



Teoria e Progetto di Ponti

A. Recupero

1

CONTENUTI e INDICE

- LA CLASSIFICAZIONE;
- LE AZIONI
- LA NORMATIVA ITALIANA;
- GLI EFFETTI REOLOGICI;
- L'IMPALCATO A GRATICCIO;
- L'IMPALCATO A CASSONE;
- LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA;
- LA SISMICA

2

LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA

3

LA PRECOMPRESSIONE ESTERNA

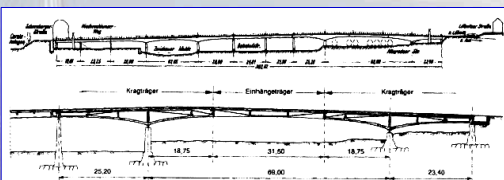
- La tecnologia della precompressione trova nella costruzione dei ponti in calcestruzzo un larghissimo impiego;
- Nell'ambito della precompressione trova un suo particolare uso la tecnologia del cablaggio non congruente con la sezione trasversale (Precompressione esterna);
- Tale tecnologia non è affatto nuova, ma fu la prima ad essere usata proprio per la costruzione di ponti;

4

Sviluppo Storico

1934 il tedesco F. Dischinger registra il brevetto DRP 727.429 che formula i principi di rinforzo mediante cavi di precompressione non aderenti alla sezione di calcestruzzo

Egli applicò queste idee nel 1936, per la costruzione dell'ormai ben noto ponte che attraversa il bacino di valle e la linea ferroviaria ad Aue, in Sassonia



Ponte
sull' Aue

Per le campate principali (25.20 - 69.00 - 23.40 m) furono usati come armature di precompressione, delle barre lisce con una tensione a snervamento di 520 MPa e un diametro di 70 mm.

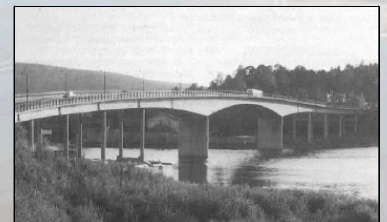
5

Prime applicazioni

1938 Finsterwalder realizza un ponte sull'Autobahn a Rheda-Wiedenbrück. Le armature di precompressione esterna consistevano in barre da 65 mm di diametro con tensione a snervamento di 520 MPa ed erano tesate dal peso della sovrastruttura, usando una cerniera nella mezzera della campata. Le barre vennero più tardi incassate nel calcestruzzo per proteggerle dalla corrosione

Tra il 1938 e il 1943, Haggbohm progettò e costruì il ponte Klockestrand, vicino Stoccolma

La sovrastruttura fu precompressa con un totale di 48 barre da 30 mm di diametro con tensione a snervamento di 520 MPa.



Ponte Klockestrand

6

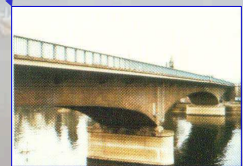
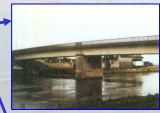
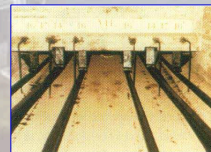
Parziale Abbandono

- Ponti come questi furono in servizio per molto tempo e, dopo più di 60 anni, alcuni di essi lo sono ancora oggi
- Questa tecnica di precompressione fu in parte **abbandonata**:
 - alcuni ponti avevano patito il problema della corrosione dei cavi
 - la protezione al fuoco era stata una seria preoccupazione
 - la scarsa conoscenza del comportamento strutturale aveva creato non pochi problemi ai progettisti
 - fondamentale l'influenza esercitata da Freyssinet e da altri eminenti ingegneri dell'epoca, (enfaticarono i caratteristici vantaggi delle strutture provviste di cavi aderenti)
- Lo stesso Dischinger divenne uno dei maggiori promotori della precompressione **interna aderente**.
- Ma la tecnologia non sparì del tutto e qualche ponte fu ancora realizzato con cablaggio esterno

7

Alcuni esempi

- Negli anni '50, in **Belgio**, Magnel progettò alcuni ponti posizionando fili di precompressione all'esterno delle anime delle travi a cassone.
- In **Venezuela**, Leonhardt progettò e costruì il ponte a spinta sul Rio Caroni.
- In **Francia**, si assistette alla costruzione di quattro ponti a post-tensione esterna:
 - il Vaux-sur-Seine (1950);
 - il Port-à-Binson (1952);
 - il Villeneuve-Saint-Georges (1952);
 - il Can-Bia a Arles-sur-Tech (1953);



8

Adeguamento dell'esistente



Ma la precompressione esterna fu utilizzata anche per l'adeguamento dell'esistente

Ponte River Aare a Aarwangen in Svizzera



ponte sul Wangauer Ache vicino Mondsee in Austria

- L'insufficienza della forza di precompressione venne messa in luce dall'apertura dei giunti di costruzione
- La precompressione longitudinale esistente era aderente, non erano state previste guaine di scorta, si rese necessaria l'aggiunta di cavi esterni al di fuori delle anime
- I cavi furono fissati alle pareti ai tre quarti della campata tramite morsetti, mentre in mezzera, furono previsti altri supporti per annullare le vibrazioni dei cavi.

9

Alcuni crolli

relativi a ponti dotati di precompressione interna resa **aderente**

- 1974 - in Gran Bretagna, il crollo di una passerella pedonale nell'Hampshire (Bickton Meadows Footbridge). (struttura in cemento armato precompresso del tipo a conci prefabbricati, il cui crollo, dopo pochi anni di servizio, con il solo peso proprio avvenne senza alcun preallarme)
- 1985 - in Galles, il crollo dell'Ynys-y-Gwas Bridge, un ponte a conci prefabbricati ad unica campata



20 maggio 2000, uno dei ponti pedonali sulla Lower's Motor Speedway nel Concord, North Carolina, crollò ferendo 107 spettatori che abbandonavano il circuito motoristico



Le indagini successive al crollo evidenziarono evidenti segni di corrosione dei cavi di precompressione delle strutture prefabbricate in una sezione limitata che era stato oggetto di sigillatura con malta. È stato riscontrato che la malta utilizzata conteneva una quantità molto elevata di cloruro di calcio

Un crollo italiano

Ponte di S.Stefano (Messina)



• Il ponte era costituito da quattro campate con luci di m 18,50, poggianti su tre pile e due spalle, per una lunghezza complessiva dell'opera pari a m 78,00

• I cavi utilizzati per ciascuna trave erano di due tipi: 6 erano costituiti da 18 fili ϕ 5 mm e 2 da 12 fili ϕ 5 mm

• L'unica protezione dei cavi nelle strutture post-tese è la malta di iniezione. La presenza di vuoti o zone a riempimento parziale dei condotti è particolarmente pericolosa poiché i cavi sono nascosti



11

La rinascita della Tecnologia

Agli inizi degli anni '80, la rinascita della *precompressione esterna* è frutto di un'evoluzione delle caratteristiche dell'acciaio usato

- la possibilità di impiegare acciaio ad elevata resistenza allo snervamento (oltre i 1390 N/mm² contro 520 N/mm² di un tempo) portò:
 - al superamento dei problemi relativi alle perdite e alle cadute di precompressione nei cavi
 - ad una diminuzione del numero dei cavi necessari, con ovvi benefici riguardanti la facilità di messa in opera
- un impulso alla tecnica di precompressione a cavi esterni viene anche dallo studio riguardo il miglioramento dei sistemi di protezione alla corrosione
- fondamentale fu in questo senso il contributo delle ricerche fatte sia in Francia che negli USA come conseguenza della progettazione di ponti strallati in cui i cavi esterni dovevano essere ben protetti dalla corrosione e la progettazione degli ancoraggi divenne oggetto di particolari attenzioni

12

Ponti moderni a cavi esterni

Nelle moderne realizzazioni di ponti a cavi esterni, diverse sono state le soluzioni adottate nei riguardi della sistemazione del cablaggio, ma sempre riferibili due diverse filosofie:

- precompressione a cavi totalmente non aderenti;
- precompressione a cavi misti.



