

Post-Tensioned Concrete Bridges: a future oriented construction method due to continuously improved post-tensioning systems

Ponti in c.a.p.: una tipologia costruttiva che guarda al futuro grazie a sistemi di precompressione in continuo miglioramento

Dott.Ing. M. Frumento¹, Dr. Ch. Glaeser²

¹ DYWIDAG SpA, Cusago (Milan), Italy

² DYWIDAG-Systems International GmbH, Munich, Germany

Sommario

With learnings from existing post-tensioned concrete bridges the design rules have been improved. Continuously improved post-tensioning (PT) systems according to harmonized requirements allow highest quality for the products in use. Concepts for fully pre-fabricated products with highest quality assurance standards avoid influences from the climatic conditions and the experience of the individual installation worker. Upcoming considerations on regular inspection and maintenance concepts already during design phase and PT system development allow sustainable structure for the next generation. But even existing structures can be strengthened by appropriate PT systems in order to extend the remaining service life.

Traendo esperienza dai ponti in cemento armato precompresso tuttora in servizio sono state migliorati i criteri progettuali. Sistemi di post-tensione (PT) continuamente perfezionati secondo criteri armonizzati garantiscono la più alta qualità dei prodotti attualmente in uso. La concezione di prodotti totalmente preconfezionati, secondo i più elevati standard qualitativi, evita l'influenza delle condizioni climatiche e la dipendenza dalle capacità dell'operatore di cantiere. Considerazioni innovative per una regolare ispezione, criteri di manutenzione già pensati in fase progettuale e di sviluppo del sistema di post-tensione permettono strutture sostenibili per le generazioni future. Ma anche le strutture esistenti possono essere rinforzate mediante adeguati sistemi PT in modo da prolungare la restante vita di servizio.

1 INTRODUZIONE

La tecnologia del cemento armato precompresso è ben presente nella costruzione di ponti. Come per ogni tecnologia innovativa nella fase pionieristica vennero trascurati dettagli che furono successivamente causa di danni. L'esperienza e lo sviluppo continuo hanno fatto sì che oggi sia possibile costruire opere in c.a.p. durevoli e, contemporaneamente riqualificare e rinforzare quelle esistenti.

2 MIGLIORAMENTO DEI CRITERI DI CALCOLO CON EN 1992-1-1 ED EN 1992-2

Le esperienze maturate in ponti in cemento armato precompresso attualmente in esercizio hanno indotto ad aggiornare la normativa relativa alla progettazione, in modo da rendere le costruzioni in c.a.p. ancora più sicure.

2.1 Armature longitudinali aggiuntive per migliorare il trasferimento degli sforzi degli ancoraggi alla struttura

Molto frequentemente in passato gli impalcati in c.a.p. venivano armati solo con i cavi. Spesso si faceva a meno dell'armatura aggiuntiva in acciaio ordinario, in quanto non prevista dalle norme. Nelle EN 1992-1-1 (CEN 2004) vennero introdotte prescrizioni relative alla percentuale minima di armatura (vedi ad es. il par.9.2.1). Le EN 1992-2 (CEN 2005) richiedono in modo chiaro una robusta armatura aggiuntiva (vedi ad es. il par.5.10.1), per escludere un comportamento fragile. In particolare per l'armatura relativa alla zona degli ancoraggi vengono definite le tensioni ammissibili nell'acciaio oppure richieste verifiche specifiche.

2.2 Incremento dell'armatura trasversale

Vecchi ponti in c.a.p. mostrano spesso considerevoli deficit di armatura trasversale. Mentre l'adeguamento statico di queste opere ai carichi attualmente imposti dal traffico odierno richiede importanti prestazioni, nelle CEN 2004 viene definito un sufficiente livello per l'armatura trasversale minima delle nuove costruzioni.

2.3 Regole costruttive per le giunzioni dei cavi

Nei ponti in c.a.p. costruiti molti anni orsono era ammesso giuntare tutti i cavi nella sezione del giunto di costruzione. Gli accoppiatori allora utilizzati erano molto grandi e causavano un massiccio disturbo al flusso tensionale nell'impalcato. In concomitanza con carichi trascurati (ad es. gradiente termico) non era da escludersi la formazione di fessure in quelle zone, con possibile corrosione nei pressi degli accoppiatori.

Secondo il par.8.10.4 delle EN 1992-1-1 (CEN 2004) è ora prescritto che al massimo 50% dei cavi possano essere giuntati nella stessa sezione. Pertanto almeno 50% dei cavi devono essere continui attraverso il sensibile giunto di costruzione, mentre i restanti possono essere accoppiati. Utilizzando i cosiddetti accoppiatori a sovrapposizione si sono create giunzioni molto più compatte, che impattano molto meno sull'integrità della sezione.

