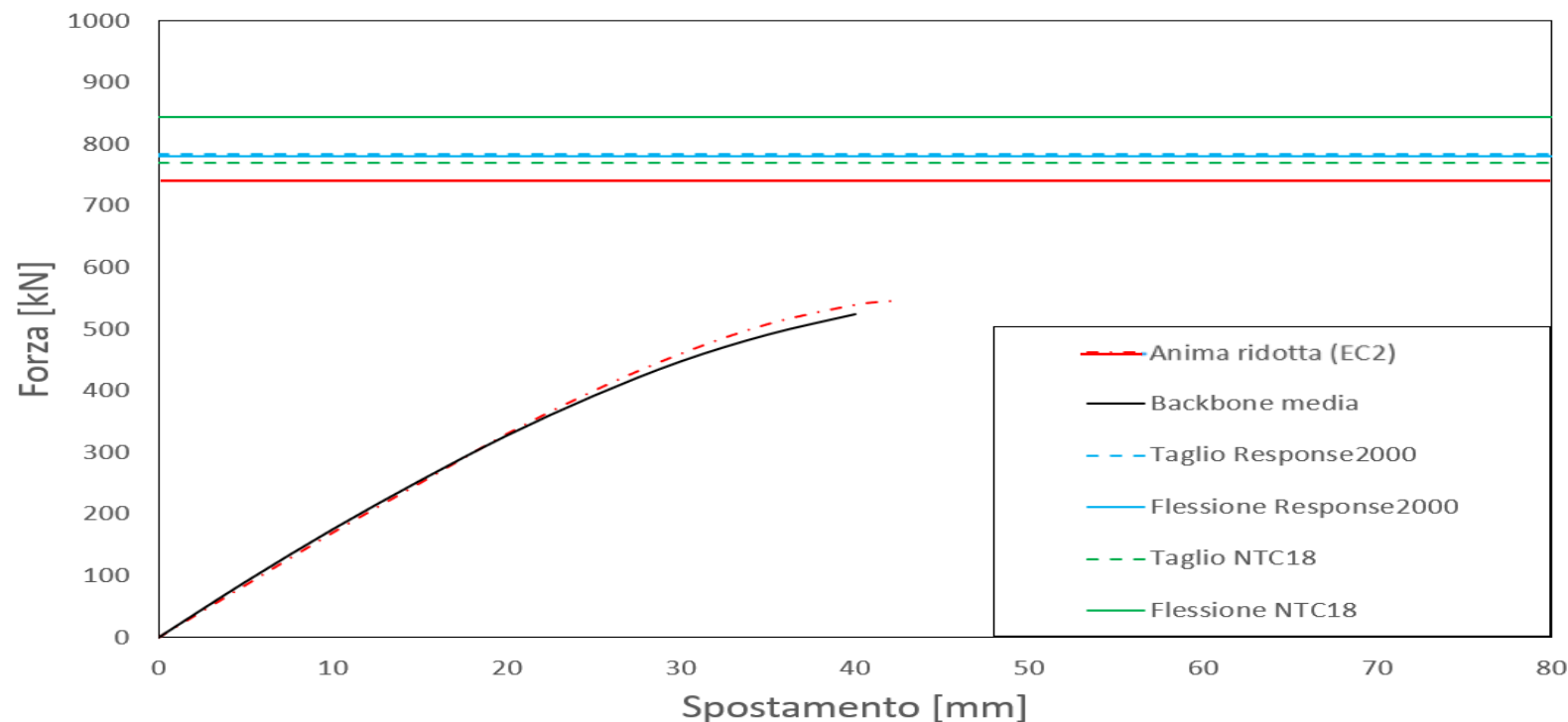
Travi 24.30 m



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 contenete il cavo post-teso

Attività conclusive

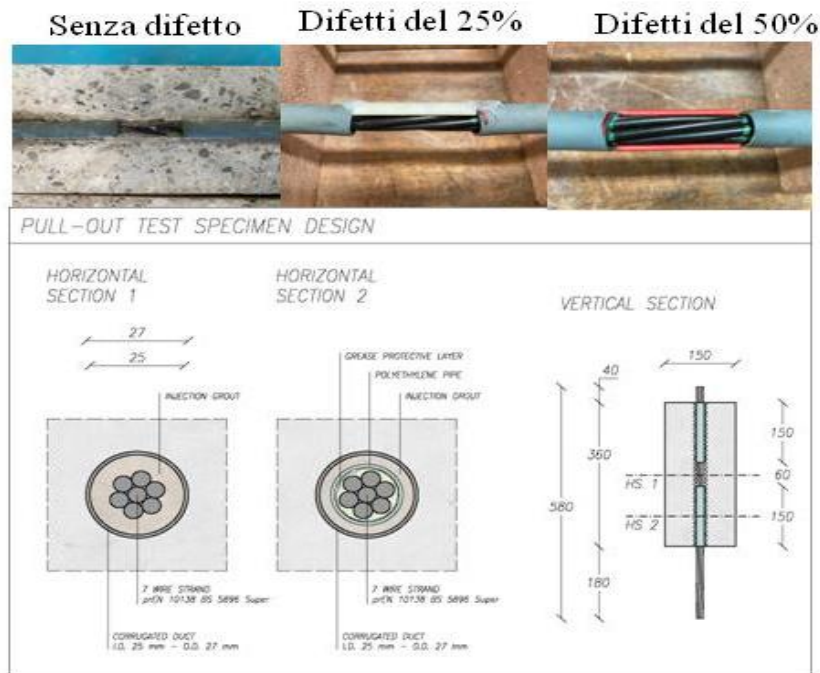
- Valutazione accurata delle modalità di collasso
- Valutazione prestazioni-danno preesistente
- Valutazione deviazione rispetto ai modelli di normativa relativamente alle resistenze a taglio e flessionale (attività in cooperazione con **UniPV**)

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%).

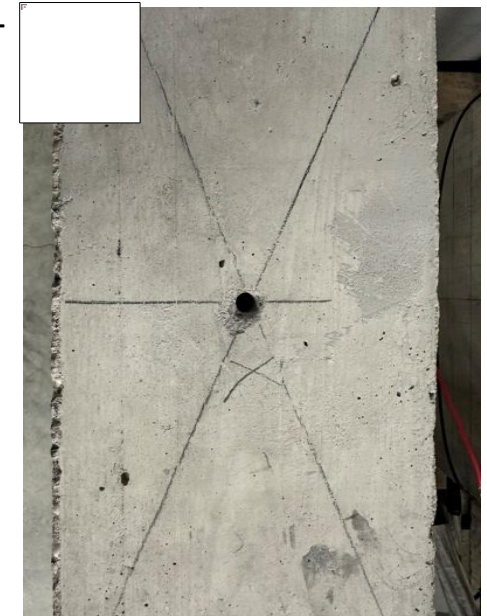
Data inizio processo corrosivo: 05/04/2024



Geometria provini

Metodo di corrosione 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



Set-up corrosione

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%).