Esiste una relazione diretta tra il tipo di cablaggio esterno e il metodo costruttivo impiegato:

- la messa in opera di cassoni prefabbricati per intere campate su travature reticolari di posa;
- la costruzione di intere campate preassemblate su una trave d'assemblaggio e sollevate successivamente tramite un carro di varo autolanciante;
- la costruzione di intere campate spinte successivamente sulle pile seguenti;
- la costruzione ad avanzamento con conci prefabbricati sostenuti per mezzo di cavi interni e/o esterni;
- la costruzione ad avanzamento con conci prefabbricati sostenuti per mezzo di stralli provvisori;

13

Ponti moderni a cavi esterni

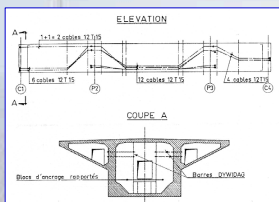
La tecnologia della precompressione esterna si è evoluta attraverso applicazioni che si estendono da semplici ponti a travata, a strutture innovative in cui le anime di calcestruzzo sono state sostituite da lastre d'acciaio riducendo il peso proprio della struttura:

Una prima famiglia di ponti a cavi totalmente esterni, è senz'altro quella in cui i cavi corrono lungo l'intera campata. Nella maggior parte di queste opere si è fatto ricorso alla prefabbricazione di intere campate, anche se non mancano realizzazioni di opere gettate in situ a mezzo di casseformi;

Senza dubbio il principio generale di cablaggio corrente, travata per travata, permette di arrivare a forme estremamente semplici del lay-out dei cavi, ma la necessità di riprendere provvisoriamente il peso proprio dell'intera campata, prima della messa in opera della precompressione, limita il dominio di impiego di questa tecnica.

14

Alcuni esempi di realizzazione



Ponte sulla Marne (1975)

•La costruzione del ponte sul La Marne della linea Marne - la - Vallée del RER, servi da banco di prova.

•Le perdite di precompressione per attrito erano fino ad allora spesso largamente sottostimate nei calcoli e pertanto erano state previste delle guaine vuote in cui alloggiare eventuali cavi supplementari (20 % in più)

•Non fu sufficiente e per ovviare alle perdite, si mise in opera una **precompressione supplementare esterna**

Si utilizzarono 6 cavi da 12 trefoli di 15 mm di diametro per anima, esterni al calcestruzzo e deviati in corrispondenza delle pile e dei deviatori aggiunti ed, infine, ancorati su dei blocchi ricavati alle estremità

15

Alcuni esempi di realizzazione

L'ingegnere francese J. Muller costruì alcuni ponti in Florida, con conci prefabbricati e precompressi per mezzo di soli cavi esterni.

Viadotto Long Key, 1980 (Florida)



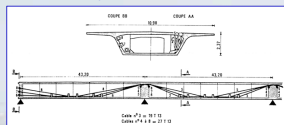
Per montare questo viadotto, provvisoriamente i conci venivano poggiati su una struttura reticolare che poggiava sulle pile

Ogni viadotto elementare è costituito da otto campate

I conci delle campate sono assemblati tramite cavi esterni (27 trefoli di 15 mm) quattro per le campate intermedie e sei per le campate esterne

16

Alcuni esempi di realizzazione

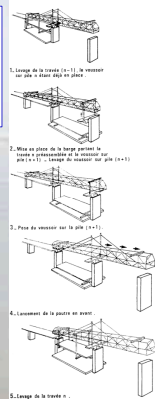


Viadotto Seven Mile 1980 (Florida)

Per montare questo viadotto i conci venivano avvicinati su un supporto in acciaio poggiato su una chiatte

Giunti sotto le pile, un carro di sollevamento le sollevava fino al concio di testa pila

I conci delle campate sono assemblati tramite sei cavi esterni (4 di 27 tref. di 15 mm e due di 19 tref. di 15 mm)



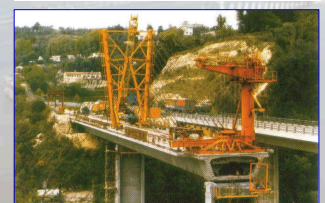
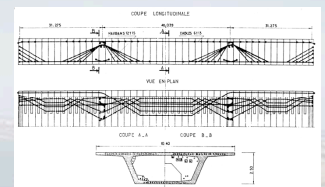
Alcuni esempi di realizzazione

Nella realizzazione dei doppi viadotti del Vallon-des-Fleurs e della Banquière si propose un'alternativa alla realizzazione per campate proponendo l'utilizzo di stralli provvisori

Come per i ponti di Key in Florida, la precompressione è esterna al calcestruzzo ad eccezione di alcuni cavi di piccola portata (6 T 13) messi in opera per equilibrare gli sforzi durante la costruzione e lasciati in posizione anche dopo il completamento

I cavi esterni, da 12 T 15 sono di piccola portata e sono ancorati sulle pile e deviati nelle nervature verticali esistenti in ogni concio

I cavi sono posizionati all'interno di tubi in polietilene ad alta densità e riempiti con l'impiego di grasso iniettato ad una temperatura tra i 50 e i 60 °C.



Viadotto Vallon des Fleurs 18

Alcuni esempi di realizzazione

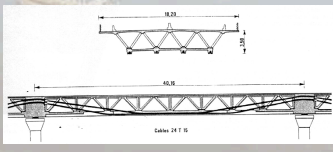
Come per i ponti di Key in Florida, anche questo è costruito per campate intere. La messa in opera non avviene su una travatura reticolare oppure per assemblaggio dei conci e sollevamento tramite piattaforma auto-lanciate; i conci, infatti, sono sospesi ad una immensa trave di posa portante una gru di 20000 t.

Le anime sono sostituite da una struttura spaziale triangolare (P. Richard) L'ordito inferiore è costituito da quattro nervature principali, legate da piastre sottili.

Nelle travate correnti, il cablaggio è composto da due cavi da 27 T 15 mm per nervatura, mentre nella grande campata centrale, ne sono stati impiegati tre per nervatura.

Come per il caso dei ponti di Key in Florida, la sostituzione dei cavi non è stata prevista ed è praticamente impossibile.

Viadotto Bubiyan



Alcuni esempi di realizzazione

Il viadotto Bois de Rosset vicino Faoug in Svizzera è costituito da due strutture parallele, ognuna di 15 campate per una lunghezza totale di 617,25 m, con una larghezza di impalcato di 13 m.

La sovrastruttura è formata da una trave d'acciaio connessa ad una piastra in calcestruzzo post-tesa trasversalmente.

La struttura è precompressa longitudinalmente mediante cavi esterni in ogni campata. Si è fatto ricorso a cavi costituiti da 12 monotrefoli singolarmente protetti da grasso e guaine e inseriti complessivamente all'interno di un tubo in polietilene.

Per lo sviluppo di questo sistema di cavi sono stati condotti numerosi test nei riguardi dei materiali impiegati, del progetto degli ancoraggi e delle perdite per attrito nel passaggio sulle selle di deviazione

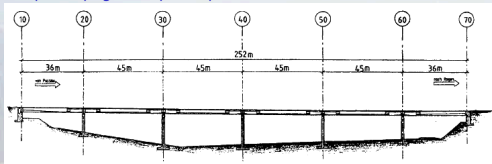


Viadotto Bois de Rosset

20

Alcuni esempi di realizzazione

Nel 1994 il ponte Ruderting, nel percorso tra Passau e Cham, in Bavaria, fu uno dei progetti pilota in cui si utilizzò la precompressione esterna. Il ponte oltrepassa la valle di Haselachtal. Il percorso rettilineo e la leggera curvatura della pendenza hanno offerto ottimi requisiti per l'impiego della precompressione esterna.



Il cassone del ponte ha un'altezza di 2,60 m ed è precompresso con l'aiuto di cavi dritti; circa 2/3 dei cavi sono eccentrici e corrono nella parte inferiore in campata e in quella superiore vicino le pile.



21

Alcuni esempi di realizzazione

Il ponte Trockau è composto da due cassoni monodirezionali con una lunghezza totale pari a 602 m; le campate variano da 48 a 100 m mentre per le altezze si passa dai 3,5 ai 6,5 m.

Questo ponte è considerato dai progettisti un esempio estremo d'impiego della precompressione totalmente esterna

Le estese campate richiedono infatti l'utilizzo di numerosi cavi, creando problemi di congestione nella zona di trasmissione

La necessità di ancorare esternamente e di trasmettere la forza indotta da 36 cavi, anche se non impossibile, induce uno sfruttamento limite dello spazio disponibile

I ponti progettati con una precompressione totalmente esterna richiedono generalmente sezioni più alte rispetto a quelle conseguenti all'utilizzo di una precompressione totalmente interna oppure mista.



Interno del ponte Trockau

22

Alcune considerazioni

Nel caso di campate medio-lunghe, la precompressione mista sembrerebbe la soluzione economicamente più vantaggiosa

Infatti, luci del genere, per essere messe in opera, richiedono strutture provvisorie di un certo impegno in grado di sorreggere il peso proprio in fase di costruzione

Il ricorso a cavi interni rettilinei nella soletta e nella controsoletta, insieme ai cavi esterni di continuità, produce un decongestionamento della zona di trasmissione e una diminuzione rilevante del numero di ancoraggi

Il principio potrebbe essere quello di mettere in opera una precompressione interna capace di riprendere soltanto gli sforzi di costruzione utilizzando un tracciato dei cavi rettilineo che non scenda lungo le anime del cassone

Una volta completata l'opera, si ricorre ad una precompressione esterna, corrente lungo ciascuna campata, che conduce ad una grande semplicità del layout finale dei cavi.