3 ACCORGIMENTI PER EVITARE ERRORI ESECUTIVI

3.1 Zone di ancoraggio senza spirali

Le zone di ancoraggio dei cavi presentano concentrazioni locali di elevate forze che non possono essere dimensionate colle regole della pressione di contatto secondo EN 1992-1-1, par. 6.7 [CEN 2004]. Queste zone vanno verificate mediante prove di carico secondo ETAG 013 [EOTA 2002] in cui, utilizzando realistici interassi e distanze dai bordi e appropriate armature di frettaggio, viene dimostrata la capacità di trasmissione delle forze degli ancoraggi. Valori intermedi possono essere interpolati (ad es. secondo Glaeser 2007). A riguardo si deve notare come per anni molti produttori di sistemi hanno concentrato l'assorbimento delle tensioni di diffusione nelle spirali e minimamente nelle staffe. Lo scopo era quello di tenere la densità delle staffe sotto gli usuali valori minimi, per migliorare la lavorabilità del getto. Tuttavia succedeva non raramente che la spirale, da posizionarsi di regola subito dietro l'ancoraggio, venisse fissata in posizione errata. La figura 1 mostra un errore rilevato e corretto prima del getto in modo da evitare un possibile danno.



Figura 1. Spirali posizionate in modo errato (non direttamente dietro la più esterna superficie portante dell'ancoraggio)
Figure 1. Wrongly positioned helix (not directly below the ultimate load transfer area of the anchorage)

Anche errori nel getto non sono sempre evitabili, pur utilizzando inerti di max.8 mm (vedi Fig. 2).



Figura 2. Rottura nella zona di ancoraggio per insufficiente compattazione del cls.
Figure 2. Failure of the anchorage zone due to bad compaction of the concrete

Per ovviare a questi inconvenienti si è eseguito un programma di prove che, utilizzando ancoraggi ottimizzati e staffatura corretta, ha reso possibile l'eliminazione della spirale di frettaggio. A riguardo è già stata rilasciata un'omologazione europea (vedi OIB 2013).

I cavi con ancoraggi non dotati di spirale di frettaggio necessitano di interassi leggermente aumentati. Tuttavia permettono un consistente risparmio di armatura (Tabella 1).

4 SVILUPPO DI SISTEMI SEMPRE ISPEZIONABILI

Cavi non aderenti, esterni od interni alla struttura, permettono una ispezionabilità continua. Dal momento che in caso di rottura di un filo la forza corrispondente non può essere ripristinata mediante aderenza, la relativa perdita può essere misurata lungo l'intera lunghezza del cavo, oppure è possibile rilevare la fuoriuscita dei fili in corrispondenza degli ancoraggi, aprendo le calotte di protezione.

Se l'esame visivo non è sufficiente, oppure è necessario dedurre informazioni più dettagliate, è possibile utilizzare sistemi magnetoinduttivi (Figura 3).



Figura 3. Sensori magnetoinduttivi per la misura della forza di cavi non aderenti

Figure 3. Magnetoinductive sensors for load measuring of unbonded tendons

I sensori possono essere infilati su singoli trefoli, barre o addirittura sull'intero cavo a fili (vedi ad es. OIB 2015) e misurano la densità del campo magnetico, che è proporzionale alla forza nell'acciaio da c.a.p.

4.1 Cavi esterni (Fili -Ex e barre)

Mentre in alcuni paesi sono ammessi anche cavi esterni con iniezione cementizia, nella maggioranza si sono imposti cavi esterni iniettati con grasso o cera, che permettono di controllare i singoli elementi in trazione. I vantaggi dei cavi esterni interamente prefabbricati, in cui viene meno l'iniezione di grasso in cantiere, sono già stati illustrati al par.3.2.

