

# LA SEQUENZA DI TESATURA NELLA COSTRUZIONE DEI PONTI STRALLATI CON IMPALCATO MISTO ACCIAIO-CALCESTRUZZO

## STRESSING SEQUENCE IN CONSTRUCTION STAGES OF CABLE-SUPPORTED BRIDGES WITH COMPOSITE DECK

**Marcello Arici, Michele F. Granata, Piercarlo Margiotta**

Università di Palermo

Dipart. di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale  
Palermo, Italy

arici@unipa.it, granata@unipa.it, ing.margiotta@gmail.com

**Antonino Recupero**

Università di Messina

Dipartimento di Ingegneria Civile  
Messina, Italy

antonino.recupero@unime.it

### ABSTRACT

A cable-stayed bridge is built following a sequence in which geometric configuration, restraints and consequently stress and strain patterns vary significantly during construction till the final configuration is achieved. A study is presented about stay stressing sequence in cable-stayed bridges with composite deck for the case of construction built by the cantilever method. The main target is to find simple methodologies to establish the initial cable forces. A comparison between different stay stressing procedures is proposed in order to evaluate the differences in terms of deformed profile and stress state into the deck and the pylon. Results can be useful to give practical suggestions to designers, when they have to deal with stay stressing in construction of composite cable-stayed bridges.

### SOMMARIO

La costruzione dei ponti strallati è caratterizzata da un susseguirsi di fasi costruttive in cui la geometria, i vincoli ed i carichi variano in maniera significativa. Ciò comporta un cambiamento delle sollecitazioni e delle deformazioni fino al raggiungimento della configurazione finale. Si presenta uno studio sulle sequenze di tesatura degli stralli nei ponti con impalcato misto acciaio-calcestruzzo e per il caso della costruzione a sbalzo, con l'obiettivo della determinazione delle forze iniziali nei cavi tramite metodologie semplici ed efficaci. Si propone inoltre un confronto tra diverse possibili sequenze di tesatura sia in termini di sollecitazioni finali nell'impalcato e nella torre, sia in termini di deformazioni e di profilo geometrico a fine costruzione. Si ricavano risultati utili per i progettisti che si trovano ad affrontare la problematica della tesatura degli stralli in questo tipo di ponti.

### 1 INTRODUZIONE

I ponti strallati possono essere realizzati con tre tipologie principali di impalcato: travi o cassoni in cemento armato precompresso, sezioni miste acciaio-calcestruzzo e sezioni interamente in acciaio. Tale variabilità è legata principalmente all'ampio range di luci che essi possono coprire, dai 100 m fino ai 1000 m, e all'economicità della soluzione con i diversi tipi di materiali. I ponti con impalcato in calcestruzzo sono generalmente vantaggiosi per luci

minori, quelli ad impalcato misto per le luci intermedie mentre quelli ad impalcato completamente in acciaio per le luci più grandi. Nell'ambito della costruzione per sbalzi successivi, la tipologia di impalcato ha diverse conseguenze nella valutazione degli stati tensionali e deformativi ma soprattutto nella problematica, fondamentale nei ponti strallati, della determinazione degli sforzi iniziali nei cavi e della sequenza di tesatura. Nel caso dei ponti con impalcato misto acciaio-calcestruzzo, siano essi con sezione aperta (cioè costituita da travi longitudinali e trasversi) che con sezione chiusa (a cassone), le fasi di costruzione prevedono per ogni concio a sbalzo, l'assemblaggio della trave metallica e successivamente il getto della soletta. Ciò comporta una differenza rispetto al caso del ponte in calcestruzzo, perché il carico da peso proprio non è applicato in un unico istante ma in momenti successivi. Ne consegue una diversa valutazione degli sforzi nei cavi e della sequenza di tesatura. Inoltre, mentre nel ponte con impalcato in calcestruzzo, la determinazione degli sforzi negli stralli è maggiormente volta al raggiungimento del profilo desiderato per la fase di esercizio e tiene sempre conto degli importanti effetti dei fenomeni lenti nel tempo (ritiro e viscosità del calcestruzzo), nel caso dei ponti in struttura mista, l'ottimizzazione dei tiri è volta anche ad ottenere un conveniente diagramma dei momenti per carichi permanenti. Ciò è necessario per limitare le massime tensioni di trazione nell'acciaio e nella soletta in calcestruzzo. Inoltre, con l'aumentare delle luci, il ponte metallico necessita spesso di un'analisi non lineare che tenga conto del "cable-sag effect" ovvero della deformazione del cavo per peso proprio e delle relative frecce nonché degli effetti del secondo ordine sull'impalcato. Il ponte metallico enfatizza questi ultimi due punti: l'ottimizzazione del diagramma dei momenti in costruzione e nella configurazione finale e gli effetti della non linearità geometrica. Schlaich [1] ha evidenziato tali problematiche per i diversi tipi di impalcato e ha fornito alcune indicazioni nel caso di ponti misti con solette composte da elementi prefabbricati.