23

Altri esempi

In Francia nella realizzazione del ponte della Flèche fu utilizzato un cablaggio misto

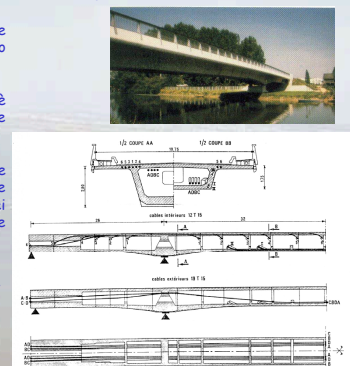
La lunghezza della campata centrale è di 64 m, mentre quella delle due campate laterali è di 26 m

Al fine di pareggiare le diverse masse conseguenti, le estremità delle due campate laterali presentano dei riempimenti in calcestruzzo che fungono da contrappesi.

Per problemi idraulici, l'altezza del cassone monodirezionale della struttura è stato limitato a 2,80 m, sulle pile, e a 1,75 m, in mezzzeria. La sovrastruttura ha una larghezza di 10,75 m.



Particolare cavi esterni



24

Altri esempi (Ponte della Flèche)

Ciascuna metà della sovrastruttura è stata costruita parallelamente alla riva, mediante l'impiego di casseforme lunghe 9 m autovarianti, procedendo in avanti secondo la singola mensola.

Dopo il completamento, ognuna delle due metà è stata ruotata per raggiungere l'allineamento finale.

Il sistema di precompressione utilizzato, è composto da due famiglie di cavi. Nella costruzione della mensola sono stati utilizzati dei cavi interni, ancorandone due sulla faccia d'estremità di ogni concio.

Un'altra serie di cavi interni è stata posizionata nella controsoletta.

L'insieme dei cavi esterni, invece, filanti lungo tutta la campata, sono ancorati all'estremità delle due campate laterali.



I cavi esterni sono inseriti all'interno di tubi d'acciaio e iniettati con grasso per garantirne l'eventuale sostituzione. La deviazione dei cavi esterni, per mezzo dei diaframmi sulle pile e delle travi trasversali previste sulla controsoletta, avviene grazie ad un tubo d'acciaio curvo preformato, connesso ai tubi di protezione dei cavi tramite dei manicotti d'acciaio saldati ad entrambi.

25

Altri esempi

Tratto della Second Stage Expressway System



• Il progetto del Second Stage Expressway System a Bangkok, con i quasi 1.000.000 mq di impalcato e con approssimativamente 15.000 t di cavi da precompressione esterna, rappresenta una delle più grandi applicazioni di cavi esterni nel mondo.

• L'enorme progetto richiedeva la costruzione di oltre 60 km di impalcato e in fase di progettazione venne scelta la soluzione di costruzione a conci a cassone prefabbricati.

• Per semplificare e velocizzare la fase di messa in opera, venne scelta la soluzione a giunti a secco insieme all'uso della precompressione esterna che avrebbe prodotto vantaggi sia di prefabbricazione che di manutenzione a lungo termine.

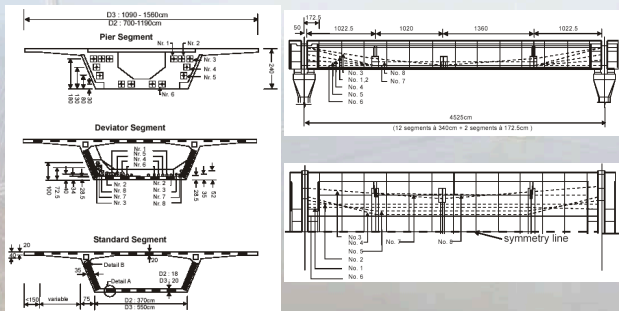
• Questo ha permesso di mettere in opera fino a 4 campate alla settimana; le diverse velocità sono dipese dall'impiego di due differenti metodi costruttivi quali il procedimento ad avanzamento per conci sollevati tramite travatura sovrastante e l'assemblaggio dei conci su travatura sottostante.

26

Altri esempi

(Tratto della Second Stage Expressway System)

Schemi e cablaggio



27

Altri esempi (Ponte sul torrente "Vecchio", 1991, Corsica)

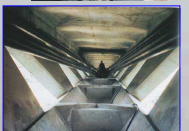
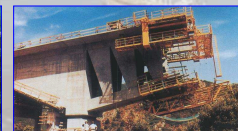
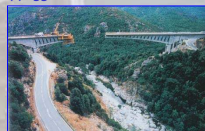
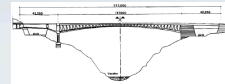
La struttura realizzata è composta da tre campate: quella centrale di 137,5 m, che viene gettata in opera procedendo a sbalzo dalle pile, e due laterali entrambe di 42,25 m.

La presenza nella travata centrale di anime inclinate traforate, di forma trapezoidale e di spessore costante uguale a 0,4 m, che si incastrano nelle nervature longitudinali delle solette.

Cablaggio longitudinale è misto in parte esterno ed in parte interno.

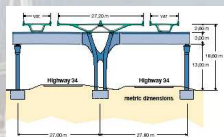
La precompressione verticale interna è realizzata con barre, di diametro variabile in funzione degli sforzi di taglio presenti nei pannelli d'anima prefabbricati.

L'inclinazione delle anime varia da circa 51° in chiave a 80° sugli appoggi.

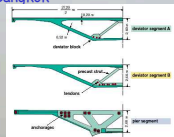


Altri esempi

Vista della Bang Na Expressway



Un'altra opera che nel 2000 ha stabilito il record di viadotto più lungo al mondo, è la Bang Na Expressway a Bangkok.

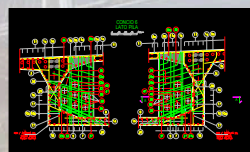
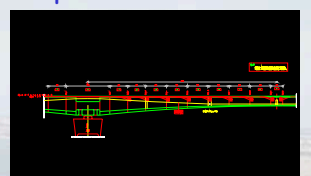


Le campate sono precomprese longitudinalmente tramite 22 cavi di cui 20 esterni e due interni; la precompressione trasversale è stata eseguita sia con dei cavi nella soletta d'impalcato che con cavi passanti nelle anime e nella controsoletta.

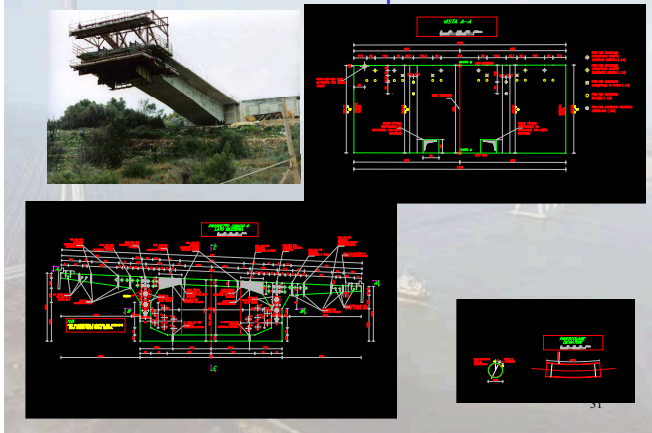
29

Altri esempi

Viadotto Cassibile (2005)



Altri esempi Viadotto Cassibile (2005)



Confronto tra le tipologie di precompressione



• Si estende alle strutture civili la stessa logica costruttiva propria delle costruzioni meccaniche, in cui le parti più delicate o più soggette ad usura, sono progettate sin dall'inizio in modo da poter essere facilmente sostituite o riparate

• È noto che nel caso di una struttura da ponte, queste parti sono rappresentate dagli appoggi, dai giunti e dai cavi di precompressione. Fino ad oggi solo la sostituzione dei primi due elementi era possibile

• La sostituibilità dei cavi allunga la vita media del manufatto che, nell'ambito di una manutenzione programmata, può essere di volta in volta "ringiovanito" almeno nelle sue parti più deperibili con un sostanziale allungamento della vita media e con gli ovvi benefici economici che ne derivano in termini di costo globale, cioè di costruzione e di manutenzione.

32

Confronto tra le tipologie di precompressione

• I cavi di precompressione all'esterno delle nervature facilitano senza dubbio l'esecuzione del guscio di calcestruzzo.

• Questo risulta in tutto e per tutto assimilabile ad una normale struttura in calcestruzzo armato ordinario, tra l'altro, con un livello di armatura in acciaio lenta decisamente inferiore a tale tipologia di struttura, essendo presenti le staffe e l'armatura longitudinale di distribuzione

• Naturalmente questo fatto si traduce in un notevole risparmio sotto il profilo economico, in conseguenza dei più ridotti tempi esecutivi: non è necessario infatti predisporre all'interno della struttura in calcestruzzo tutte le guaine in lamierino metallico della precompressione tradizionale che, per strutture come i ponti, è un'operazione lunga e delicata

• Il getto della struttura risulta di molto semplificato e la vibrazione può essere eseguita senza il rischio, sempre presente nelle strutture a cavi interni, di danneggiare le guaine in lamierino. E' inoltre possibile rispettare al meglio quelle prescrizioni costruttive e tecnologiche (ricoprimenti, copriferri, sovrapposizioni, ecc.) che concorrono a rendere il guscio di calcestruzzo, che rappresenta l'anima della struttura, più durabile e affidabile nel tempo.