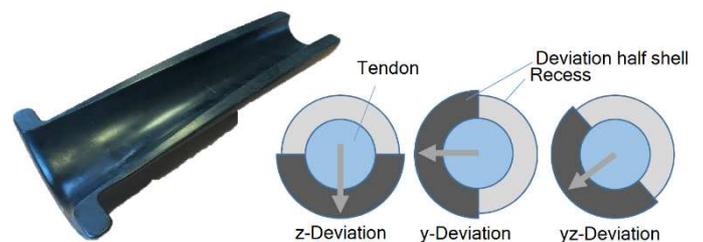


Figura 4. Deviazione di cavi esterni
Figure 4. Longitudinal strengthening with external

No of strands	12	12	12	12	22	22	22	22
Concrete Strength at time of stressing [MPa]	34	34	44	44	34	34	44	44
Helix: H=with Helix/ w/o=without helix	H	w/o	H	w/o	H	w/o	H	w/o
Spacing between anchorages [mm]	350	380	310	340	470	510	410	450
Concrete volume Anchorage-Zone [dm ³]	42,88	54,87	103,8	132,6	29,79	39,30	68,92	91,13
Stirrup diameter [mm]	14	16	14	16	16	20	16	20
No of stirrups	8	8	8	8	8	10	8	9
Steel volume stirrups [dm ³]	1,90	2,47	3,31	6,41	1,70	2,31	2,92	5,32
Helix bar diameter [mm]	14	n/a	14	n/a	16	n/a	16	n/a
No of helix turns	8	n/a	8	n/a	10	n/a	9	n/a
Steel volume helix [dm ³]	1,03	n/a	2,22	n/a	0,99	n/a	1,93	n/a
Steel volume total (helix+ stirrups) [dm ³]	2,93	2,47	5,53	6,41	2,69	2,31	4,85	5,32
Reinforcing grade:	6,8%	4,5%	5,3%	4,8%	9,0%	5,9%	7,0%	5,8%

Tabella 1. Confronto delle armature delle zone di ancoraggio con e senza spirale secondo OIB 2013.

Table 1. Comparison of reinforcement for anchorage zones with and without helix acc. to OIB 2013

3.2 Cavi esterni confezionati in stabilimento complete di protezione

Oltre agli usuali cavi assemblati in cantiere, per cavi successivamente resi aderenti, è possibile l'utilizzo di cavi prefabbricati in stabilimento, in cui l'acciaio da c.a.p. è già inserito nelle guaine e gli ancoraggi fissi montati. In entrambi i casi la protezione con iniezione di boiaccia cementizia viene eseguita in opera.

Nei cavi esterni prodotti in stabilimento (ad es. OIB 2015) sussiste la possibilità di eseguire in fabbrica anche la protezione anticorrosione, evitando così qualsiasi operazione di protezione della lunghezza libera in cantiere. Non sussiste quindi più alcuna dipendenza dai fattori atmosferici. La protezione viene eseguita in stabilimento in condizioni stabili e in regime di controllo di qualità. Iniezioni di grasso o cera in cavi prodotti in cantiere sono possibili, ma non possono raggiungere l'affidabilità dell'esecuzione in stabilimento.

Oltre ad una protezione anticorrosione di elevata qualità, i cavi esterni totalmente assemblati in stabilimento offrono ulteriori vantaggi:

- area di stoccaggio ridotta in quanto spediti arrotolati su bobine
- nessuna operazione di assemblaggio in cantiere
- attrezzature ridotte (ad es. nessuna spingitrefolo necessaria)
- posa più rapida
- nessuna iniezione con pasta anticorrosione calda in cantiere

La deviazione di cavi esterni totalmente prefabbricati (ad es. OIB 2015) può essere realizzata con semicalotte che vengono posizionate nelle sedi cilindriche dei trasversi o delle lesene di deviazione secondo le previste direzioni di curvatura (Figura 4) evitando la formazione di cuspidi.

I cavi esterni sono dotati di protezione dalla corrosione sull'intera lunghezza. Per garantire risultati costanti al più elevato livello qualitativo la protezione viene applicata, se possibile, solo in stabilimento.

4.2 Cavi interni non aderenti (Fili – Interni e barre)

I cavi interni non aderenti sono dotati di protezione anticorrosione paragonabile, quanto ad efficacia e manifattura in stabilimento, ai cavi esterni. Per cui, come per i cavi esterni, è assicurata la non dipendenza da condizioni atmosferiche, inquanto non è necessario iniettare boiaccia cementizia. Per quanto riguarda il percorso dei cavi, è possibile realizzare ogni desiderato tracciato come per i cavi resi successivamente aderenti (vedi Figura 5). E' pertanto possibile sfruttare al massimo il braccio di leva interno.

L'ispezionabilità e ritesabilità dei cavi è generalmente analoga ai cavi esterni. Per ispezionabilità va inteso, diversamente dai cavi esterni, non la possibilità di verifica a vista, bensì la possibilità di misurare la forza nel cavo, ad es. eventuali cadute di tensione tramite la formazione di fessure. Per eventuali ritesature deve essere previsto sufficiente spazio per i martinetti e per le sporgenze delle fruste dei trefoli, oppure la possibilità di avvitare lo stelo di tesatura per i cavi a fili.