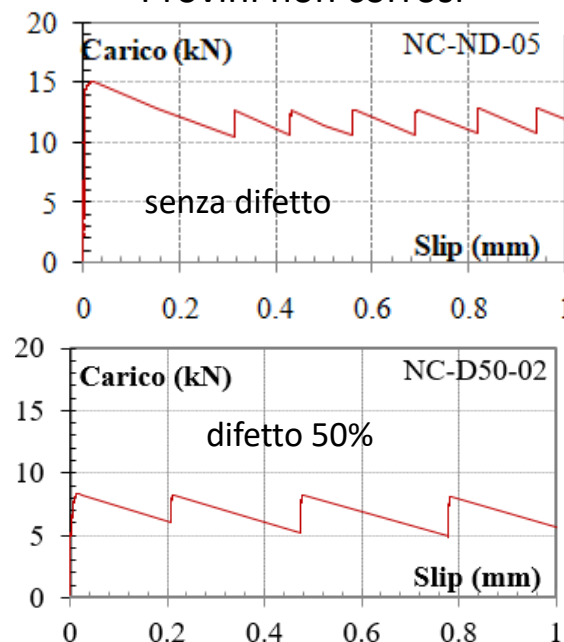


Geometria provini

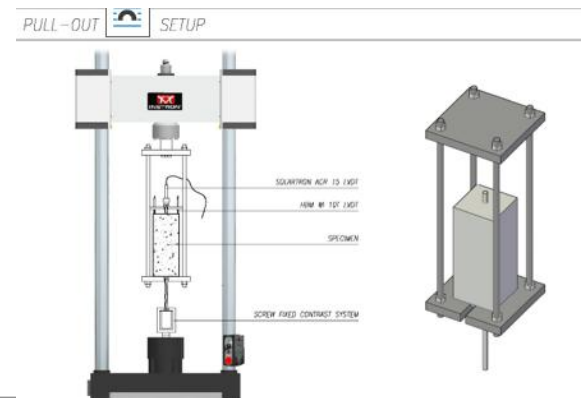
Metodo di corrosione elettrolitico

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

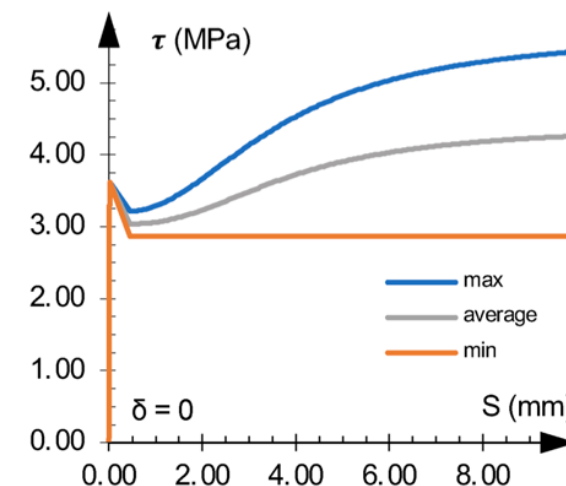
Legame di aderenza
Provini non corrosi



Riduzione del 30% della tensione tangenziale



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

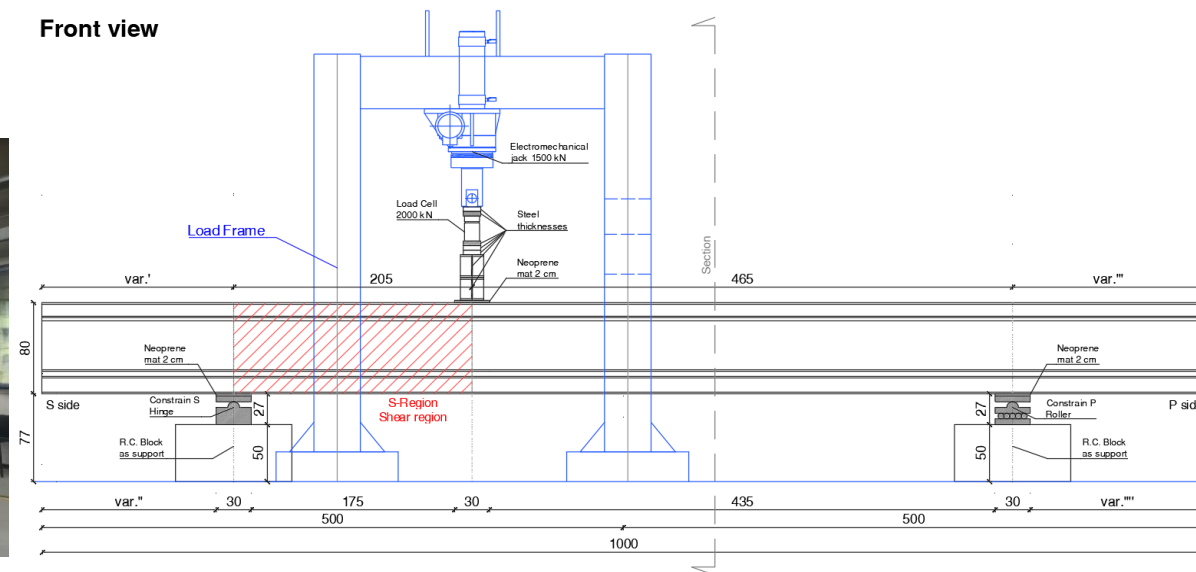
Armatura

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	Ø = 6/10 in. = 15.2 mm

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

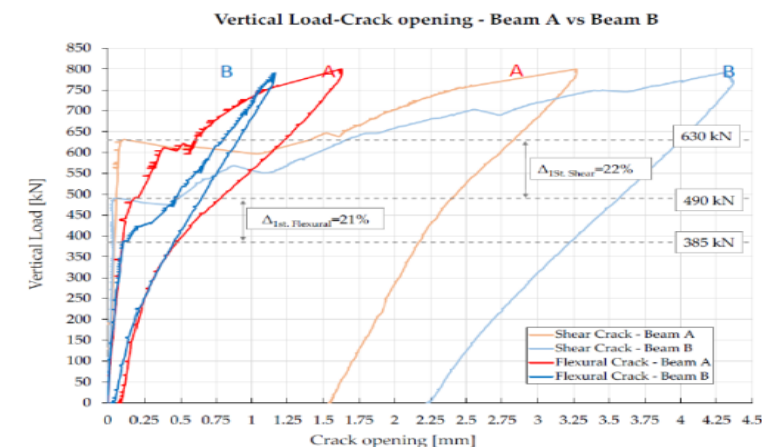
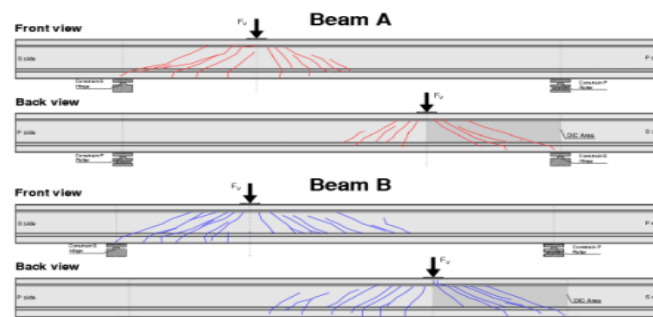


Front view



Setup di prova

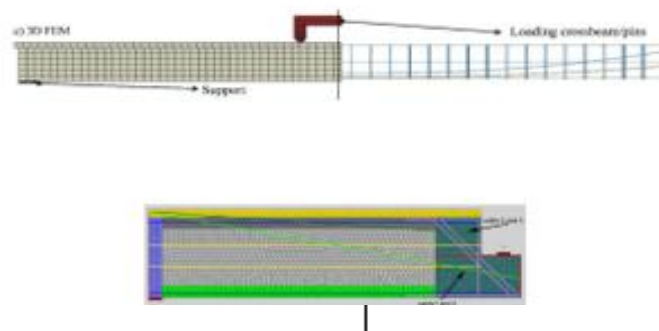
	Beam A	Beam B	Difference
Level of prestress	955 kN (85%*)	641 kN (57%*)	28%
1 st Flexural crack	490 kN	385 kN	21%
1 st Shear crack	630 kN	490 kN	22%



RIDUZIONE DELLA PRECOMPRESSIONE



MAGGIOR CRITICITA' A TAGLIO



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

Task 4.3.3 Modellazione e analisi

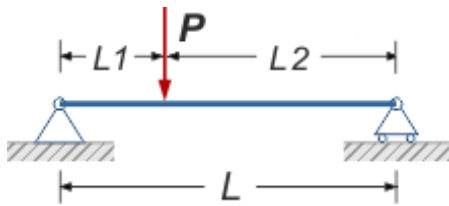
	UNIPR - 1	UNIPR - 2	UNIPA1D	UNIPA2D	UNIPA-ME analitico	UNIME
TIPO DI MODELLO	Misto	Analitico	Numerico	Numerico	Analitico	Numerico
TIPOLOGIA DI ANALISI	Non lineare	A rottura	Non lineare	Non lineare	A rottura	Non lineare
CAMPO DI APPLICAZIONE	Altro Modello analitico e numerico per l'applicazione ad elementi pre-tesi o post-tesi	Armatura post-tesa resa aderente	Armatura mista aderente e non aderente	Armatura post-tesa resa aderente o pre-tesa	Armatura mista aderente e non aderente	Armatura pre-tesa o post-tesa
TARGET DI MODELLO	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
STRUTTURA DI APPLICAZIONE	Travi	Selle Gerber	Travi	Selle Gerber	Travi	Altro Sia per zone specifiche che per intere travi
LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO	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)
METODO DI CALIBRAZIONE	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
APPLICAZIONI A CASI STUDIO REALI?	SI	SI		SI	SI	SI

	UNIPV	UNINA 1D	UNINA 2D	UNINA 3D	UNINA Fragilità	UNIBS
TIPO DI MODELLO	Numerico	Numerico	Numerico	Numerico	Analitico	Numerico
TIPOLOGIA DI ANALISI	Non lineare	Non lineare	Non lineare	Non lineare	Lineare	Non lineare
CAMPO DI APPLICAZIONE	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
TARGET DI MODELLO	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
STRUTTURA DI APPLICAZIONE	Travi	Travi	Travi	Travi	Altro Impalcato a graticcio	Travi
LIVELLO DI DEFINIZIONE DEL MODELLO	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Locale su elemento strutturale	Sezionale	Globale su struttura
METODO DI CALIBRAZIONE	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali propri	Dati sperimentali di letteratura	Simulazioni numeriche su casi studio	Dati sperimentali propri
APPLICAZIONI A CASI STUDIO REALI?	-	SI (prove sperimentali di laboratorio)	SI (travi testate in laboratorio)	SI (prove sperimentali di laboratorio)	SI	NO

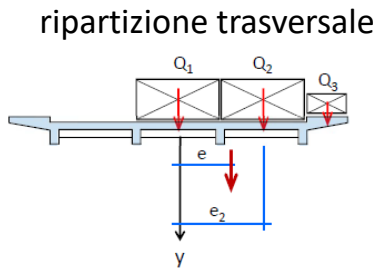
I modelli per le verifiche possono essere sviluppati secondo diversi approcci in base alla finalità

Schemi isostatici di ponti a travata:

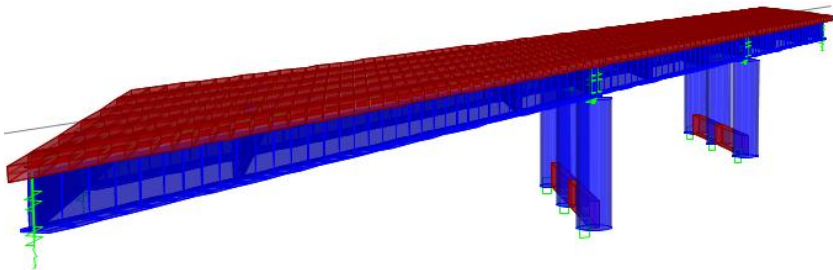
- modelli semplificati e verifiche delle sezioni e altri componenti separatamente
- modelli completi che forniscono automaticamente la combinazione più sfavorevole sulle pile intermedie
- modelli completi anche con spalla e fondazioni e interazione terreno



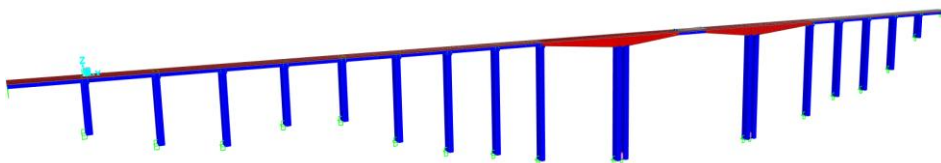
schema di trave appoggiata



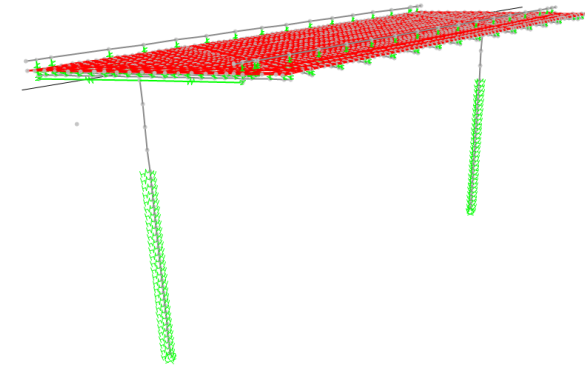
ripartizione trasversale



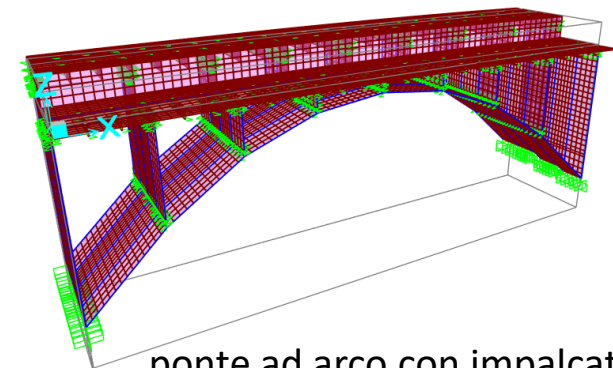
modello completo 3D con impalcato appoggiati



ponte con una parte di impalcato a stampella



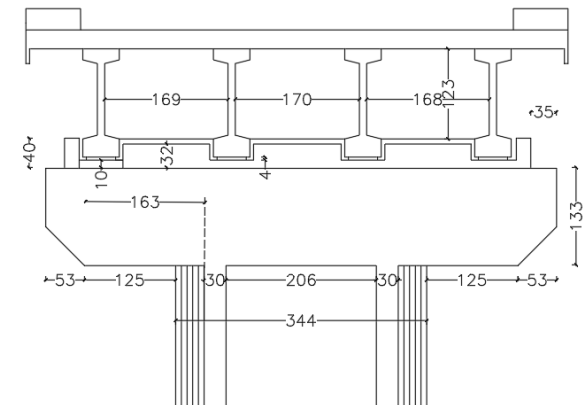
modello con spalle in cui il terreno è schematizzato con molle



ponte ad arco con impalcato continuo

The left diagram shows a square frame structure with a grid. The frame consists of four vertical columns and four horizontal beams. The columns are connected by beams at the top and bottom. The top beam is labeled with a red square and the text "80.603506". The bottom beam is labeled with a red square and the text "80.603506". The right diagram shows the deformed state of the frame, with green shaded areas indicating the displacement of the structure. The displacement is largest at the corners and decreases towards the center of the beams. A red square is also present on the top beam, labeled with the text "80.603506".