33

Confronto tra le tipologie di precompressione

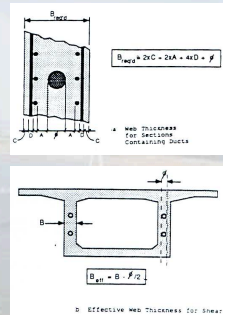
• Consente la riduzione degli spessori della struttura, specie in parti come le anime dei cassoni

• Il dimensionamento di queste ultime è più condizionato da ragioni tecnologiche e di spazio che da obiettive esigenze statiche; le dimensioni sono spesso esuberanti, grazie al notevole contributo al taglio assicurato dalla componente verticale della precompressione

• Due sono le condizioni che determinano lo spessore delle anime dei cassoni a cavi interni: le condizioni di betonaggio e quelle di ancoraggio dei cavi di precompressione nelle anime in corrispondenza di giunti fra conci successivi

• Le condizioni di betonaggio sono meno vincolanti, ma anche lasciando uno spazio di 10 cm da una parte e dall'altra del cavo, occorre comunque un minimo di 36 cm con una guaina da 8 cm di diametro e un copriferro normale di 2 cm

• E' la seconda condizione che è generalmente determinante e che fissa lo spessore delle anime a 45 cm circa con dei cavi 12 T 15, e a 36 cm circa con dei cavi da 12 T 13.



34

Confronto tra le tipologie di precompressione

• Per uno sforzo tagliante dato, lo spessore d'anima, nel caso della precompressione esterna, necessario è ridotto in quanto non bisogna più decurtare dallo spessore totale dell'anima il diametro di eventuali cavi di precompressione interna disposti in essa

• E' possibile utilizzare cavi di grossa portata con un gran numero di trefoli, che nel caso della precompressione a cavi interni diventa proibitiva per le dimensioni delle guaine

• La mancanza di attrito in linea e la possibilità di riduzione dell'attrito in curva (ricordando che le perdite d'attrito sono concentrate solo nei punti di deviazione dei cavi)

• Si segue visivamente l'andamento del fascio di cavi, e si possono aumentarne il numero in modo considerevole senza le controindicazioni tipiche del ricorso ai cavi interni (incroci non voluti, aumento degli attriti per deviazioni non previste, ecc.).

• Con un opportuno studio del lay-out dei cavi è possibile ottenere andamenti con deviazioni limitate a pochi punti, sfruttando appieno le caratteristiche dell'acciaio armonico

35

Protezione delle armature

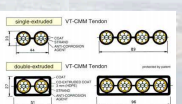
• Sul piano tecnologico, due sono le famiglie di soluzioni adottabili nel problema dell'iniezione dei cavi:

- con malta tradizionale a base di boiacca additivata di cemento
- con prodotti speciali quali cere, grassi o resine

• L'iniezione può effettuarsi sia all'interno di guaine in polietilene ad alta densità che in tubi d'acciaio all'interno dei quali sono disposti i trefoli nudi.

• In alternativa, può farsi ricorso a cavi che sfruttano la tecnica ormai consolidata del trefolo "unbonded": ognuno dei trefoli di cui è composto il cavo è singolarmente rivestito e iniettato, mentre un ulteriore guaina di protezione, in polietilene pesante, rinchiusa il fascio di trefoli

• L'impiego dei trefoli "unbonded" offre la possibilità di sostituire il singolo trefolo, maggiore garanzia di protezione e risparmio un'operazione di iniezione in opera che sebbene sia più semplice ed affidabile rispetto all'analoga operazione di iniezione di cavi interni, soprattutto per la facilità di controllo, presenta delle incertezze e delle complicazioni esecutive



Integrazione delle armature

• Il ricorso ai cavi esterni non aderenti permette teoricamente che la forza di precompressione possa essere aggiustata durante la vita della struttura.

• E' ovvio che questa operazione può condursi solamente se i cavi sono stati iniettati con grasso o cera

• In fase di progetto bisogna porre l'attenzione su alcuni dettagli; è necessario, infatti, prevedere degli accessi alla struttura, commisurati con le dimensioni delle attrezzature utilizzate per la messa in tensione dei cavi, e degli spazi sufficienti affinché questi vengano facilmente movimentati e posizionati

• Un sufficiente spazio deve essere previsto anche dietro gli ancoraggi per il posizionamento dei martinetti, mentre i trefoli dovranno sporgere al di là dell'ancoraggio per una lunghezza che consenta di riattaccarli ai martinetti

• L'operazione di ritesatura, però, poteva costituire una giustificata preoccupazione quando ancora le cadute di tensione a lungo termine non erano ben comprese. Non si ha notizia oggi di recenti interventi di ritesatura dovuti ad eccessive perdite della forza di precompressione

• Se si considera inoltre che inizialmente i cavi sono stati tesi al 70-80% della loro resistenza, si capisce come una successiva messa in tensione sia tutt'altro che una semplice operazione.

37

Integrazione delle armature

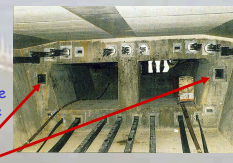
• Numerosi Standard, oggi, richiedono che le nuove strutture siano progettate anche per futuri cavi esterni aggiuntivi per contrastare il potenziale aumento dei carichi o le eccessive cadute di tensione nei cavi inizialmente previsti

• Viene richiesto infatti di prevedere un numero fissato di cavi aggiuntivi, ad esempio 2 per sezione oppure una data percentuale della forza iniziale (AASHTO: 10%).

• Le Linee Guida Tedesche, impongono ad esempio che:

- per ponti con precompressione totalmente esterna bisogna prevedere la disposizione di 1 cavo per ogni parete (anima) del concio
- per ponti a precompressione mista devono essere previsti ulteriori 3 cavi per ogni parete del concio

• L'obiettivo è quello di fare un ulteriore investimento iniziale per evitare altrimenti, se necessario, il ricorso a degli interventi di manutenzione straordinaria costosi e impegnativi, e dal punto di vista del calcolo e da quello puramente esecutivo.

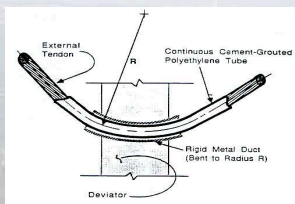
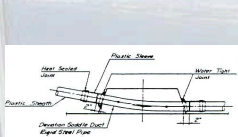


38

Sostituibilità delle armature

• Come già detto, il grande vantaggio del ricorso ai cavi esterni è la possibilità di sostituirli durante la vita della struttura qualora fosse necessario

• Affinché la sostituzione possa essere effettuata, in fase di progetto bisogna prevedere dei particolari arrangiamenti, riguardo le zone di ancoraggio e quelle di deviazione, che consentano di sfilare i cavi



Le procedure di rimozione dipendono dal tipo di iniezione eseguita

Se il cavo è iniettato con grasso o cera, la rimozione di questo richiede il preventivo detensionamento per mezzo del martinetto; una volta rilasciata la forza agli ancoraggi, il cavo viene sfilato dalla guaina raccogliendo il grasso (o la cera).