Figura 5. Installazione di cavi interni non aderenti prefabbricati
Figure 5. Installation of completely prefabricated external tendons for longitudinal strengthening

Nella costruzione di ponti conviene l'impiego di di cavi compatti di grande potenza con guaine di diametro ridotto per minimizzare l'effetto di riduzione della sezione di cls. compresso dovuto ai cavi nella verifica delle azioni trasversali.

Nei cavi interni a barre non aderenti occorre preservare un condotto libero, che permetta la libertà di

movimento della barra all'interno del cls. Questo si ottiene ad es. infilando la barra, già protetta, all'interno di un tubo in PE che funge da condotto nel cls.

4.3 Cavi con isolamento elettrico

In alcuni paesi europei una elevata e controllata qualità dell'installazione non è ritenuta sufficiente, ma viene richiesta la possibilità di controllare i cavi durante l'intera vita della struttura. Le prime richieste in tal senso vennero avanzate in Svizzera colle ASTRA 2007 che fissano quale livello di protezione sia da scegliere per i cavi, quali principi regolino lo sviluppo di cavi ad isolamento elettrico e come questi vadano installati e controllati.

I cavi possono essere dotati solo di guaine elettricamente non conduttrici e quindi in materiale plastico (vedi ad es. OIB 2013). Tutti gli ancoraggi e relativi raccordi non devono avere alcun contatto elettricamente conduttore colla struttura ed i cavi permettono di eseguire tutte le misurazioni elettriche di verifica (vedi Figura 6).



Figura 6. Cavi aderenti isolati elettricamente
Figure 6. Electric isolated bonded tendons

5 RINFORZO STRUTTURALE PER FRONTEGGIARE L'INCREMENTO DEL TRAFFICO

5.1 Vantaggi dei ponti massicci per successivi rinforzi

In confronto al preponderante peso proprio i carichi dovuti al traffico hanno effetti percentualmente ridotti. Quindi vi sono buone possibilità di poter adeguare la struttura all'aumento del traffico e raggiungere così la desiderata vita utile.

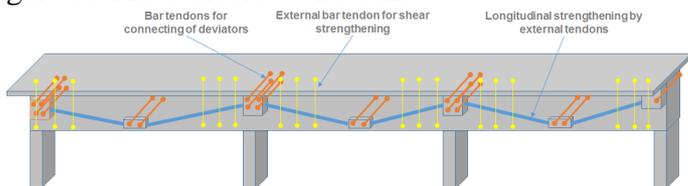


Figura 7. Applicazioni dei sistemi di post-tensione per riparazione e rinforzo di ponti

Figure 7. Applications for Post-Tensioning systems with in repair&strengthening of existing bridges

Con sufficiente capacità del cls. compresso è possibile incrementare la portanza di ponti in c.a.p. utilizzando cavi aggiuntivi esterni. Le mensole deviatrici devono essere connesse alle nervature mediante elementi post-tesi (normalmente barre).

Il rinforzo dell'armatura a taglio può essere realizzato mediante barre verticali.

5.2 Incremento della resistenza a flessione mediante l'aggiunta di cavi longitudinali esterni

Cavi longitudinali esterni di rinforzo possono essere utilizzati sia per impalcati a cassone che a travi. Si possono impiegare sia cavi baricentrici per una forza normale aggiuntiva, sia cavi deviatori per creare momenti in aiuto.

Negli'impalcati a travi conviene posizionare i cavi accostati alle nervature (vedi Figura 8) così da garantire una posizione ombreggiata e non rendere necessario un inguainamento in PE ad elevata resistenza UV. Durante il montaggio dei cavi di rinforzo negli'impalcati a trave si evidenzia chiaramente il vantaggio dell'uso di cavi prefabbricati in stabilimento, inquanto il montaggio risulta veloce con minimo disturbo del traffico sottostante.



Figura 8. Rinforzo longitudinale con cavi esterni
Figure 8. Longitudinal strengthening with external tendons

La Figura 9 illustra il montaggio di cavi esterni nei cassoni. Sono sufficienti limitate aperture nel trasverso di appoggio o nella soletta per poter tirar dentro il cavo prefabbricato. Utilizzando argani posizionati all'interno del cassone o sulla soletta i cavi vengono facilmente tirati in modo controllato.