Diagram of a continuous beam with three supports (A, B, C) and a cross-section of the third support. The beam has segments of 1.10, 1.00, 1.10, and 1.00. Loads include FG2, qk2, Qk1, and qpavimentazione. The cross-section shows a 3000mm wide slab on two 200mm wide columns, with a 100mm gap between them. Dimensions for reinforcement and concrete are also shown.

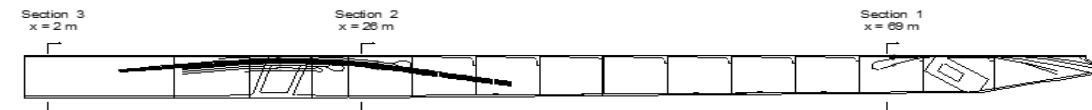


Organizzazione dei contenuti

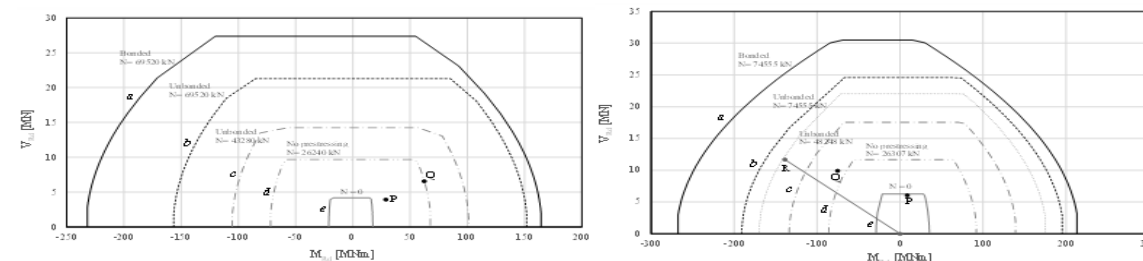
Scheda di sintesi per ogni modello

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 strallo e domini sezione 2 in prossimità della pila per diversi valori di N

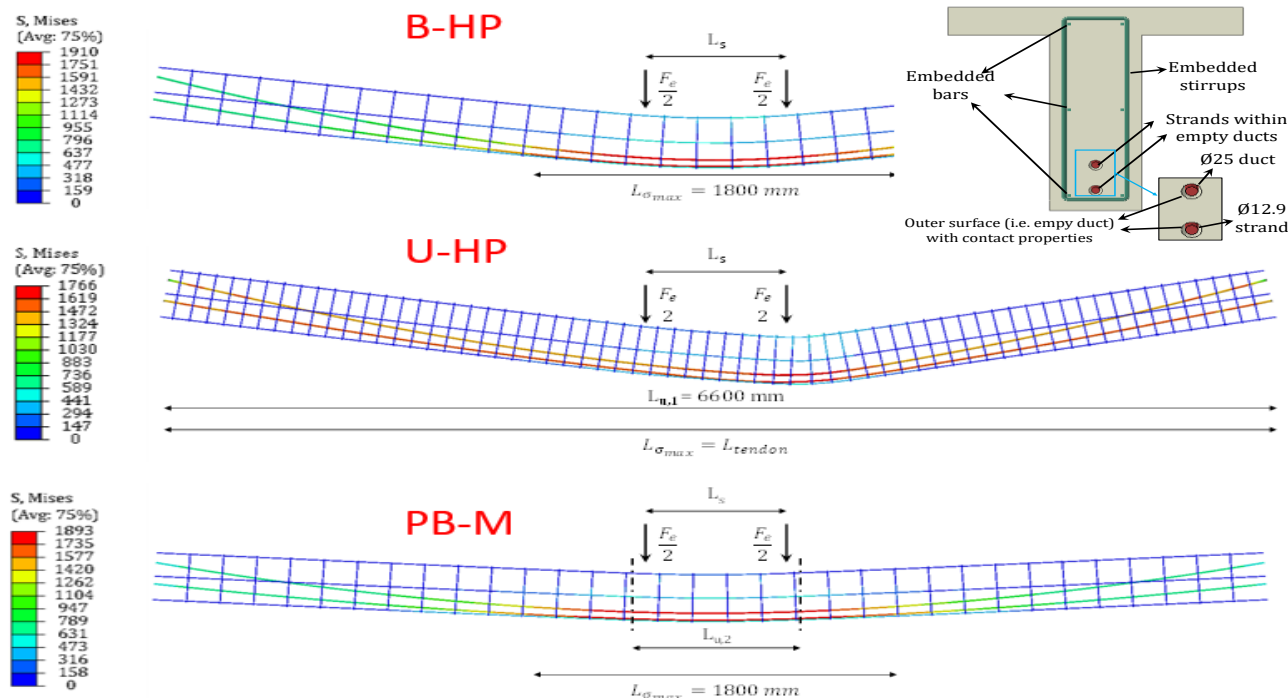
Suggerimenti Applicativi

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

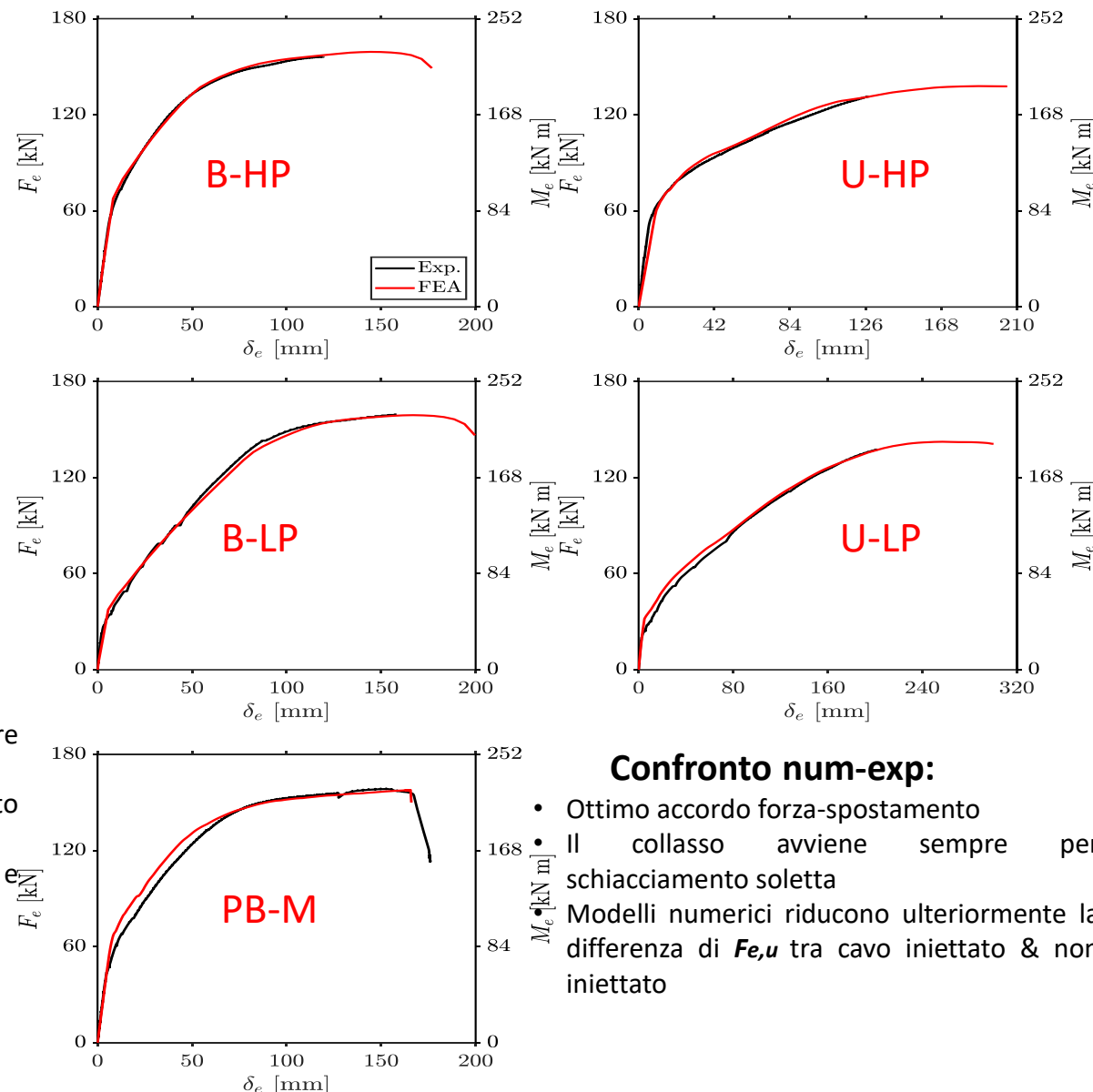


Confronto tra modelli numerici:

- Travi con **trefoli unbonded** attingono una forza di picco **-13%** (T2-U-HP) e **-11%** (T4-U-LP) inferiore alla trave di controllo.
- Travi **parzialmente iniettate** mostrano la **stessa forza di picco della trave di controllo**. Ciò è dovuto al rapporto tra lunghezza unbonded su lunghezza bonded dei trefoli
- Travi con trefoli unbonded mostrano una **deformabilità molto maggiore** rispetto ai casi bonded e partially-bonded.

IMPATTO sulle Linee Guida:

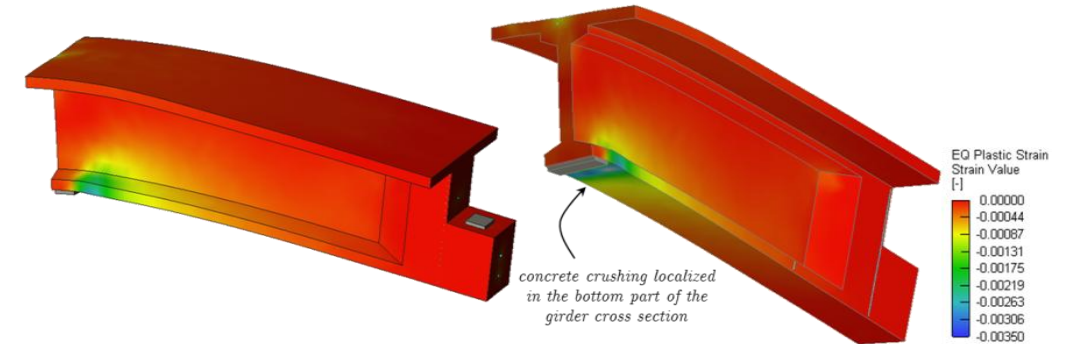
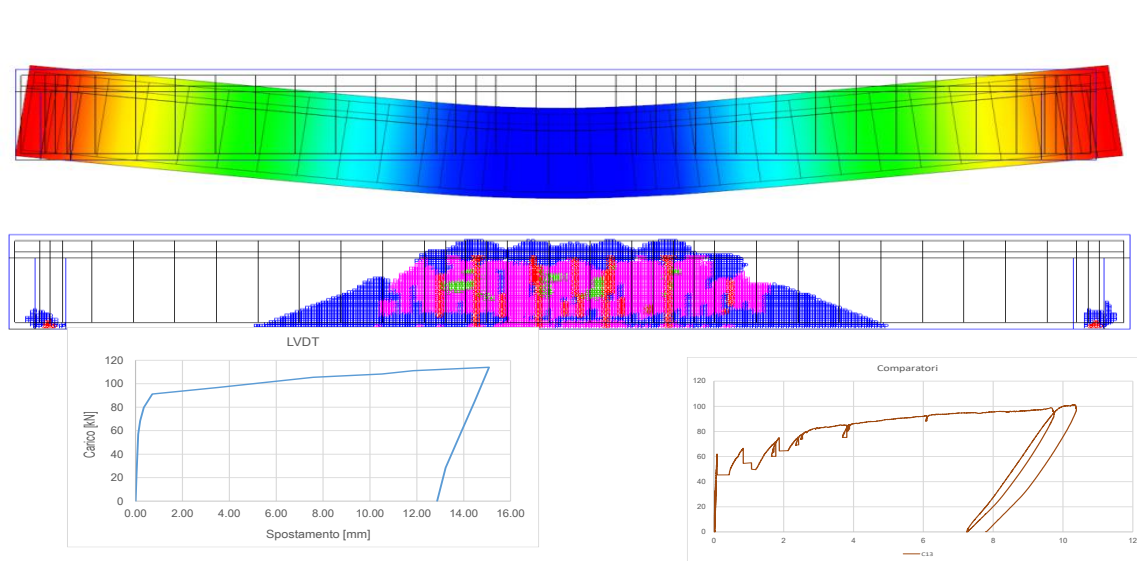
- Modesta influenza dei vuoti delle guaine di PT



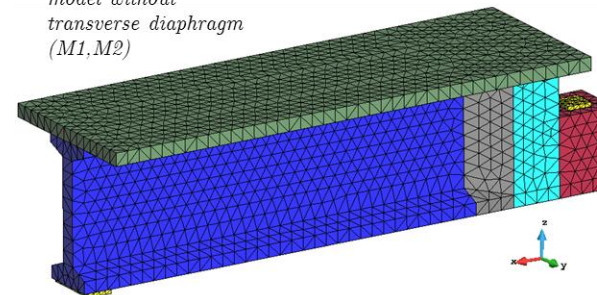
Confronto num-exp:

- Ottimo accordo forza-spostamento
 - Il collasso avviene sempre per schiacciamento soletta
- Modelli numerici riducono ulteriormente la differenza di $F_{e,u}$ tra cavo iniettato & non iniettato

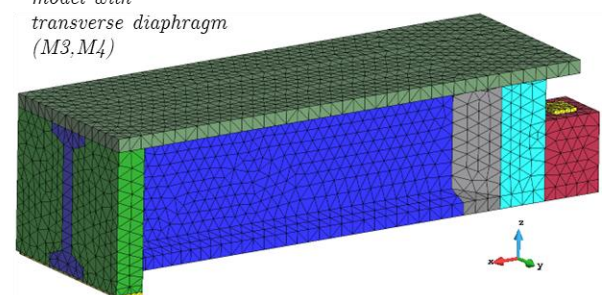
Sono stati sviluppati diversi modelli numerici ad Elementi Finiti 1D, 2D e 3D per la valutazione della capacità portante di travi ed impalcati precompressi, di selle Gerber con ancoraggi di cavi post-tesi e per modelli locali tramite analisi non lineari push-down, con applicazioni a casi-studio reali.



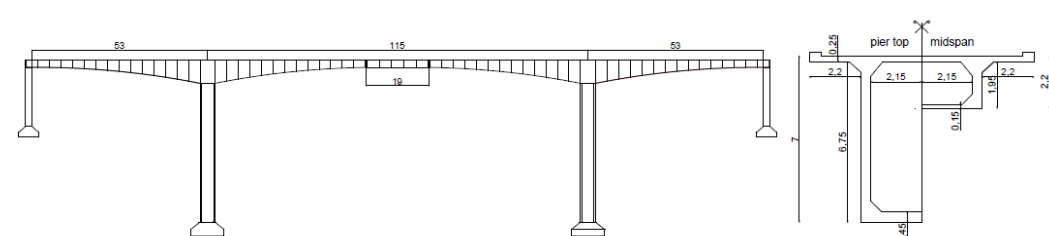
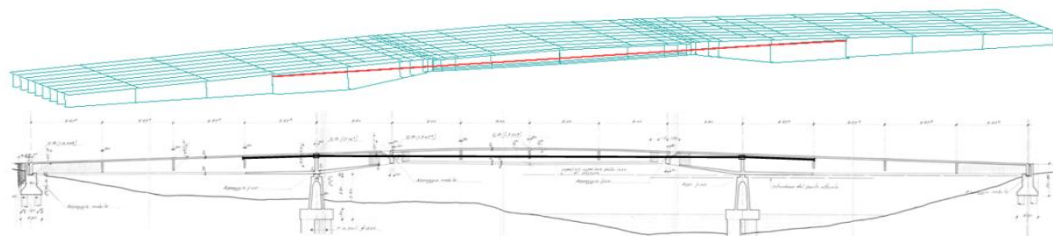
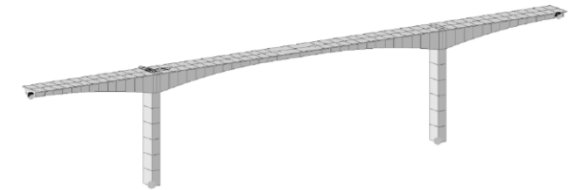
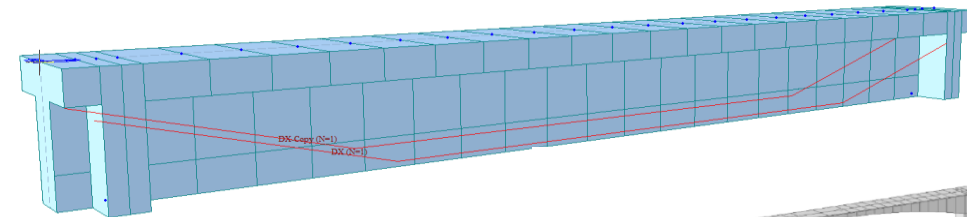
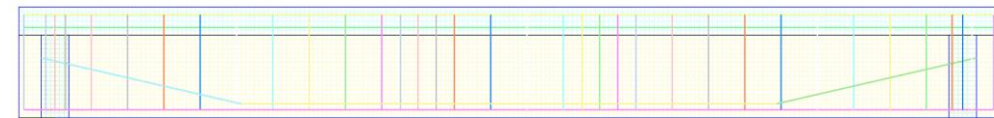
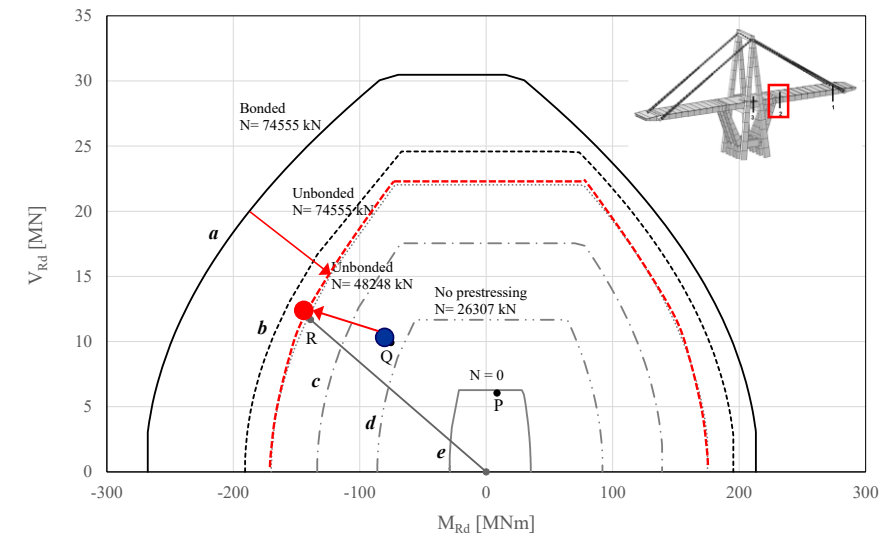
model without
transverse diaphragm
(M1,M2)



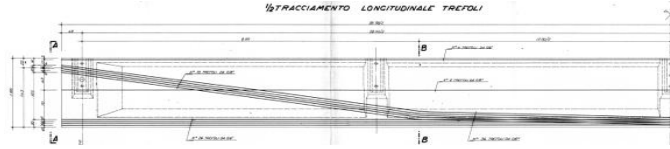
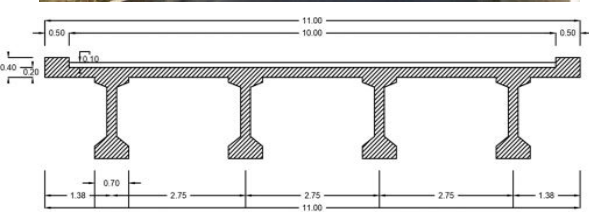
model with
transverse diaphragm
(M3,M4)



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 tracciamento trefoli

Moltiplicatori dei Carichi (Flessione)