39

Sostituibilità delle armature

• Se invece il cavo è iniettato con malta, l'operazione è più delicata in quanto bisogna eseguire dei tagli in alcune sezioni affinché possa essere sfilato

• In questo caso sia la guaina che la malta di iniezione sono rimosse localmente per consentire il taglio dei trefoli e il successivo rilascio della forza

• Il taglio di uno dei trefoli, però, porta ad una ridistribuzione della forza presente nel cavo sui rimanti; si potrebbe verificare quindi che un trefolo parzialmente corrosivo subisca una rottura improvvisa

• L'energia rilasciata potrebbe spingere il trefolo e il cuneo direttamente dietro l'ancoraggio dove si trova l'operatore con ovvi problemi di sicurezza

• Si deve rimuovere inizialmente la guaina per l'intera lunghezza del cavo; posizionare in modo opportuno dei morsetti (ad U) per controllare il possibile effetto "frusta" in seguito al taglio del singolo trefolo

• Si deve tagliare un trefolo alla volta usando delle lame metalliche abrasive

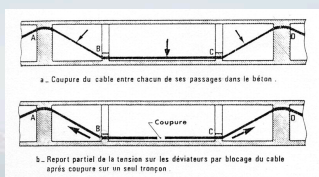


Sostituibilità delle armature

• La rimozione può risultare più complicata se i cavi sono aderenti ai deviatori (oppure agli ancoraggi)

• In questo caso bisogna procedere al taglio dei singoli trefoli alternativamente sui due lati dei blocchi di deviazione per bilanciare la forza nel cavo rispetto al deviatore

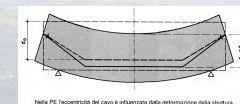
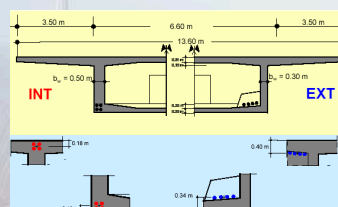
• Per i tratti di cavo ancora incastrati agli ancoraggi e sui deviatori, si può usare un getto d'acqua ad alta pressione per rimuovere in parte la malta e completare la rimozione tramite un martinetto monotrefolo



Getto d'acqua a pressione

41

Problemi specifici della precomp. esterna



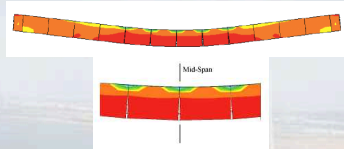
L'eccentricità dei cavi esterni è più piccola rispetto a quella dei cavi interni. La perdita di braccio dipende:

- dal fatto che i cavi, interni al cassone, vanno posizionati al di sopra e al di sotto rispettivamente della controsoletta e della soletta
- dal cambiamento dell'eccentricità sotto carico

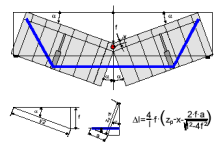
42

Problemi specifici della precomp. esterna

Quando una struttura è costruita mediante conci prefabbricati ed è precompressa esternamente, nell'analisi deve essere presa in considerazione la possibile apertura dei giunti tra i segmenti dovuta agli elevati carichi applicati



Dal momento che le armature lente non oltrepassano i giunti, solamente i cavi di precompressione esterni dovrebbero portare la tensione addizionale dovuta all'aumento dei carichi. Così, la forza nel cavo dipende dalla grandezza delle aperture dei giunti



E' chiaro quindi che il meccanismo di collasso risulta profondamente diverso da quello proprio delle strutture a cavi aderenti

E' impossibile affrontare il problema con il ricorso alle equazioni di equilibrio e di compatibilità sezionali, dovendo dunque considerare la struttura nel suo complesso

Oggettive difficoltà di calcolo

43

Problemi specifici della precomp. esterna

•La mancanza di aderenza impedisce un significativo incremento della tensione nell'acciaio man mano che si avvicina al collasso e fa sì che la rottura avvenga per schiacciamento del calcestruzzo

•Questo non significa necessariamente il raggiungimento di un meccanismo di rottura senza margini di avvertimento

•Naturalmente il fatto che l'acciaio non attinga alla sua resistenza ultima, si traduce in una penalizzazione a rottura della struttura, essendo ovvio che per ottenere lo stesso margine di sicurezza a rottura in una struttura a cavi esterni rispetto ad una a cavi interni, bisognerebbe aumentare il quantitativo di acciaio armonico, ragionando con riferimento alla pura verifica sezionale

•Questo può diventare limitativo per strutture isostatiche che non hanno riserve suppletive

•Quando si considera una struttura da ponte di luce rilevante, lo schema statico con cui si ha a che fare è di solito iperstatico. Si possono quindi sfruttare quei margini a rottura che si evidenziano dal condurre un'analisi estesa a tutta la struttura con l'aiuto conseguente della ripartizione

44

Problemi specifici della precomp. esterna

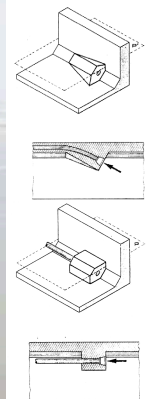
•La precompressione esterna richiede alla struttura l'assorbimento di sforzi molto concentrati, il che pone dei problemi di diffusione ancor più importanti che nel caso della precompressione interna classica

•In pratica, bisogna distinguere tre casi:
•l'ancoraggio su dei blocchi (ringrossi);
•l'ancoraggio all'estremità di cavi correnti;
•l'ancoraggio sui conci in testa pila.

•Come visto nelle prime realizzazioni, si è scrupolosamente evitato di ancorare dei cavi su dei blocchi.

•In effetti, mentre nel caso di un cavo interno lo sforzo di precompressione è diretto verso le anime, nel caso di un cavo esterno lo sforzo di precompressione è parallelo all'anima del cassone

•La diffusione avviene dunque in condizioni molto più sfavorevoli: la superficie di contatto tra il blocco e l'anima del cassone è soggetta a degli sforzi di taglio importanti.



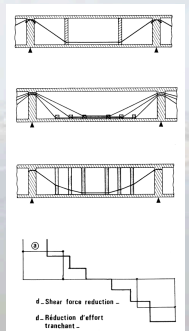
Riflessioni sulla concezione del cablaggio

Nel caso di un ponte ad altezza costante, la precompressione esterna permette di realizzare delle anime di spessore costante, grazie alla sua grande efficacia nei confronti della resistenza allo sforzo tagliante.

E' un vantaggio costruttivo apprezzabile, ma questo può limitare il risparmio di calcestruzzo in rapporto ad una soluzione classica, con delle anime di spessore variabile

Perché il cablaggio sia efficace e permetta la costruzione di anime di spessore costante, è necessario che produca una riduzione di sforzo tagliante tanto maggiore quanto più ci si avvicina agli appoggi

E' quindi necessario realizzare un cablaggio a ventaglio a partire dalle pile, o a semi-ventaglio, per riprendere la terminologia dei ponti strallati.



Impalcato a sezione costante

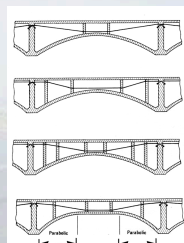
46

Riflessioni sulla concezione del cablaggio

•Nel caso di un ponte a grande profilo lineare o parabolico, la riduzione di sforzo tagliante che è necessario prender in conto per rendere minimo lo spessore delle anime, scelte costanti, è sensibilmente costante fino ad un quarto della campata a partire dalle pile e nulla nella parte centrale

•Questo permette di mettere in opera un cablaggio che presenta un tracciato unico, con sole due deviazioni in ogni travata

•E' preferibile, quando possibile, posizionare i cavi su due travate e non su una sola, per ridurre gli sforzi di diffusione sulle pile e per limitare il numero di ancoraggi e dunque il costo, in quanto il prezzo degli ancoraggi è particolarmente elevato nel caso della precompressione esterna (cavi di grande portata, doppi tubaggi, ecc).



Impalcato a sezione parabolica

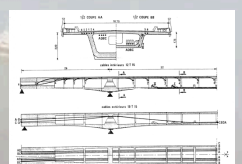
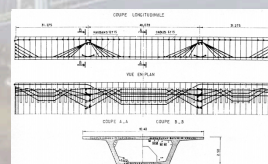
47

Riflessioni sulla concezione del cablaggio

•Infine, bisognerebbe tentare il posizionamento di ogni cavo esterno in un piano, possibilmente verticale, per semplificare il suo tracciato, ridurre le perdite di precompressione e sopprimere i deviatori trasversali rendendo il tracciato il più lineare possibile

•E' questo il principio adottato per il ponte della Flèche, a differenza di quanto fatto nel caso del viadotto Vallon-des-Fleurs, in cui il tracciato dei cavi appare complesso e con numerose deviazioni angolari

•Nel caso di un viadotto a molte campate, non è certamente facile posizionare ciascun cavo in un piano. A questo proposito, si può constatare come sia favorevole progettare un cassone con delle anime inclinate, e non verticali, disponendo di maggiore spazio per alloggiare gli ancoraggi.



Riflessioni sulla concezione del cablaggio

Il lay-out dei cavi dipende anche dal tipo di deviatori utilizzati.

La deviazione può avvenire talvolta mediante piccoli blocchi sistemati in corrispondenza delle giunzioni della controsoletta con le anime, talvolta mediante delle costole intermedie

La soluzione dei blocchi di deviazione presenta dei vantaggi costruttivi considerevoli. E' facile infatti integrare il deviatore nel cassero di prefabbricazione del concio

Inoltre, l'aggiunta di peso è modesta e le dimensioni non pregiudicano la libera movimentazione dei mezzi di manutenzione e di posa.



Struttura economicamente più efficiente

Struttura razionalmente più efficace

49

Riflessioni sulla concezione del cablaggio

Fin dai primi anni di utilizzazione si evidenziò come una eccessiva distanza tra i deviatori può permettere fastidiosi problemi di vibrazione dei cavi

Le vibrazioni continue possono indurre la crisi per fatica di parti dei cavi

Per evitare tali vibrazioni basta fissare il cablaggio con delle selle intermedie.



