

**Riparazione di viadotti stradali in
precompresso: tecniche di intervento e analisi
costi benefici.**

di Achille Devitofranceschi

1 PREMESSA

La realizzazione della rete stradale e autostradale italiana, avvenuta nella seconda metà del secolo scorso, ha portato alla costruzione di un elevato numero di ponti e viadotti realizzati con impalcati a travata in cemento armato precompresso in semplice appoggio sulle pile. Le travi erano frequentemente postese e realizzate a piè d'opera. Un esempio tipologico di tali manufatti è riportato nella figura seguente.

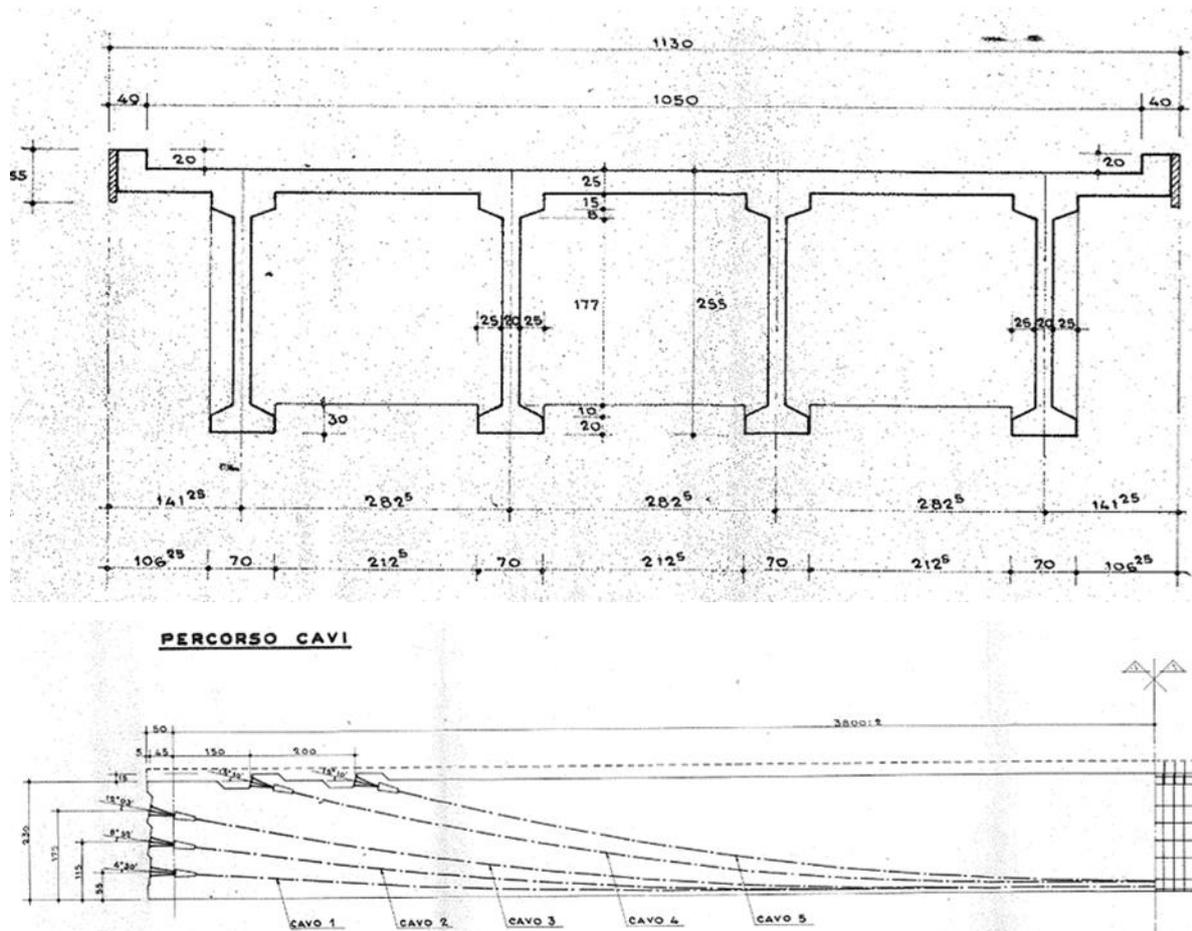


Figura 1: Disegni di archivio

Nel corso degli anni alcune di queste travate hanno palesato difetti, per i quali si è dovuto ricorrere ad interventi di riparazione statica, essenzialmente finalizzati a ricostituire il livello di precompressione perduto a causa della corrosione degli acciai armonici esistenti.