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

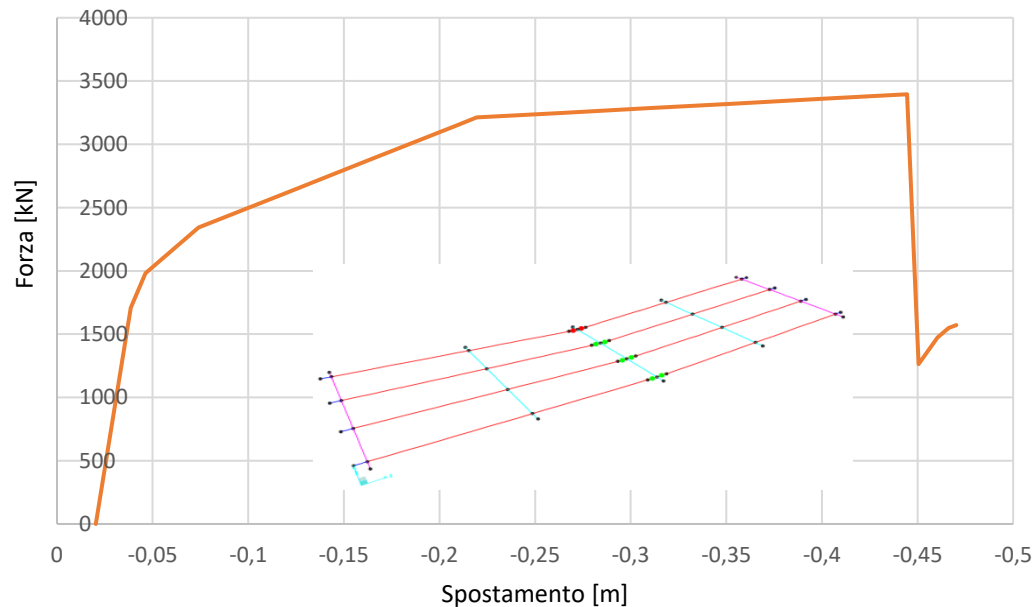
Struttura Non Rinforzata

$\lambda=0.8$

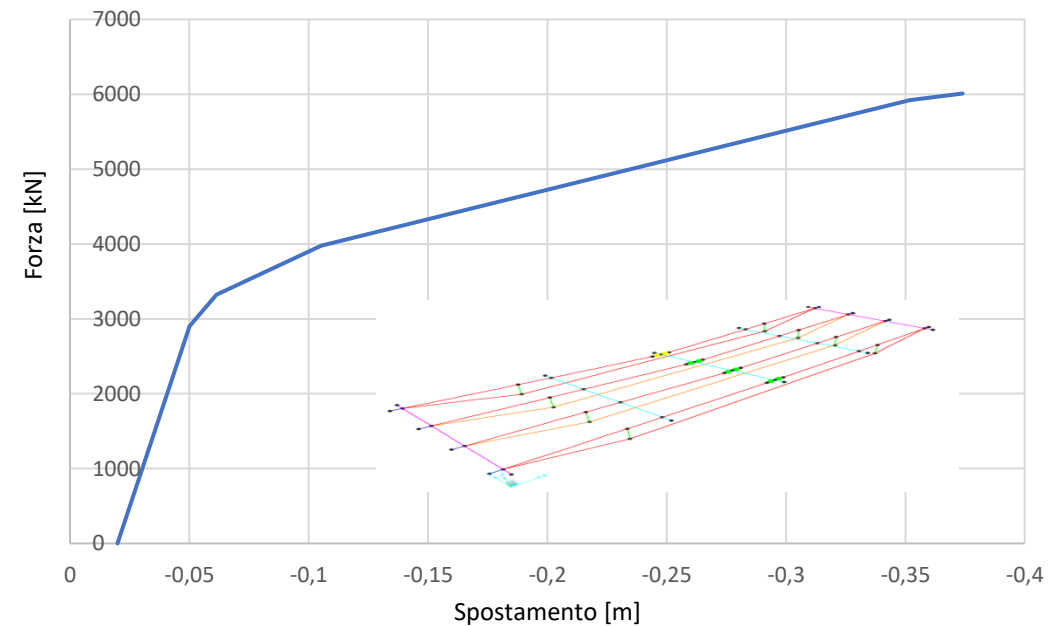
Struttura Rinforzata

$\lambda=1.78$

Analisi Push-Down Struttura Non Rinforzata



Analisi Push-Down Struttura Rinforzata

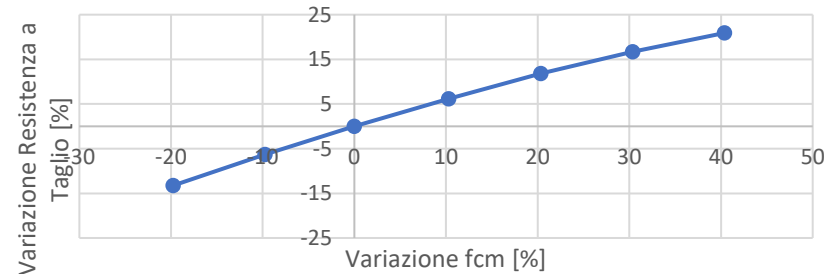


Analisi parametrica - Influenza dei parametri sulle resistenze

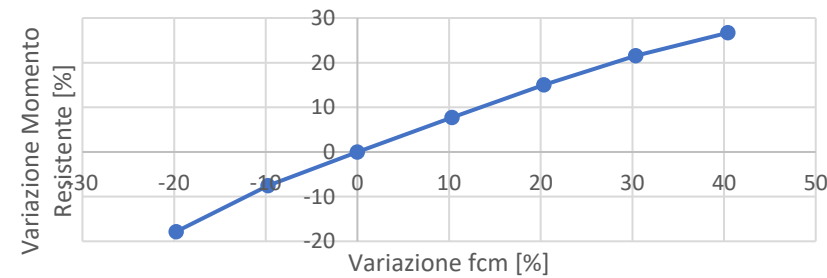
Analisi propedeutiche alla valutazione dell'impatto del danneggiamento e del degrado dei materiali sulle resistenze

Resistenza a compressione calcestruzzo

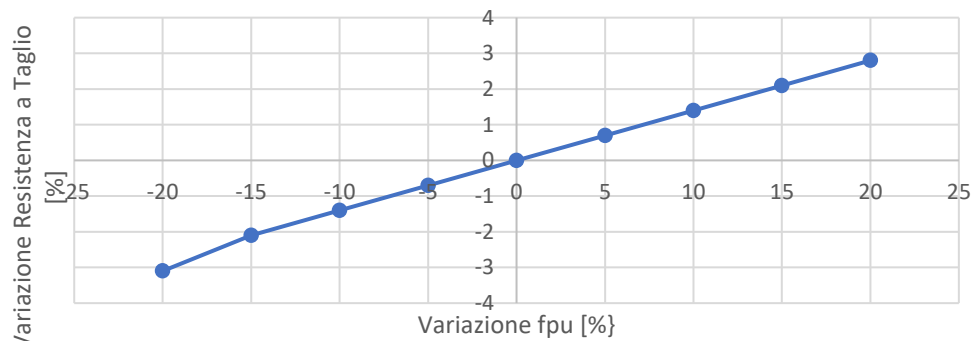
Vrd ($\chi=21,15$)



Mrd ($\chi=12,15m$)

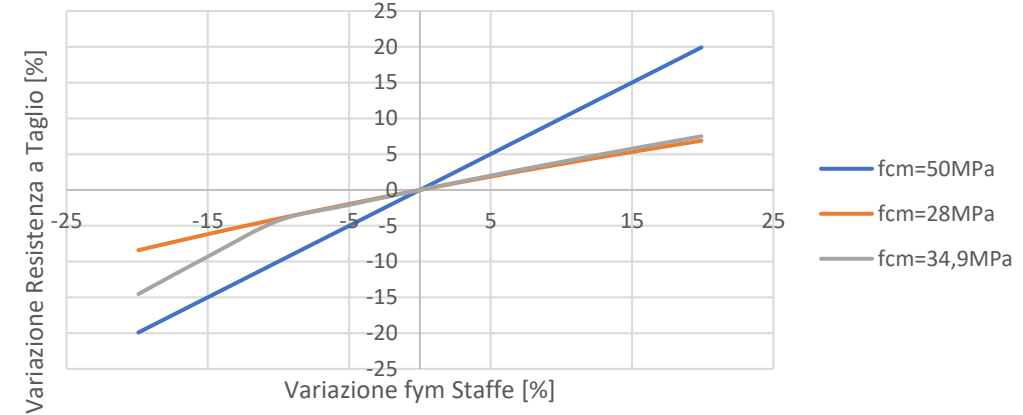


Mrd ($\chi=12,15m$)

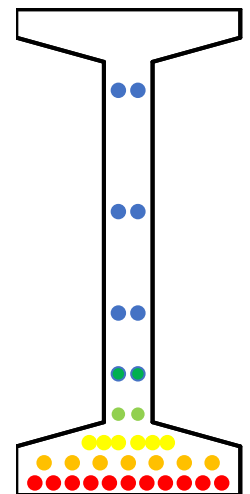
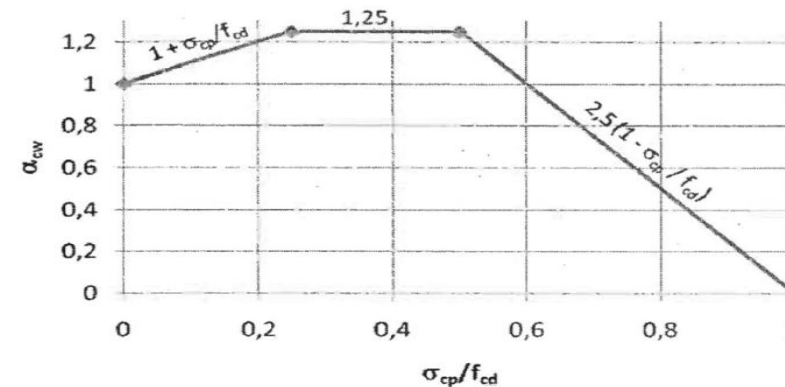


Tensione di snervamento staffe

Vrd ($\chi=12,15m$)

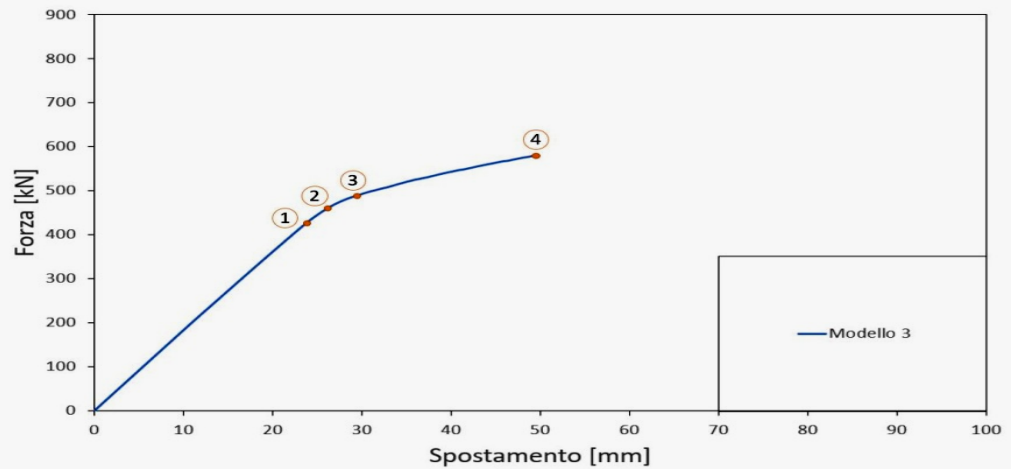


Resistenza a trazione armatura di precompressione

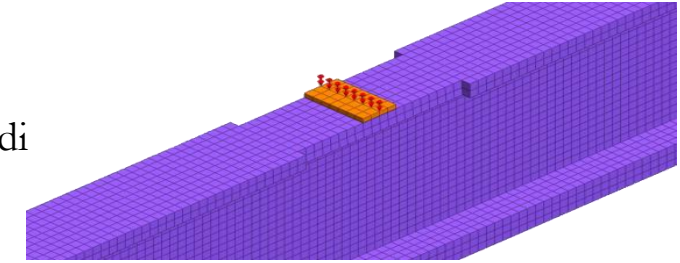


Modellazioni delle prove sperimentali
con MIDAS FEA-NX

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



1



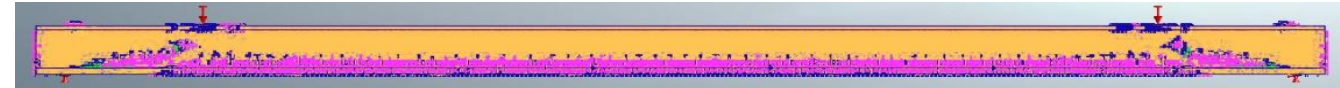
2



3

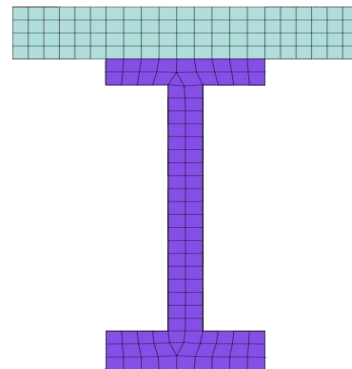


4



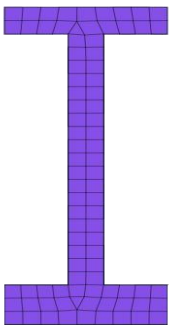
Modelli alternativi

Modello 4: Aggiunta Soletta

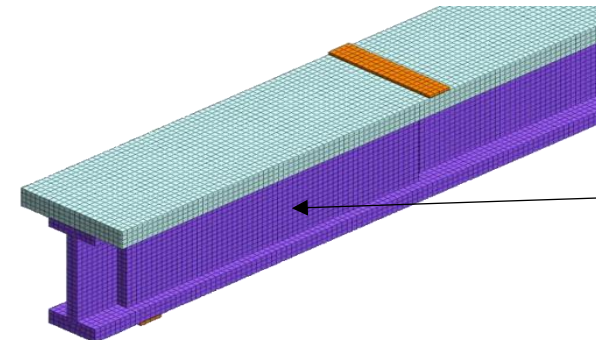


Modello 3:

Trave Non Danneggiata, perdite di tiro



Modello 5:
Aggiunta Rinforzo

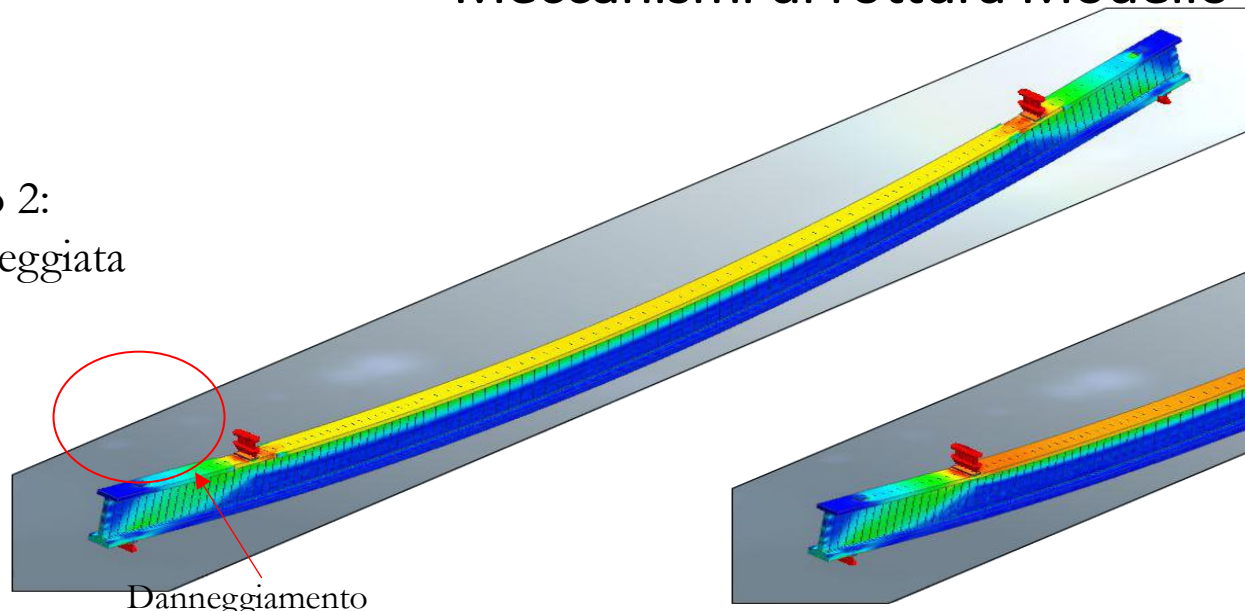


Rinforzo
anima

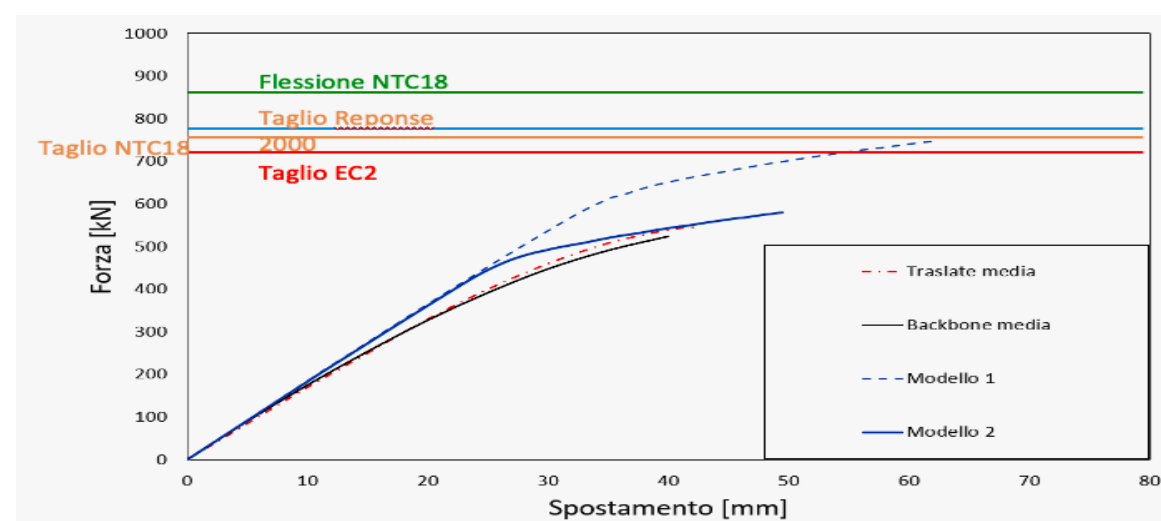
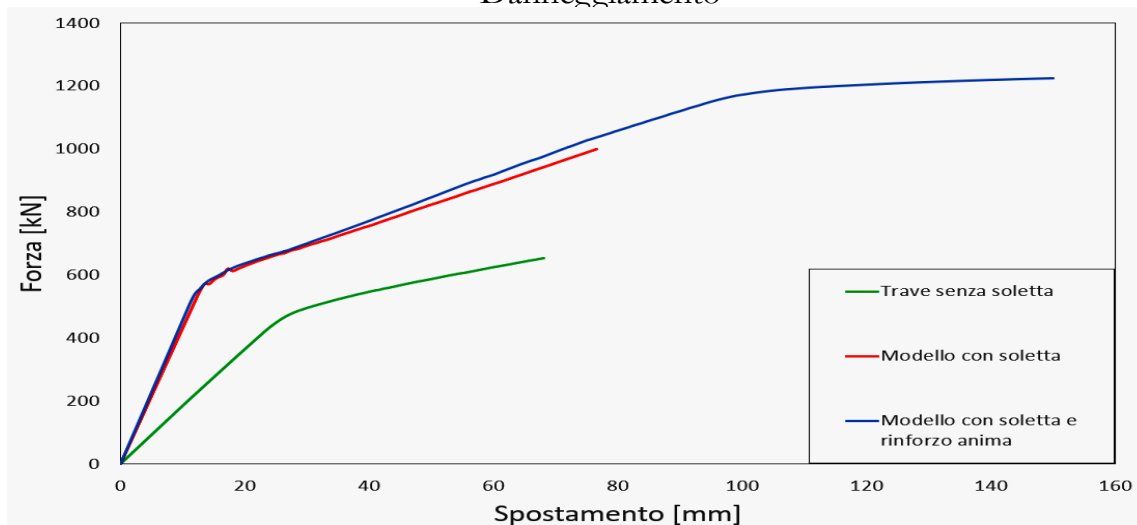
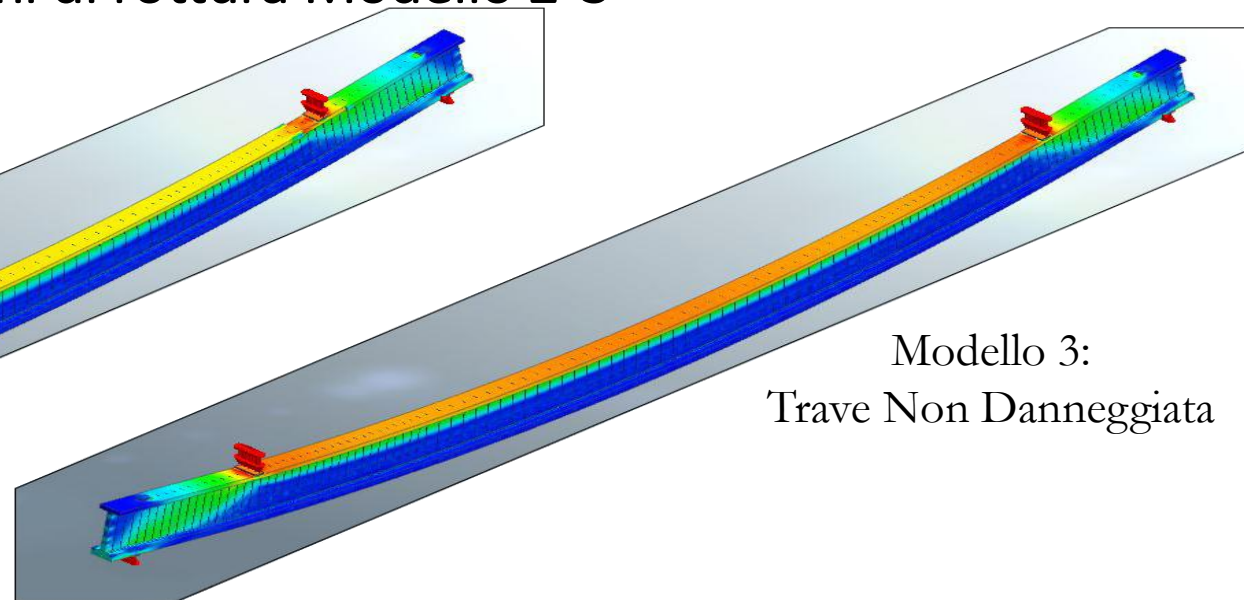
Confronti modelli MIDAS, modelli di capacità e prova sperimentale