50

Tensione ultima nei cavi non aderenti

L'incremento di tensione nei cavi di precompressione esterni alla sezione non è legato al comportamento della sezione ma a quello dell'intera struttura

il comune approccio basato sulla compatibilità delle deformazioni non può essere applicato.

la tensione nei cavi dipende dai seguenti fattori:

- il livello effettivo di precompressione;
- profilo dei cavi;
- la snellezza dell'elemento;
- il tipo e la distribuzione del carico;
- il quantitativo di armatura lenta;
- caratteristiche dei materiali;
- forma della sezione trasversale dell'elemento;
- il possibile scivolamento dei cavi sui deviatori;
- la variazione dell'eccentricità del cavo in seguito alla deformazione della struttura;
- la distanza tra i deviatori.

51

Tensione ultima nei cavi non aderenti

- Correntemente, nei vari Codici di calcolo internazionali, non vengono proposte ancora delle equazioni per il calcolo della tensione ultima di un cavo esterno. Tutte le equazioni presentate, si riferiscono al caso di cavi interni non aderenti; l'uso di queste equazioni empiriche è comunque concesso ai progettisti, anche in caso di cavi esterni.
- Bisogna però ricordare che il comportamento di strutture precomprese a cavi interni non aderenti o a cavi esterni, è lo stesso solamente quando le variazioni d'eccentricità dei cavi esterni dovute ai carichi applicati sono esigue e quando i cavi sono liberi di scivolare (senza attrito) sui deviatori.
- Quando la snellezza della struttura aumenta, il cambiamento d'eccentricità nei cavi esterni, dovuto ai carichi applicati, diventa significativo. Inoltre, nei casi in cui i cavi esterni sono fissi sui deviatori (come molte realizzazioni negli Stati Uniti), la forza varia da un segmento ad un altro. Se si considera l'attrito sui deviatori, per elevati livelli di carico il cavo tende a scivolare, il che provoca un cambiamento della forza nel cavo e questo può spesso ridurre la tensione ultima. E' importante quindi che questi fattori siano considerati nella progettazione di strutture precomprese a cavi esterni.

52

Tensione ultima nei cavi non aderenti

ACI 318 (1999)

$$f_{pu} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_{cs}}{\lambda \rho_p} \leq f_{ps} \quad (\text{in MPa})$$

è stata derivata per travi semplicemente appoggiate e per precompressione completa

dove:

$\lambda = 100$ per $l/d_p \leq 35$;

$\lambda = 300$ per $l/d_p > 35$;

d_p (o d_{ps}) è la posizione del cavo rispetto all'estradosso;

f_{pe} è la precompressione effettiva;

ρ_p è il rapporto d'armatura di precompressione, $A_p / b d_{ps}$;

A_p (o A_{ps}) è l'area del cavo;

b è la larghezza della sezione di calcestruzzo;

f'_{cs} è la resistenza a compressione del calcestruzzo;

f_y è la tensione di snervamento dell'acciaio ordinario.

53

Tensione ultima nei cavi non aderenti

British Code (BS 8110,1997)

$$f_{pu} = f_{ps} + \frac{7000}{l/d_p} \left(1 - 1.7 \frac{f_{ps} \rho_p}{f_{cs}} \right) \leq 0.7 f_{ps}$$

dove:

f_{ps} è la tensione ultima dell'acciaio di precompressione.

In questa formulazione, le variabili che influenzano maggiormente la tensione ultima nel cavo di precompressione sono il rapporto (l/d_p) e la resistenza cubica del calcestruzzo. Per tenere in conto la presenza di armatura lenta, A_s , il codice raccomanda che, in assenza di analisi rigorose, A_s può essere sostituita da un'area equivalente di armatura da precompressione uguale a $(A_s f_{ys} / f_{ps})$.

CEB-FIP MC 90 (1993)

Non è riportata nessuna equazione per predire la tensione ultima nei cavi non aderenti. Il valore di f_{ps} è assunto pari a f_{pe} a meno di un'appropriate analisi nel caso di cavi esterni che tenga conto della variazione di eccentricità. Ovviamente, questo fornisce un valore troppo conservativo per la tensione ultima nei cavi di precompressione, sia essi interni non aderenti che esterni.

54

Verifiche T-V-M

Il comportamento delle strutture composte da conci precompressi mediante cavi non aderenti e sprovvisti di armature ordinarie che attraversino i giunti, allo stato limite, è riconducibile a quello di un insieme di blocchi rigidi connessi da zone di minore resistenza e deformabilità, in cui si esplica la risposta non lineare e d'insieme

Per valutarne la resistenza ultima, è necessario individuare il meccanismo resistente per mezzo del quale il taglio viene trasmesso attraverso i giunti compressi, su una zona ristretta dell'altezza disponibile.

Due diversi meccanismi resistenti:

• trasmissione del taglio per attrito o ingranamento di corpi rigidi soggetti a compressione mutua lungo la superficie di contatto

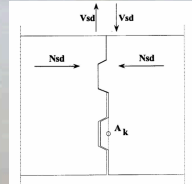
• meccanismo taglio - resistente d'insieme, costituito da un traliccio ad inclinazione variabile del campo di tensione diagonali d'anima (nell'ambito di una trave con altezza variabile lungo l'asse longitudinale)

$$V_{Rd} = \frac{N_{sd} \cdot \tan \varphi + \sum A_{ti} \cdot (c + \sigma_i \cdot \tan \psi) + \sum A_{ti} \cdot c}{\gamma_{Rd}}$$

Si ipotizza che il taglio venga trasmesso per mezzo della zona compressa del giunto e delle chiavi di taglio in essa incluse. Considerando i due contributi si ha:

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rf} + V_{Rc}}{\gamma_{Rd}}$$

$$V_{Rf} = N_{sd} \cdot \tan \varphi$$



Verifiche T-V-M

La tensione massima di compressione obliqua d'anima non può superare la resistenza corrispondente di sufficienti margini di sicurezza disponibile, cioè:

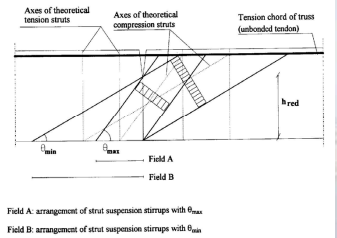
$$N_{sd} = \frac{M_{sd}}{z} + \frac{V_{Rc}}{2} \cdot \tan \theta \approx \text{cost}$$

Per evitare la crisi delle anime occorre che la tensione dei campi di calcestruzzo sia limitata:

$$\sigma_c = \frac{V_{sd}}{b_w \cdot h_{red} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \leq 0.6 \cdot f_{cd} \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) = f_{cd2}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{sd}}{f_{yd} \cdot h_{red} \cdot \tan \theta}$$

Attenzione alla quantità delle staffe necessarie immediatamente dopo il giunto



Field A: arrangement of strut suspension stirrups with θ_{min}

Field B: arrangement of strut suspension stirrups with θ_{max}

La massima apertura possibile del giunto può ottenersi imponendo $\theta = 45^\circ$ e $\sigma_c = f_{cd2}$

Verifiche T-V-M

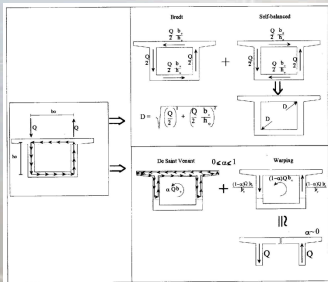
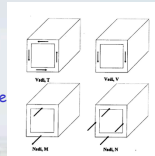
Si passa cioè, da un regime di torsione alla **Bredt** unito alla flessione, ad uno di torsione combinata alla **De Saint Venant** e di ingobbamento impedito

Il meccanismo di ingobbamento impedito diventa prevalente rispetto a quello di torsione alla De Saint Venant, l'iperstaticità interna della sezione tende a privilegiare il meccanismo resistente per ingobbamento impedito

Occorre tenere conto però dell'improvvisa variazione del taglio indotta dal cambiamento del regime torsionale

Nel progetto bisogna meglio impedire una totale apertura del giunto

In alternativa occorre progettare le anime con tagli doppi rispetto a quelli sopportati un istante prima dell'apertura del giunto



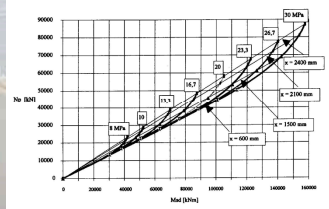
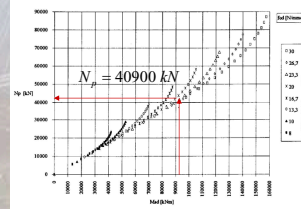
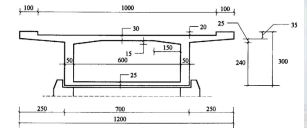
Esempio