Di seguito vengono presentati i risultati di uno studio, effettuato dallo scrivente e dall'ing. Anna Chiara Salvati, con il quale sono state messe a confronto soluzioni di riparazione tra loro alternative al fine di confrontarne l'efficienza statica ed il costo. Per lo studio in parola è stato scelto un viadotto campione avente la configurazione di cui alla figura precedente.

2 OBIETTIVI

L'obiettivo dello studio proposto è stato quello di progettare diversi sistemi di ripristino e confrontarne poi i risultati ottenuti. L'ipotesi alla base dei calcoli prevede che i cavi di precompressione esistenti non siano aderenti al calcestruzzo (situazione limite, a cui però bisogna fare riferimento laddove si riscontri una cattiva realizzazione dell'intasamento delle guaine esistenti). E' stata quindi svolta un'analisi strutturale considerando dei livelli crescenti di degrado nei cavi esistenti, pensando dapprima i trefoli in buono stato, senza segni di corrosione e che quindi avessero un'area resistente pari al 100%, poi si è ridotta gradualmente l'area resistente fino a individuare la configurazione per la quale la trave raggiungeva il collasso per il solo peso proprio (che corrisponde a valori di corrosione che interessavano all'incirca il 50% della sezione dei cavi). Sono stati pertanto affrontati 4 casi:

- 100% A_p (A_p è la sezione resistente dell'acciaio armonico esistente, così come costruito);
- 80% A_p ;
- 60% A_p ;
- 50% A_p ;

e ad ognuno sono stati applicati dapprima singolarmente dei rinforzi di tipo passivo, costituiti da:

- 4 strati di tessuto unidirezionale in Fibra di Carbonio;
- barre $\varnothing 10$ al Carbonio;
- barre $\varnothing 20$ di acciaio B450C;
- Beton Plaquè.

Per ogni caso di studio sono stati poi applicati singolarmente dei rinforzi di tipo attivo costituiti da:

- Precompressione esterna mediante 2 cavi da 7 trefoli da 150mm²;
- Precompressione esterna mediante 4 cavi da 7 trefoli da 150mm².

Infine sono stati combinati gli effetti; ovvero ad ogni sistema di ripristino passivo è stata aggiunta precompressione esterna.

Per ogni lavorazione è stato redatto il computo metrico estimativo, sulla base dei listini prezzi Anas aggiornati al 2016, valutando il costo della riparazione per metro lineare di trave. Sono stati infine confrontati i risultati ottenuti dalle verifiche a flessione in corrispondenza della sezione di mezzeria, per valutare l'efficienza della singola lavorazione.

3 RINFORZI DI TIPO PASSIVO

3.1 TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI CARBONIO

Questa soluzione prevede di inserire 4 strati di tessuto unidirezionale in Fibra di Carbonio lungo il perimetro del fondello trave; è stato scelto un tessuto ad alto modulo.