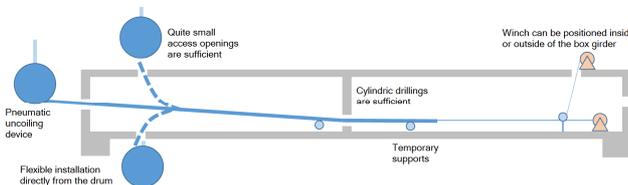


Figura 9. Installazione di cavi totalmente prefabbricati per rinforzo longitudinale

Figure 9. Installation of completely prefabricated external tendons for longitudinal strengthening

5.3 Aumento della capacità portante a taglio con barre addizionali esterne

Molti impalcati presentano scarsa resistenza a taglio in prossimità degli appoggi. In passato queste zone sono state armate in modo insufficiente.

Per questo motivo molti ponti, tuttora in esercizio, presentano fessure in tali zone (vedi a sx. Figura 10).

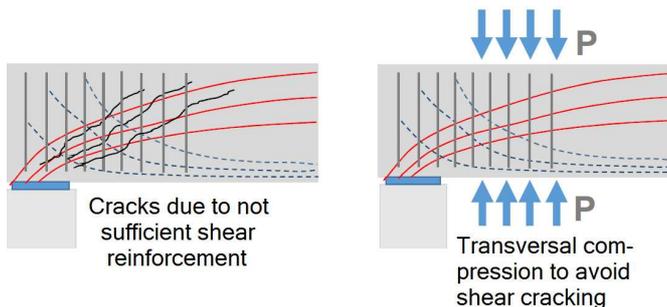


Figura 10. Principio di rinforzo a taglio con barre esterne
Figure 10. Shear reinforcement with external bars

In questo caso si possono utilizzare barre verticali che colla forza di pretesione incrementano la compressione della zona e impediscono la formazione di fessure (vedi a dx. Figura 10).

La Figura 11 mostra un esempio pratico d'installazione di rinforzo a taglio con barre. I tiranti vengono posizionati da entrambi i lati della nervatura ed ancorati inferiormente mediante piastre. Superiormente

attraversano la soletta appositamente forata e vengono su questa ancorati.



Figura 11. Tiranti a barre per il rinforzo a taglio di un ponte con travi a T

Figure 11. Installed bar tendon system for shear strengthening at a T-beam bridge – bottom view

Poichè gli ancoraggi superiori sono posizionati nell'impermeabilizzazione o nella finitura, vanno adottati dadi di contrasto di altezza ridotta. Tuttavia questo accorgimento contrasta colle elevate caratteristiche di resistenza a fatica richieste alle barre da EOTA 2002. Si deve pertanto ritenere che barre direttamente avvitate alle piastre, stanti le normali imperfezioni costruttive, non presentino sufficiente resistenza a fatica. Così vanno usati dadi resistenti a carico dinamico.

6 CONCLUSIONE

Non diversamente da ogni altro componente strutturale anche i sistemi di post-tensione devono essere continuamente migliorati o ridisegnati. Anche in futuro i requisiti richiesti cambieranno e renderanno necessari ulteriori sviluppi. Certamente questi sviluppi concordati tra committenti, progettisti e produttori saranno di aiuto per migliorare la qualità e sostenibilità delle strutture post-tese e ne faranno un componente usuale ed essenziale dell'infrastruttura.

Like all structural members also Post-Tensioning systems have to be permanently improved or redeveloped. Also in future times the requirements will change and will make further developments necessary. For sure these developments aligned between authorities, designers and post-tensioning system suppliers will help to improve the quality and sustainability of post-tensioned structure and will make them to an ongoing essential part of infrastructure structures.

REFERENCES

- ASTRA (Bundesamt für Strassen, Abteilung Straßennetze Standards, Forschung, Sicherheit, CH-3003 Bern), 2007: Maßnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten.
- CEN (European Committee for Standardization). 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- CEN (European Committee for Standardization); 2005. Eurocode 2: Design of concrete structures - Concrete bridges - Design and detailing rules.
- EOTA (European Organization for Technical Approvals), 2002. ETAG 013, Guideline for European technical approval for post-tensioning kits for prestressing structures.
- Glaeser, Ch., 2007. Lastübertragung der Vorspannkraft auf Beton unter Berücksichtigung der Ausbildung der Verankerungskomponenten (load transfer of prestressing loads to the concrete considering the layout of the Anchorage Components). *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität München*.
- OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik), 2013. ETA-13/0815: European Technical Approval for DYWIDAG Bonded Post-Tensioning Kit for Prestressing of Structures with 3 to 55 strands
- OIB (Österreichisches Institut für Bautechnik), 2015. ETA-07/0186: European Technical Assessment for SUSPA-Wire EX - External prestressing system with 30 to 84 prestressing steel wires