Trave continua su quattro appoggi (40, 50, 40 m) calcestruzzo C35, Eurocodice 1, part.3 le sollecitazioni nella zona di massimo impegno:

$$M_{sd} = 91500 \text{ kNm}$$

$$V_{sd} = 6500 \text{ kN}$$

La struttura indagata è un cassone classico



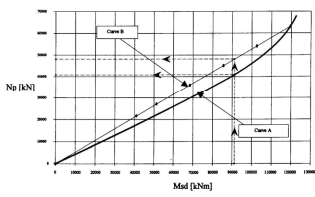
Esempio

Controllando il meccanismo delle chiavi di taglio:

$$V_{Rd} = \frac{V_{sd}}{\gamma_{Rd}} = \frac{40900 \times 0.5 / 2}{1.3} = 7865 \text{ kN} > V_{sd} = 6500 \text{ kN}$$

$$f_{cd2} = 0.6 \cdot \frac{35}{1.5} \left(1 - \frac{35}{250} \right) = 12.04 \text{ MPa}$$

$$h_{red} = \frac{6500 \times 1000}{500 \times 12.04 \times \sin 45^\circ \times \cos 45^\circ} = 2159 \text{ mm}$$



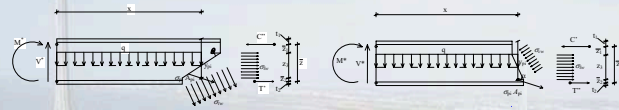
Si può calcolare un precompressione necessaria pari a:

$$N_p = 48200 \text{ kN} \quad (+18\%)$$

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{V_{sd}}{f_{yd} \cdot h_{red} \cdot \tan \theta} = \frac{6500000}{374 \cdot 2159 \cdot 1} = 8.05 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

Modello taglio-flessione

Si seziona il generico concio di trave con due sezioni notevoli



Si scrivono le equazioni di equilibrio con le azioni esterne

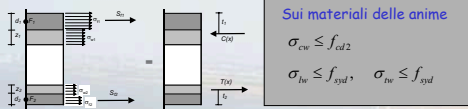
$$V_{sd}(x) = \sigma_{sc} \cdot z_1 \cdot b_w \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta + \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \sin \varepsilon) \quad V_{sd}(x) = \left(\frac{\sigma_{sc}}{f_{yd}} \right) \cdot \omega_{sc} \cdot f_{cd2} \cdot z_1 \cdot b_w \cdot \tan \theta + \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \sin \varepsilon)$$

$$T(x) = \frac{M_{sd} + \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \cos \varepsilon \cdot (l_i - y_p))}{\gamma} + \left[\left(V_{sd} - \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \sin \varepsilon) \right) \cdot \tan \theta + \left(\frac{\sigma_{sc}}{f_{yd}} \right) \cdot \omega_{sc} \cdot f_{cd2} \cdot z_1 \cdot b_w \right] \cdot \left(\frac{2 \cdot z_1 + z_2}{2 \cdot \gamma} \right)$$

$$C(x) = \frac{M_{sd} + \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \cos \varepsilon \cdot (z + l_i - y_p))}{\gamma} - \left[\left(V_{sd} - \sum (A_p \cdot \sigma_p \cdot \sin \varepsilon) \right) \cdot \tan \theta + \left(\frac{\sigma_{sc}}{f_{yd}} \right) \cdot \omega_{sc} \cdot f_{cd2} \cdot z_1 \cdot b_w \right] \cdot \left(\frac{2 \cdot z_2 + z_1}{2 \cdot \gamma} \right)$$

Modello taglio-flessione

Si cercano i campi di tensione nelle flangie e nelle zone d'anima limitrofe in equilibrio con gli sforzi nei due correnti



Sui materiali delle anime

$$\sigma_{cw} \leq f_{cd2}$$

$$\sigma_{lw} \leq f_{yld} \quad \sigma_{pw} \leq f_{yld}$$

Si scrivono le condizioni di ammissibilità plastica dei materiali

Sulle tensioni nelle flangie

$$-(f_{cd1} + \rho_{f1} \cdot f_{yld}) \leq \sigma_{f1} \leq \rho_{f1} \cdot f_{yld}$$

$$-(f_{cd1} + \rho_{f2} \cdot f_{yld}) \leq \sigma_{f2} \leq \rho_{f2} \cdot f_{yld}$$

Sulle tensioni nelle porzioni d'anima vicino alle flangie

$$-(f_{cd1} + \rho_{lw} \cdot f_{yld}) \leq \sigma_{w1} \leq \rho_{lw} \cdot f_{yld}$$

$$-(f_{cd1} + \rho_{lw} \cdot f_{yld}) \leq \sigma_{w2} \leq \rho_{lw} \cdot f_{yld}$$

Sulle tensioni nell'acciaio reso aderente

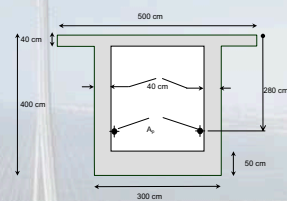
$$\sigma_{pi} \leq f_{yld}$$

Sulle tensioni nell'acciaio non aderente

$$\sigma_{pi} = \sigma_{pcc}$$

61

Un esempio



$$\omega_{lw} = \frac{A_{lw}}{b_w \cdot s} \cdot \frac{f_{yld}}{f_{cd2}} \quad \omega_{pw} = \frac{A_{pw}}{b_w \cdot h} \cdot \frac{f_{yld}}{f_{cd2}}$$

$$\omega_f = \frac{A_{f1} + A_{f2}}{A_{twave}} \cdot \frac{f_{yld}}{f_{cd1}} \quad \omega_p = \frac{\sum A_{pw}}{A_{twave}} \cdot \frac{f_{yld}}{f_{cd1}}$$

$$m = \frac{M}{f_{cd1} \cdot A_{twave} \cdot H} \quad v = \frac{V}{f_{cd2} \cdot b_w \cdot h}$$

Calcestruzzo

Acciaio da precompressione

Tensione di precompressione a cadute scontate

Rapporto meccanico di precompressione

Rapporto meccanico delle staffe

Inclinazione del cavo

Trattandosi di struttura a conci coniugati

$$f_{ck} = 45 \text{ MPa} (\gamma_c = 1.5)$$

$$f_{pyd} = 1670 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{pwi} = 900 \text{ MPa}$$

$$\omega_p = 0.30$$

$$\omega_{lw} = 0.3 \div 0.4 \div 0.5,$$

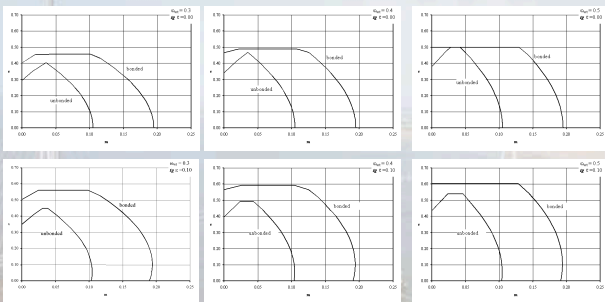
$$\text{tg } \varepsilon = 0.00 \div 0.10.$$

$$\omega_s = 0.0, \quad \omega_w = 0.0.$$

$$f_{cd1} = 0.85 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad f_{cd2} = 0.60 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

Model Code '90

Domini di Resistenza M-V



Il confronto tra le due tipologie di precompressione mostra qual è l'entità della perdita di capacità portante, già nota peraltro in termini di solo momento flettente a collasso

Si può valutare la riduzione, in termini globali, sulla caratteristica (V - M) e come questa sia influenzata da alcuni fattori quali la percentuale meccanica delle staffe e l'inclinazione dei cavi.

La Precompressione esterna nella riabilitazione

Nella riabilitazione delle strutture da ponte la tecnologia della precompressione esterna trova un discreto impiego.

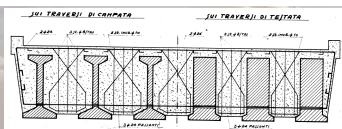
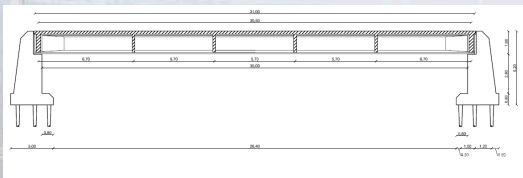
Infatti sempre più spesso la precompressione esterna diventa uno strumento economico e rapido per fornire a strutture esistenti una capacità portante adeguata alle sopraggiunte richieste;

In alcuni casi la precompressione esterna bene si presta a riabilitare e recuperare ponti che sembrerebbero aver ultimato la loro vita utile.