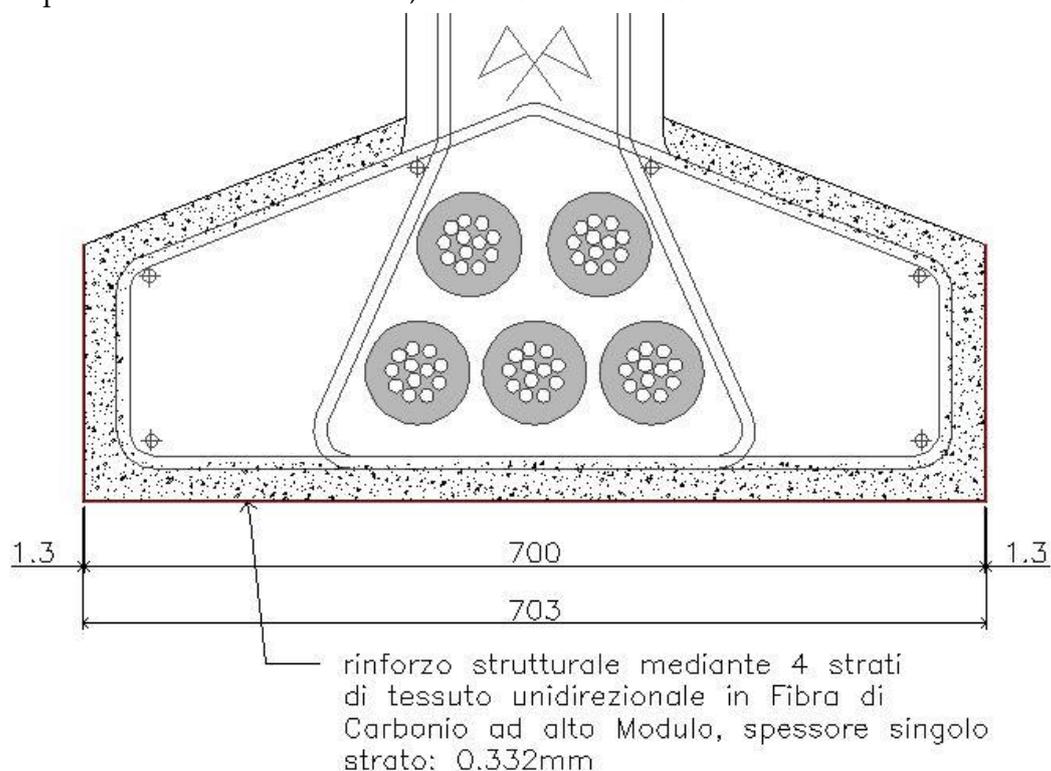


Figura 1 : tipologia di ripristino con tessuto in fibra di carbonio

Per bonificare la superficie di contatto tra il tessuto e la struttura è stato deciso di demolire e ricostruire lo strato superficiale del calcestruzzo, fino a scoprire l'armatura lenta in esso presente, impiegando malta tixotropica di classe R4.

In nessun caso la verifica risulta soddisfatta, infatti per i tessuti in FRP, pur potendo sviluppare una notevole tensione assiale, il comportamento è in realtà fortemente condizionato dalla tensione in corrispondenza della quale si attiva il meccanismo di collasso per delaminazione. Ci si avvicina al coefficiente unitario solo nel caso di 100% A_p .

FRP	$\gamma = C_{\text{capacità}} / D_{\text{domanda}}$
100% A_p	0.90
80% A_p	0.63
60% A_p	0.44
50% A_p	0.39

Questa tecnologia da sola non è in grado di ripristinare la capacità resistente della trave. Il costo di questa lavorazione risulta pari a 1374 €/ml di trave e le voci che incidono maggiormente sul totale sono proprio relative ai tessuti in Fibra di Carbonio.

3.2 BARRE AL CARBONIO

Questa soluzione prevede di inserire all'interno della sezione barre $\phi 10$ al carbonio.