Meccanismi di rottura Modello 2-3

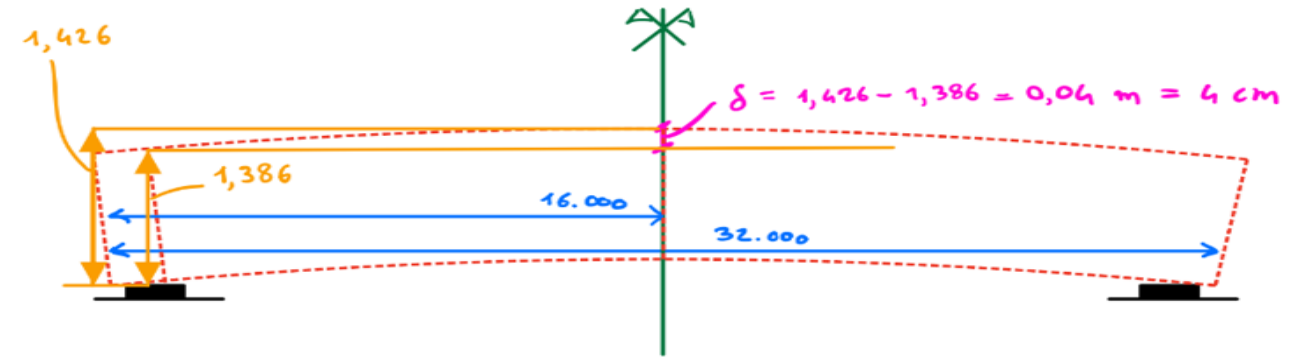
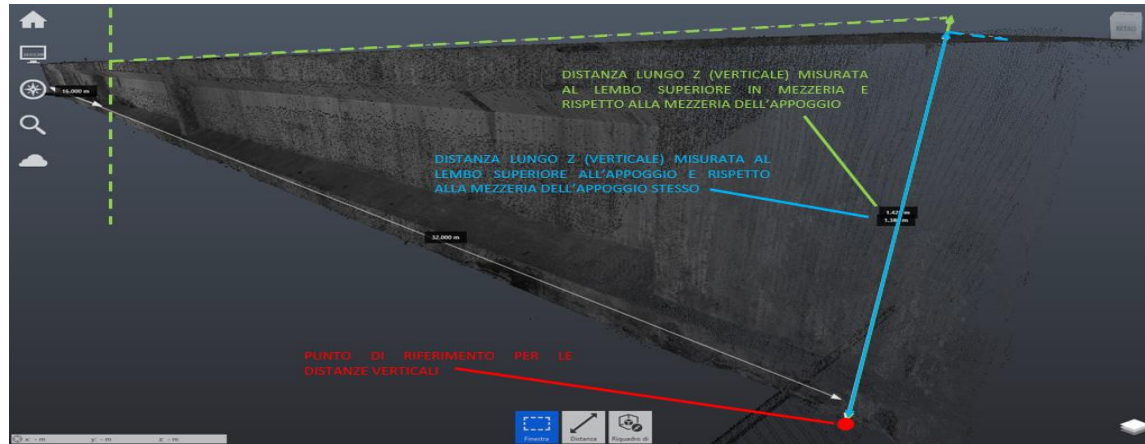
Modello 2:
Trave Danneggiata



Modello 3:
Trave Non Danneggiata

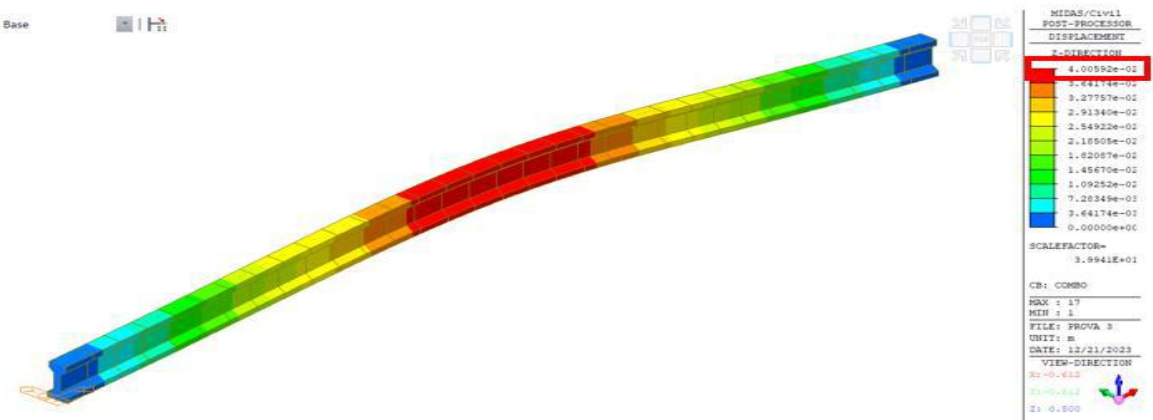
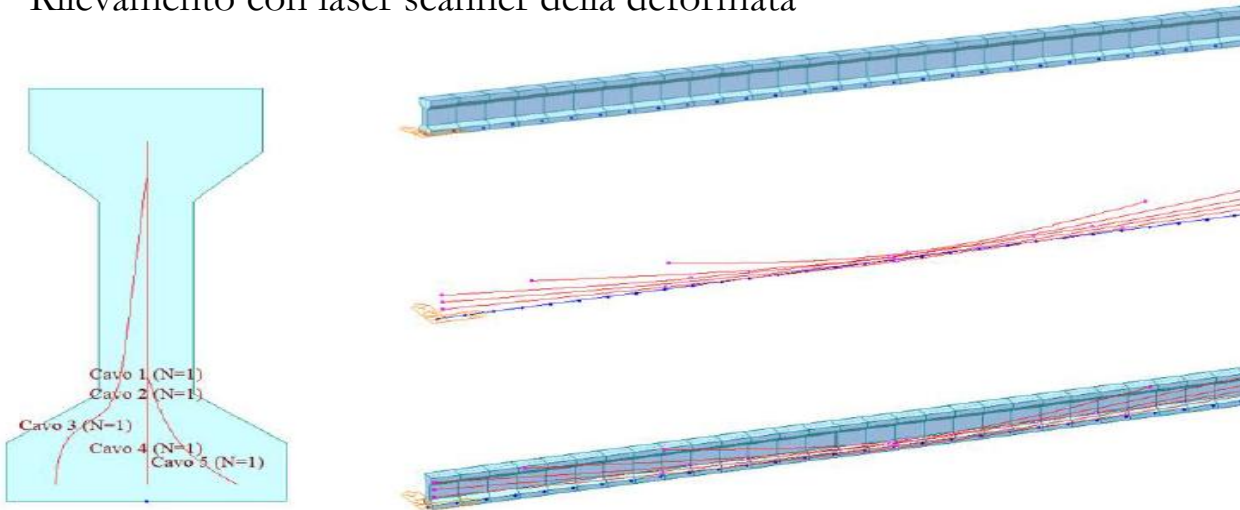


Misura indiretta e stima delle perdite di tiro sui cavi di precompressione



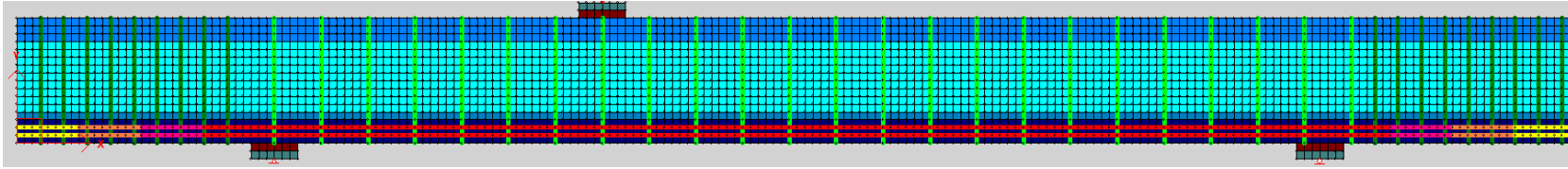
Determinazione della controfreccia

Rilevamento con laser scanner della deformata

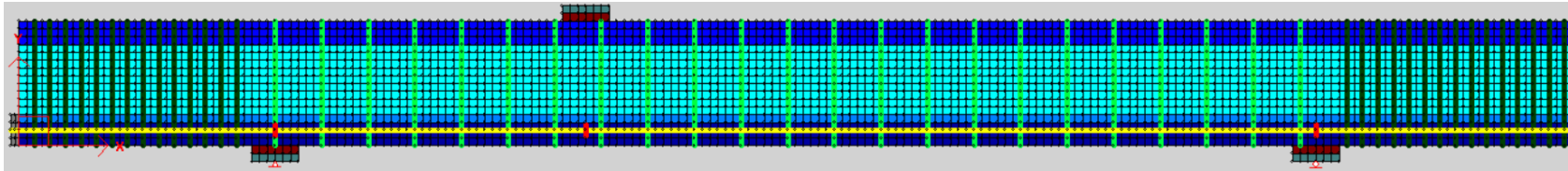


Eseguendo la calibrazione sulla deformata si ottiene una forza di 1641,16 kN applicata a ciascun cavo
Con una riduzione del 17% rispetto alla stima del tiro considerando le perdite (EC2)

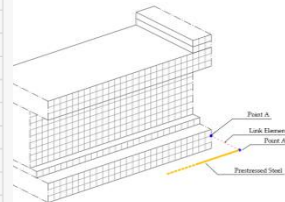
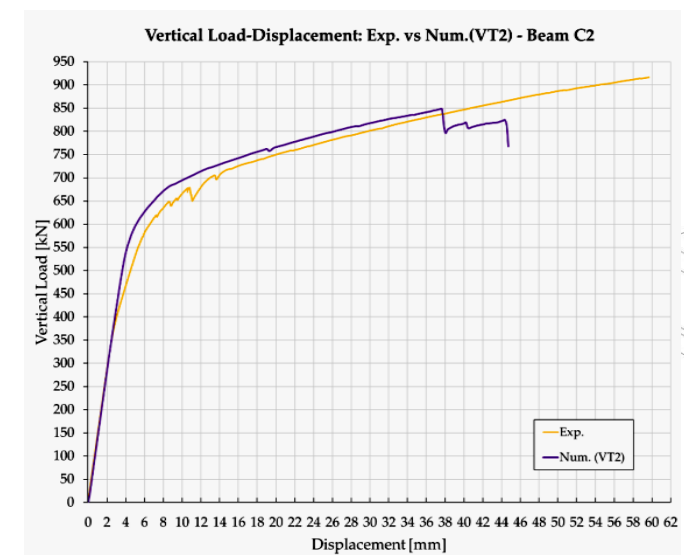
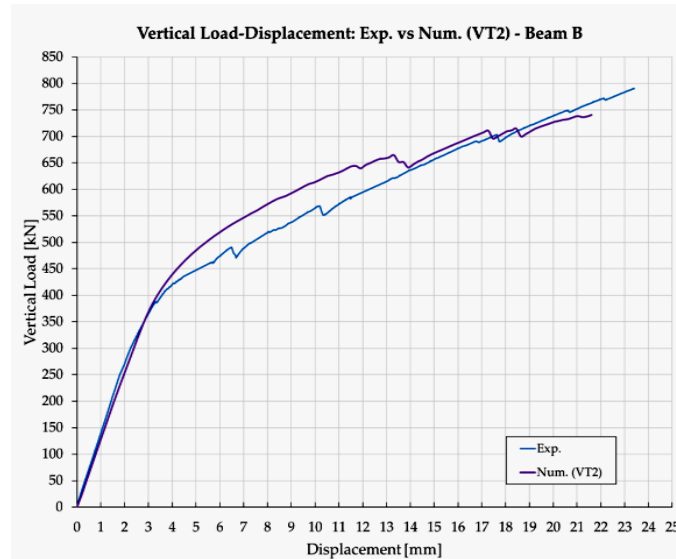
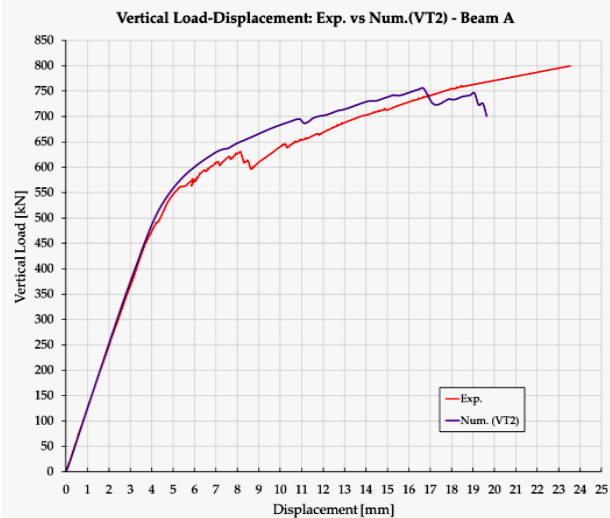
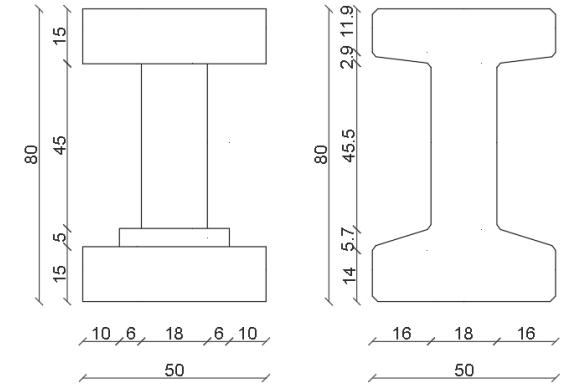
Modello FE Trave Pre-Tesa (Beam A e Beam B)