64

Un Esempio: il ponte di Terdoppio

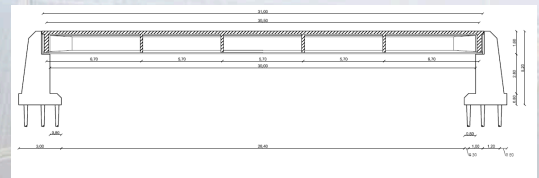
Il ponte "stradale" sul torrente Terdoppio, fu realizzato sul prolungamento della strada vicinale della Maretti (Novara). Essa era stato costruito agli inizi degli anni settanta ed era costituito da un impalcato di sei travi precomprese e sei traversi gettati in opera.



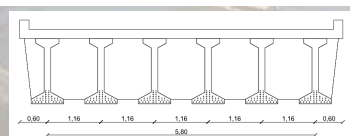
65

Storia della struttura

L'opera progettata secondo le Circ. 384/1962 e 1398/1965 del Min. LL.PP., fu costruita e collaudata agli inizi degli anni settanta.



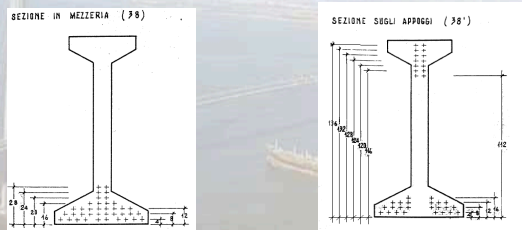
Sezione di Mezzeria



66

Storia della struttura

L'opera progettata secondo le Circ. 384/1962 e 1398/1965 del Min. LL.PP., fu costruita e collaudata agli inizi degli anni settanta.



38 trefoli di area unitaria pari a 0.93 cmq e carico di rottura di 1750 N/mm².

67

Vincoli progettuali

Avendo la necessità di predisporre un ponte ferroviario per il superamento del torrente stesso, si presero in considerazione diverse ipotesi:

- l'utilizzo del ponte stradale senza sostanziali interventi di adeguamento;
- il rinforzo dell'opera che però evitasse l'ingombro in alveo;
- la sostituzione del manufatto con una struttura progettata allo scopo (un ponte metallico), utilizzando le spalle, eventualmente rinforzate.

Si valutarono quindi tutte le soluzioni dal punto di vista economico e dei tempi. Alla fine la Committenza scelse il rinforzo tramite l'adeguamento parziale.

68

Scelta di progetto

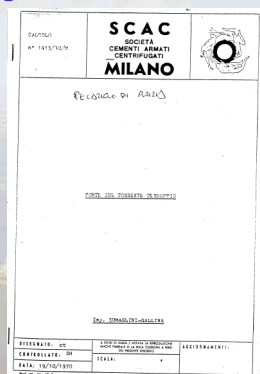
La scelta fu condizionata da

Esigenze statiche

Vincoli economici;

Successivo riutilizzo

Si rintracciarono i documenti allegati al progetto originario e le prove di carico eseguite sulla struttura durante i collaudi.



69

Indagini complementari

Si scelse di programmare comunque una campagna di indagini non-distruttive sul calcestruzzo (alcuni carotaggi sulla soletta esistente integrate da prove del tipo **SonReb** anche sulla trave e sui traversi).

Per il calcestruzzo della soletta si stimò un materiale di classe C20/25.

Per quello delle travi si stimò una classe C35/45, tipica dell'industria di prefabbricazione di quel periodo.

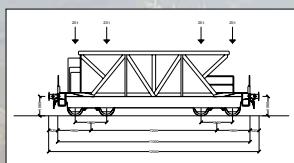


70

Azioni di traffico

Si richiedeva il passaggio rispettivamente di:

- un treno per il collaudo delle opere progettate per l'Alta Velocità composto di 24 assi da 210 kN cadauno per un totale di 5040 kN;
- un treno equivalente al LM71 ridotto all'83% come previsto dalle istruzioni ITALFERR per ponti di Cat. B;
- un treno di ballastiere con il carico complessivo di 800 kN su quattro assali.



71

Intervento di adeguamento

Si valutarono attentamente diverse ipotesi di adeguamento:

- la realizzazione di una struttura metallica sottostante in parallelo della tipologia a cavalletto;
- il rinforzo delle travi principali con lamelle di FRP sull'intradosso;
- il rinforzo delle travi principali ricorrendo ad un sistema di precompressione non aderente ed esterna alla sezione di calcestruzzo.

Alla fine si scelse di adeguare solo parzialmente l'opera, permettendo il transito dei treni di cui al punto b) e c) totalmente e solo parzialmente quello di cui al punto a), ridotto al 60%, riservandosi il ricarico al 100% dopo il transito dello stesso sul ponte di Terdoppio.

72

Intervento di adeguamento

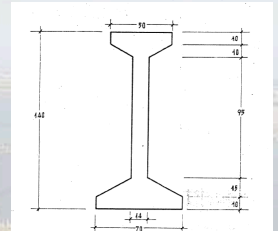
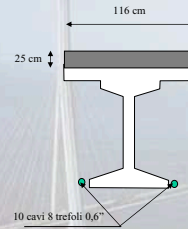
Si scelse di procedere secondo le seguenti fase esecutive:

- rimozione della pavimentazione esistente fino ad estradosso soletta e scarifica della stessa;
- esecuzione degli inghisaggi dei connettori per la soletta integrativa;
- posizionamento dell'armatura e getto della soletta integrativa;
- stesa della quota di ballast previsto per zavorrare la struttura;
- demolizione del paraghiaia e preparazione del piano di lavoro sulle spalle a quota appoggio esistente;
- perforazione dei traversi di testata per alloggiamento trefoli integrativi;
- posizionamento delle testate di tesatura e delle armature di frettaggio, getto integrativo dei traversi di testata;
- installazione delle selle metalliche di deviazione sotto i traversi ai $\frac{1}{2}$;
- posa dei trefoli integrativi e realizzazione dei cavi esterni;
- tesatura dei nuovi cavi fino ai tassi iniziali previsti;
- getto dei nuovi paraghiaia;
- riempimento a tergo dei paraghiaia con misto cementato;
- posa dei giunti e dei coprigiunti;
- posa dell'armamento;
- collaudo finale.

73

Soluzione scelta

Geometria della trave precompressa



Per la precompressione esterna delle travi principali furono utilizzati 10 cavi da 8 trefoli 0,6" del tipo TESIT con testate Mobili "ZP6806", tiro iniziale per cavo $N_{pini} = 1491 \text{ kN}$ (152 ton) e tiro massimo in esercizio $N_{pesr} = 1177 \text{ kN}$ (120 ton).

74

Soletta integrativa

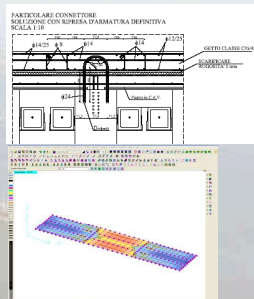
La soletta integrativa realizzata per sorreggere i maggiori carichi fu resa solidale alla struttura sottostante con scarifica superficiale di quella esistente e con connettori metallici.



La progettazione dei connettori fu eseguita secondo il punto 6.2.5. dell'Eurocodice 2.

Furono prescritti:

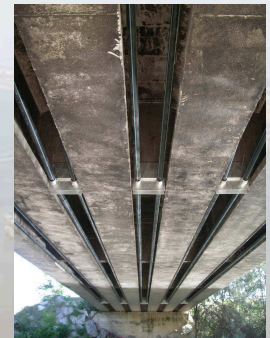
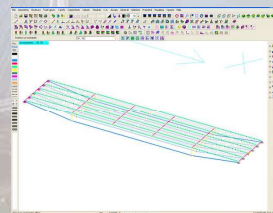
- una scabrezza superficiale con scarifica non inferiore a 5 mm;
- l'uso di calcestruzzo espansivo per il getto della nuova soletta.



75

Posizionamento cavi

I cavi furono deviati tramite dei rinvii in acciaio realizzati a tergo di quei traversi di campata prossimi agli estremi.



76

Selle di rinvio

Per le selle di rinvio a causa della modesta classe del calcestruzzo dei traversi si scelse una tipologia avvolgente in acciaio con funzioni di presidio della parte terminale del traverso e di sella di rinvio.

Entro il blocco sella, furono saldati due tubi metallici presagomati che potessero fornire al cavo passante la richiesta inclinazione.

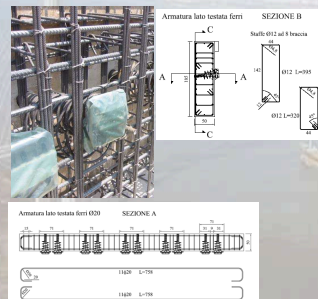


77

Traversi - Testate

Le testate di precompressione furono disposte dentro le strutture di rinforzo dei traversi di testata.

Il progetto fu eseguito utilizzando schemi del tipo tirante-puntone.



78

Collaudo

L'intervento di adeguamento è stato eseguito da febbraio ad agosto 2007 e il ponte è stato collaudato con successo nel settembre del 2007 ed è oggi in uso.