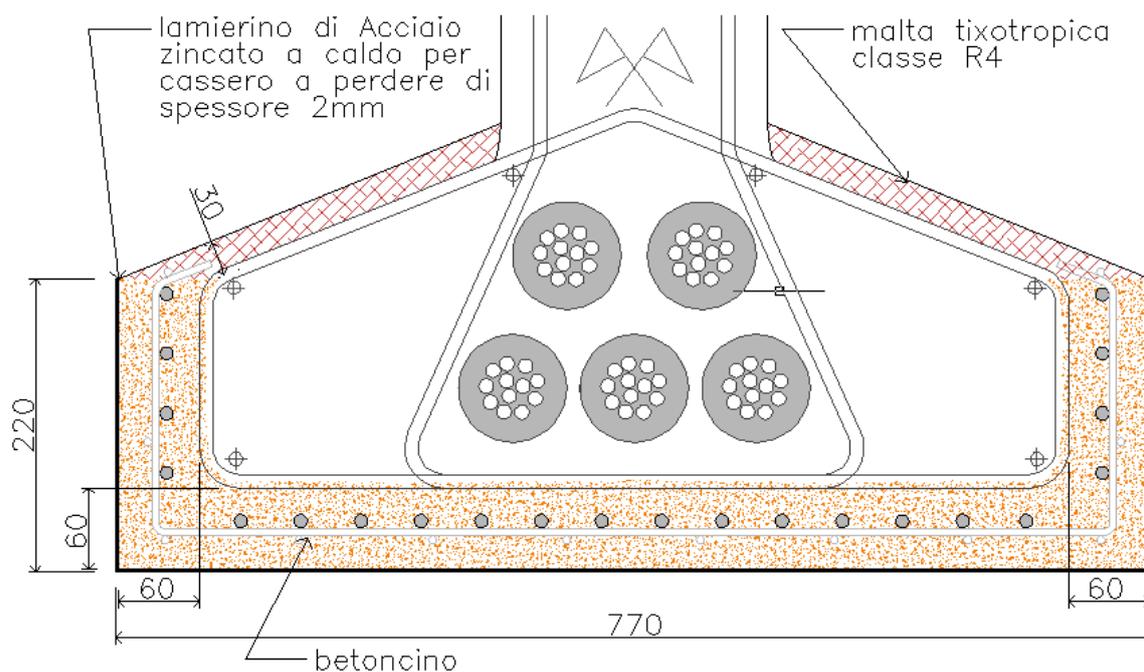


Figura 2 : tipologia di ripristino con 22 barre al carbonio

Sono stati studiati 3 casi, che prevedono l'inserimento di un numero crescente di barre per poter valutare quale fosse la soluzione più efficiente.

È stato necessario prevedere il rifacimento dello strato di copriferro (con allargamento del bulbo inferiore della trave di 6cm per contenere le nuove armature al carbonio) mediante l'uso di betoncino (armato con rete e.s.).

In nessun caso la verifica risulta soddisfatta: anche per le barre al carbonio la delaminazione risulta dimensionante.

10 $\phi 10$	$\gamma = C_{\text{capacità}}/D_{\text{domanda}}$	16 $\phi 10$	$\gamma = C_{\text{capacità}}/D_{\text{domanda}}$	22 $\phi 10$	$\gamma = C_{\text{capacità}}/D_{\text{domanda}}$
100% A_p	0.84	100% A_p	0.81	100% A_p	0.88
80% A_p	0.57	80% A_p	0.52	80% A_p	0.60
60% A_p	0.39	60% A_p	0.38	60% A_p	0.42
50% A_p	0.33	50% A_p	0.34	50% A_p	0.37

Il costo di questa lavorazione risulta pari a 1768€/ml di trave; circa il 70% del totale è legato al costo delle barre al Carbonio.

3.3 BARRE DI ACCIAIO B450C

Questa soluzione prevede di inserire barre $\phi 20$ B450C.