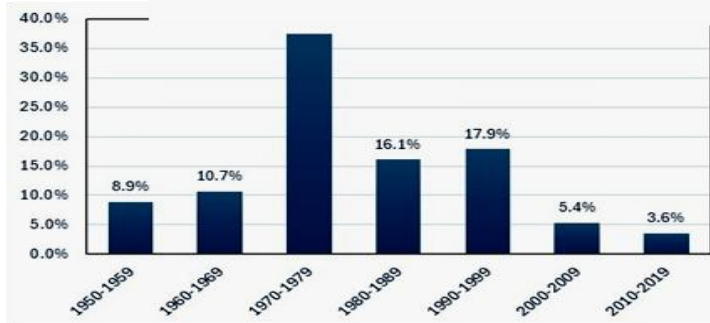
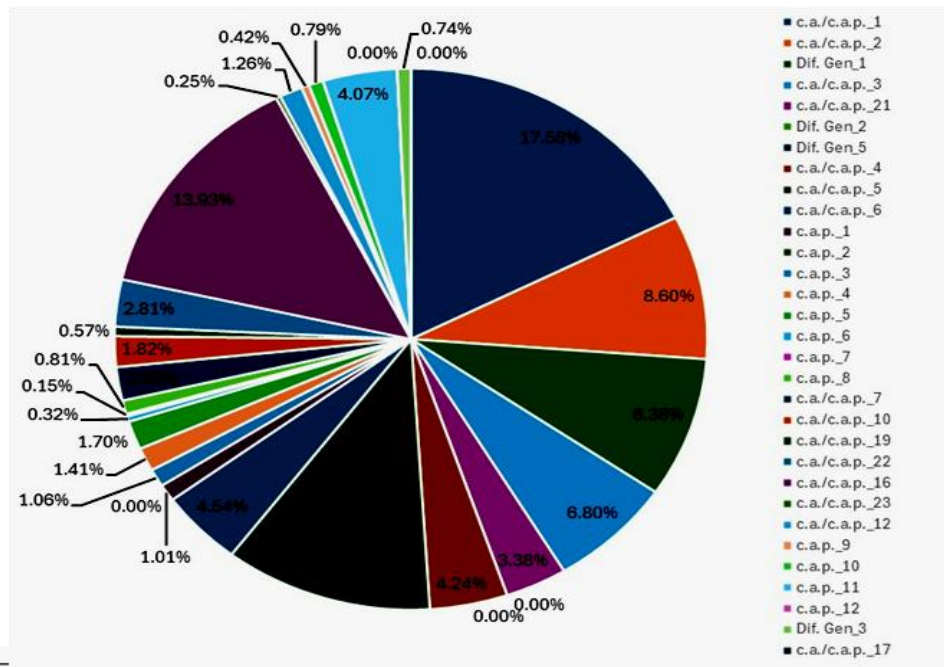
Modello FE Trave Pre-Tesa (Beam C)



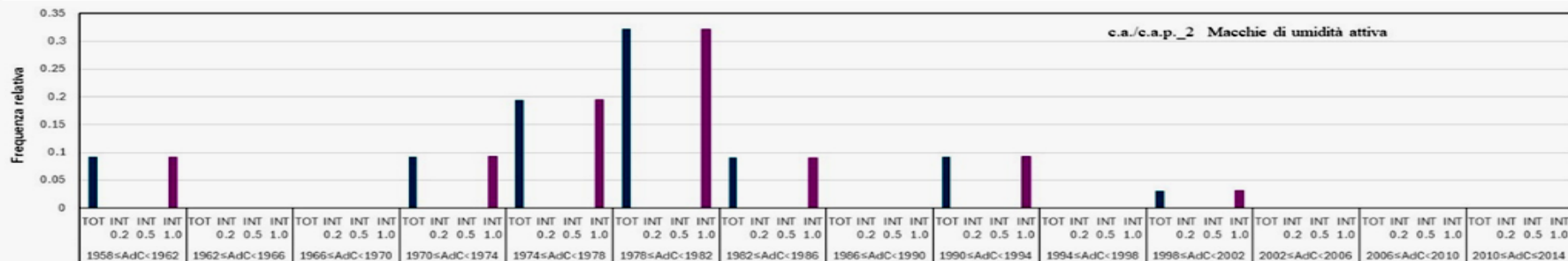
Mesh elementi 5 cm x 5 cm



86 opere



N°	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	Vespai	4.24
c.a./c.a.p._5	2	Distacco del copriferro	11.37
c.a./c.a.p._6	5	Armatura ossidata/corrosiva	4.54
c.a.p._1	1	Lesioni capillari agli ancoraggi	1.01
c.a.p._2	2	Testate di ancoraggio non sigill	0.00
c.a.p._3	1	Distacco tamponi testate	1.06
c.a.p._4	2	Lesioni su anima lungo i cavi	1.41
c.a.p._5	2	Lesioni lungo suola del bulbo	1.70
c.a.p._6	2	Guaine in vista	0.32
c.a.p._7	4	Guaine degradate e fili ossidati	0.15
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.p._9	5	Riduzione armatura di precompr.	0.42
c.a.p._10	2	Umidità dall'interno	0.79
c.a.p._11	2	Arm. Scoperta/ossidata testate	4.07
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	6.2.2 INDAGINI PER LA CARATTERIZZAZIONE	Aggiungere al 6.2.2:
<i>In particolare per la verifica a taglio negli elementi in cemento armato poco armati o non armati, in alternativa alle formule delle NTC, è consentito l'uso della seguente espressione:</i>	<i>Sostituire:</i> <i>In particolare per la verifica a taglio negli elementi in calcestruzzo armato poco armati o non armati, in alternativa alle formule delle NTC, è consentito l'uso delle relazioni del Codice Modello MC2020 - LoA II:</i>	<u>DEI DETTAGLI COSTRUTTIVI E DEI MATERIALI</u>	<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>
$V_{Rd} = \frac{0.3\sqrt{f_{ctk}b_W d}}{\gamma_c (1 + 0.0022d)}$ <i>dove le grandezze sono misurate in MPa e mm ed i simboli hanno lo stesso significato della NTC. Tale formulazione è una semplificazione conservativa delle SIA 262.</i>	$V_{Rd,s} = k_s \frac{\sqrt{f_{ctk}}}{\gamma_c} b_w z_v \quad (f_{ctk} \text{ in MPa}) \quad (30.1-13)$ $k_s = \frac{0.4}{1 + 1'500e_s} \frac{1'300}{1'000 + k_{\Delta s} z_v} \quad (e_s \text{ in mm}) \quad (30.1-16)$	<i>Si sottolinea l'estrema importanza della valutazione di durabilità dei cavi da precompressione nel sistema post-teso, tramite indagine di integrità delle guaine e dello stato di corrosione in sezioni critiche per flessione o taglio e nelle zone di ancoraggio e della valutazione dell'integrità dell'opera nei casi di particolare fragilità strutturale, come, ad esempio, nel caso di appoggi tipo Gerber nei ponti di calcestruzzo armato.</i>	<i>Aggiungere:</i> <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>
<i>Per quanto concerne il taglio nel cemento armato precompresso, si può valutare con la formulazione (4.1.24) delle NTC 2018 dove σ_{cp} è intesa come l'intera tensione media di precompressione nella sezione considerata.</i>	<i>dove le grandezze sono misurate in MPa e mm.</i> <i>Per quanto concerne la verifica della resistenza a taglio nel calcestruzzo armato precompresso, si può valutare con la formulazione (8.42) dell'EC2 2023 o, in modo più raffinato, con la formulazione (30.1-45) del MC2020, LoA IIb. Quest'ultima prevede il contributo del calcestruzzo, oltre a quello delle staffe.</i> $V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,s} \leq V_{Rd,lim} \quad (30.1-45)$	<i>7.4.3.1 Strutture precomprese a cavi post-tesi</i> <i>Le strutture precomprese a cavi post-tesi e iniettati, fra le quali, in particolare, quelle realizzate negli anni '60 e '70, possono essere soggette a pericolose situazioni di degrado che possono comportare corrosione dei cavi di precompressione e che, pertanto, possono influire negativamente sulla resistenza della struttura e provocare collassi improvvisi, anche in assenza di sovraccarico e/o di traffico. Tali situazioni possono essere in prevalenza causate da difetti nelle iniezioni dei cavi che, in presenza di stati di corrosione delle guaine o degli ancoraggi e/o infiltrazioni di acqua, possono costituire zone di innesco della corrosione.</i>	<i>7.4.3.1 Strutture precomprese a cavi post-tesi</i> <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> <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>• <i>il carico di prova può essere rapportato ai valori prescritti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni solo nel caso in cui il calcolo dimostri preliminarmente la capacità della struttura di sopportarlo con adeguato margine di sicurezza..</i>
<i>7.4.3. CASI CHE RICHIEDONO PARTICOLARE ATTENZIONE</i>	<i>7.4.3. CASI CHE RICHIEDONO PARTICOLARE ATTENZIONE</i>		
<i>7.4.3.1. Strutture precomprese a cavi post-tesi</i>	<i>Aggiungere:</i> <i>7.4.3.2 Strutture precomprese a cavi pretesi</i> <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>		
			<i>1.3.3.5 Riduzione delle incertezze di modellazione</i> <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>
			<i>Aggiungere:</i> <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>

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 dello 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