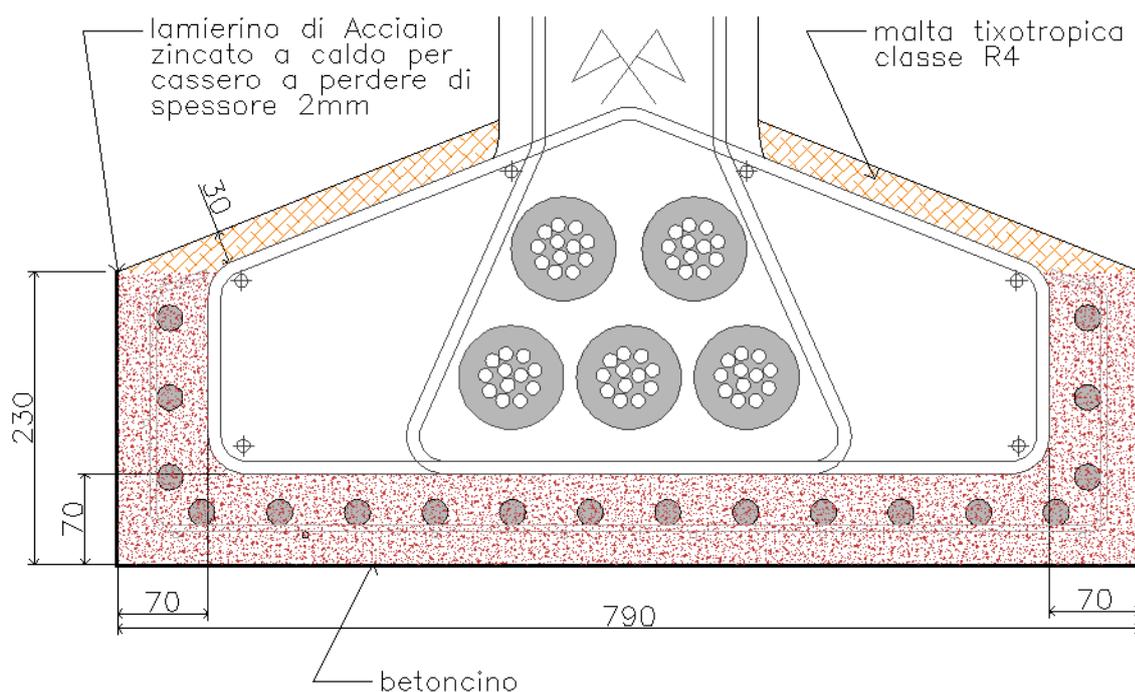


Figura 3 : tipologia di ripristino con barre di acciaio ad aderenza migliorata B450C

Le fasi costruttive sono simili a quelle esposte per le barre al carbonio, l'unica differenza consiste nel maggiore spessore di ricostruzione del copriferro, reso necessario per il maggiore diametro delle barre impiegate.

Anche in questo caso sono stati studiati tre casi, che prevedono un numero di barre crescente, per poter poi considerare la soluzione più efficiente. La verifica risulta soddisfatta solo nel caso di $100\%A_p$, impiegando non meno di 16 barre.

$8 \phi 20$	$\gamma = \text{Capacità}/\text{Domanda}$	$16 \phi 20$	$\gamma = \text{Capacità}/\text{Domanda}$	$18 \phi 20$	$\gamma = \text{Capacità}/\text{Domanda}$
$100\%A_p$	0.96	$100\%A_p$	1.03	$100\%A_p$	1.08
$80\%A_p$	0.67	$80\%A_p$	0.72	$80\%A_p$	0.69
$60\%A_p$	0.47	$60\%A_p$	0.50	$60\%A_p$	0.57
$50\%A_p$	0.40	$50\%A_p$	0.44	$50\%A_p$	0.46

Il costo di questa lavorazione risulta pari a 578€/ml di trave, ovvero è circa pari a un terzo di quello relativo alle barre al carbonio.

3.4 BETON PLAQUÉ

Questa tecnica di rinforzo passivo di elementi strutturali consiste nell'incollaggio di una piastra metallica direttamente alla struttura da rinforzare mediante l'impiego di adesivi e di opportuni fissaggi meccanici che completano il rinforzo. L'esecuzione dei fori di inghisaggio è però una lavorazione molto critica, in quanto si rischia di danneggiare i cavi

da precompressione esistenti, che presentano un tracciato planoaltimetrico che impiega, usualmente, l'intera sezione del bulbo inferiore della trave.

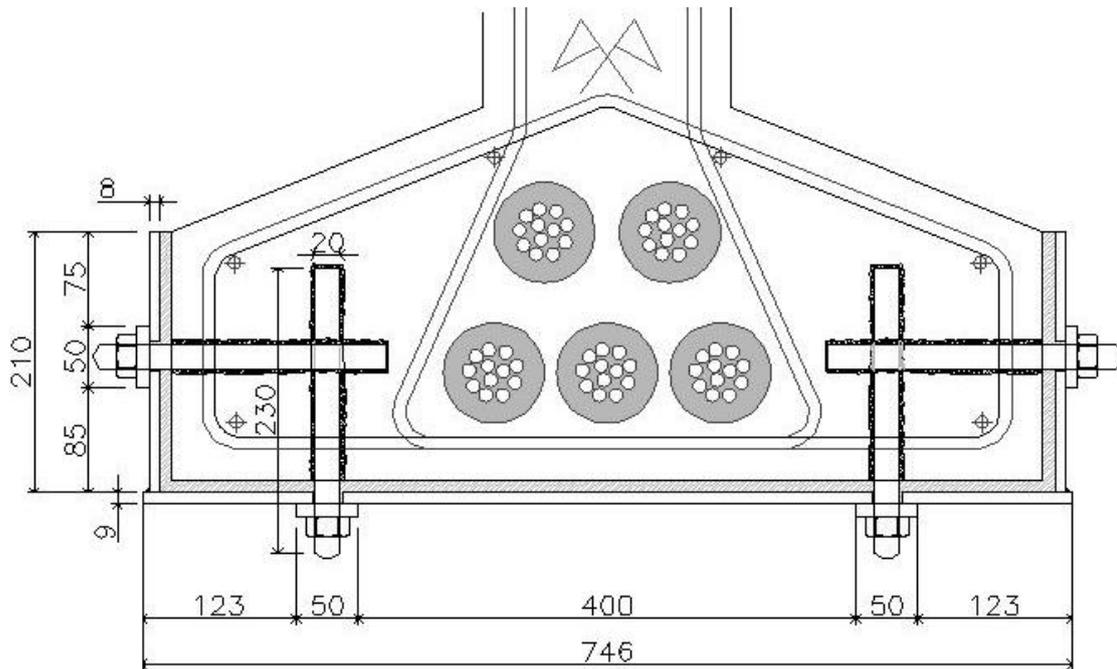


Figura 4 : Tecnologia Beton Plaqué

Tale sistema viene adottato nei casi in cui il peso, la dimensione e la forma dell'armatura metallica consentono l'applicazione della stessa senza particolari problemi esecutivi. Il Beton Plaqué non risente della delaminazione poiché ci si affida prevalentemente ai fissaggi meccanici, che garantiscono il trasferimento degli sforzi tangenziali.

Nel caso in esame sono state impiegate lamiere dello spessore di 8mm e 9mm rispettivamente in corrispondenza delle pareti laterali e del fondello inferiore.

La verifica risulta soddisfatta fino al caso di 80% A_p .

Beton Plaqué	$\gamma = \text{Capacità} / \text{Domanda}$
100% A_p	1.65
80% A_p	1.19
60% A_p	0.90
50% A_p	0.79

Il costo di questa lavorazione risulta pari a 457€/ml di trave, ovvero è circa pari a un terzo di quello relativo ai tessuti al carbonio.

4 RINFORZI DI TIPO ATTIVO

4.1 PRECOMPRESSIONE ESTERNA

La precompressione esterna ha il vantaggio di avere i cavi sempre ispezionabili e, se del caso, ritesati o sostituiti, ha però lo svantaggio di non avere riserve dovuta all'aderenza con il cls della trave (ovvero mostra un meccanismo a rottura di tipo fragile).

Si sono studiati due casi:

- 2 cavi di precompressione a 7 trefoli, $A_{cavo}=150\text{mm}^2$;
- 4 cavi di precompressione a 7 trefoli, $A_{cavo}=150\text{mm}^2$.

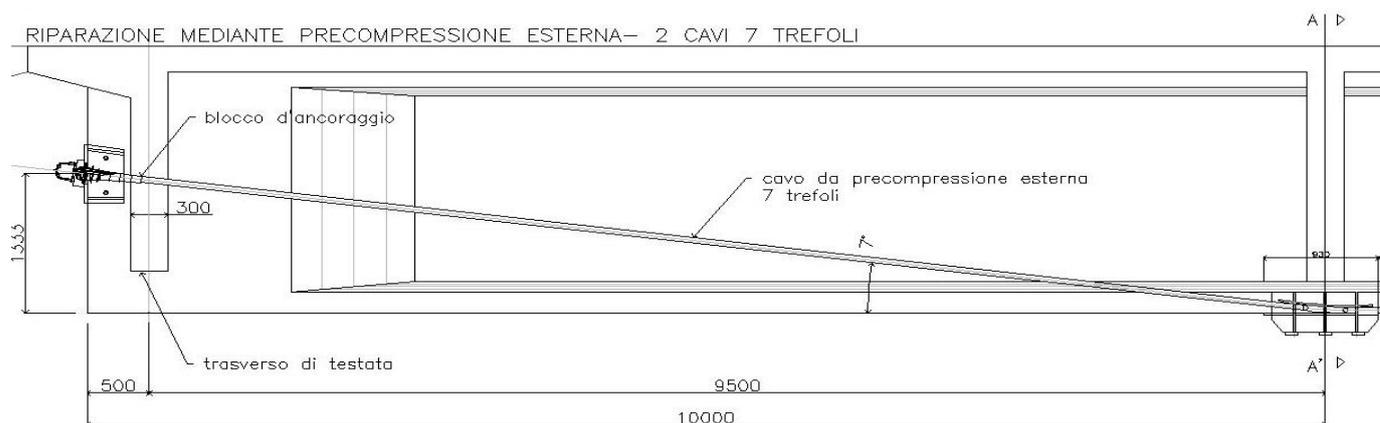


Figura 5: caso di ripristino con 2 cavi da 7 trefoli, sezione $A_p=150\text{mm}^2$

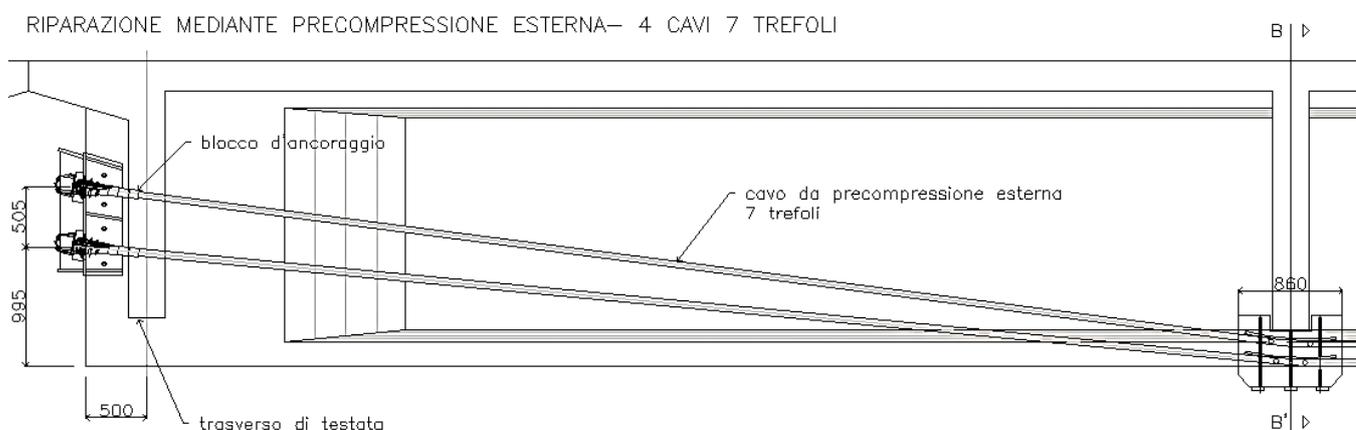


Figura 6 : Caso di ripristino con 4 cavi da 7 trefoli, sezione $A_p=150\text{mm}^2$

2 CAVI	$\gamma = \text{Capacità/Domanda}$	4 CAVI	$\gamma = \text{Capacità/Domanda}$
100% A_p	2.08	100% A_p	non studiato*
80% A_p	1.10	80% A_p	non studiato*
60% A_p	0.67	60% A_p	1.69
50% A_p	0.54	50% A_p	1.24

*non studiato in quanto il livello di precompressione esterna scelto è eccessivo nei confronti della resistenza a compressione del bulbo inferiore e/o a trazione della soletta superiore.

Questa tecnologia consente di ripristinare la capacità resistente della trave considerando ogni livello di degrado nei cavi esistenti, semplicemente scegliendo opportunamente tra l'uso di due o di quattro cavi.

Il costo di questa lavorazione per 2 cavi risulta pari a 526 €/ml di trave; mentre il costo per 4 cavi risulta pari a di 878€/ml di trave.

5 COMBINAZIONE DEGLI EFFETTI: RINFORZI PASSIVI+PRECOMPRESSIONE ESTERNA

Ad ogni sistema di rinforzo passivo è stata aggiunta precompressione esterna, dapprima mediante l'uso di due cavi e qualora la verifica a flessione non fosse soddisfatta, si è passati all'introduzione di quattro cavi.

Si riportano di seguito i risultati.

Nella tabella seguente sono presentati i sistemi di rinforzo passivo affiancati da 2 cavi di precompressione esterna (le celle in bianco rappresentano i casi per i quali il rinforzo passivo da solo è in grado di garantire un rapporto Capacità/Domanda maggiore dell'unità):

FRP+ 2CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	Carbonio+ 2CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	B450C+ 2CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	Beton Plaqué+ 2CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda
100% A_p	2.52	100% A_p	2.27	100% A_p		100% A_p	
80% A_p	1.41	80% A_p	1.26	80% A_p	1.51	80% A_p	2.33
60% A_p	0.91	60% A_p	0.81	60% A_p	0.98	60% A_p	1.57
50% A_p	0.74	50% A_p	0.72	50% A_p	0.78	50% A_p	1.33

Nella tabella seguente sono altresì presentati i sistemi di rinforzo passivo affiancati da 4 cavi di precompressione esterna (le celle in bianco rappresentano i casi per i quali il rinforzo passivo da solo e/o affiancato da 2 cavi di precompressione esterna è in grado di garantire un rapporto Capacità/Domanda maggiore dell'unità):

FRP+ 4CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	Carbonio+ 4CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	B450C+ 4CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda	Beton Plaqué+ 4CAVI	$\gamma = \text{Capacità}/$ Domanda
100% A_p		100% A_p		100% A_p		100% A_p	
80% A_p		80% A_p		80% A_p		80% A_p	
60% A_p	2.04	60% A_p	2.02	60% A_p	2.05	60% A_p	
50% A_p	1.51	50% A_p	1.52	50% A_p	1.69	50% A_p	

6 ANALISI COSTI-BENEFICI

L'analisi Costi-Benefici è stata effettuata calcolando il "Rapporto di Efficienza" tra il coefficiente di sicurezza, inteso come $\gamma = \text{Capacità}/\text{Domanda}$, e il costo a metro lineare di trave della singola lavorazione. In quest'ottica quindi, a parità di costo, **un valore più alto del Rapporto di Efficienza individua una lavorazione più efficiente** poiché ha un coefficiente di sicurezza più elevato. Viceversa, a parità di coefficiente di sicurezza, un valore più alto del Rapporto di Efficienza individua una lavorazione più efficiente poiché ha un costo minore.

Di seguito la tabella riassuntiva dei "Rapporti di efficienza" calcolati:

	RINFORZI PASSIVI				PRECOMPRESSIONE	
	Tessuti carbonio	B450C	Barre carbonio	Beton Plaqué	2 cavi	4 cavi
	γ/costo				γ/costo	
100% A _p	13	19	10	36	40	X
80% A _p	7	14	6	26	21	X
60% A _p	9	14	8	16		19
50% A _p	7	12	6	14		14

	studiati singolarmente
	+2cavi di precompressione esterna da 7 trefoli
	+4cavi di precompressione esterna da 7 trefoli

Dalla tabella di cui sopra emerge chiaramente che gli interventi di riparazione realizzati con elementi metallici sono, almeno da un punto di vista analitico, quelli che presentano una maggiore efficienza. Tra questi spiccano i sistemi di precompressione, seguiti dal Beton Plaqué. A sfavore della precompressione gioca però la circostanza che vede la trave armata con sola precompressione esterna come un sistema sostanzialmente fragile nei confronti della rottura a flessione. Mentre a sfavore del Beton Plaqué gioca la estrema "pericolosità" nell'effettuare le connessioni della carpenteria con il bulbo inferiore dalla trave a mezzo di perforazioni molto prossime ai cavi esistenti; questa tecnica è pertanto ottimale solo laddove sia noto con estrema certezza il tracciato dei cavi esistenti e laddove sia possibile movimentare gli elementi metallici con sollevamenti diretti da piano campagna.

Di contro, le riparazioni con tessuti al carbonio, che comunque non riescono mai a ripristinare da sole le condizioni minime di sicurezza, sono le più semplici da adottare nel caso dei ponti per via della loro leggerezza e semplicità applicativa, caratteristiche che le favoriscono per le lavorazioni in quota.

L'insieme delle suddette considerazioni vede pertanto maggiormente efficace, in linea generale, un sistema di rinforzo basato sul combinato disposto di precompressione esterna e sistemi passivi, prediligendo soluzioni con tessuti al carbonio alle soluzioni con barre B450 solo nel caso in cui non si debba effettuare la demolizione e ricostruzione del copriferro del bulbo inferiore della trave per ragioni di ammaloramento del cls esistente.

FINE