In questo studio viene proposta una metodologia per la determinazione delle forze iniziali nei cavi per i ponti con impalcato misto acciaio-calcestruzzo, basata su schemi elastici parziali delle fasi di costruzione. Essa è già stata applicata ai ponti con impalcato in calcestruzzo [2] e viene qui modificata ed estesa per il caso dei ponti misti. Successivamente si riporta un confronto tra possibili sequenze di tesatura che mirano ad ottenere un determinato profilo geometrico della "configurazione per carichi permanenti" a fine costruzione, con valori di momento flettente accettabili per l'impalcato e la torre. La configurazione scelta per fine costruzione è quella della trave continua su appoggi rigidi. Lo studio è volto al raggiungimento di tale condizione, non solo a costruzione terminata, ma anche durante le fasi del montaggio dei conci d'impalcato, con lo scopo di ridurre al minimo le punte del diagramma dei momenti e gli spostamenti delle sezioni di ancoraggio degli stralli all'impalcato. In tale valutazione è stata considerata con diverse ipotesi l'assemblaggio della sezione mista (parte di acciaio e soletta superiore in calcestruzzo).

Per quanto riguarda gli effetti dei fenomeni lenti nel tempo, il ritiro e la viscosità del calcestruzzo comportano in questo tipo di ponti due conseguenze fondamentali. La prima è l'accorciamento assiale delle torri in calcestruzzo e della soletta d'impalcato che possono indurre nel tempo spostamenti verso il basso dell'impalcato e fessurazioni della soletta. La seconda è la variazione della posizione del baricentro della sezione mista (creep-transformed section) ad opera della viscosità, che porta ad un cambiamento dello stato di sollecitazione ma anche ad una redistribuzione tensionale all'interno della sezione tra porzioni di calcestruzzo e di acciaio.

## **2 SEQUENZE DI TESATURA NEI PONTI STRALLATI**

Lo stato dell'arte, relativamente ai metodi di ottimizzazione delle sequenze di tesatura dei ponti strallati, è complesso ed articolato poiché l'argomento è stato affrontato da numerosi autori con approcci differenti. Per quanto riguarda il metodo di costruzione per sbalzi

successivi la metodologia più frequente per la determinazione degli sforzi negli stralli è la cosiddetta “backward analysis”. Si tratta di un’analisi con decostruzione del ponte a partire dallo stato finale, fase per fase [3,4]. In tale metodo le forze iniziali nei cavi sono quelle che si presentano in ogni strallo ad ogni fase di decostruzione del ponte [5]. L’analisi backward è sempre seguita da un’ulteriore analisi in avanzamento (detta in inglese “forward”) che considera una tesatura degli stralli ai valori trovati con la procedura di decostruzione e fornisce lo stato reale di sollecitazione e deformazione nel ponte. Tale stato è generalmente diverso da quello teoricamente previsto perché un’unica operazione di tesatura del singolo strallo non fornisce facilmente il risultato voluto, condizione dovuta all’alto grado di iperstaticità della struttura (effetto mutuo degli stralli), all’effettiva sequenza di applicazione dei carichi e delle pretensioni e all’influenza dei fenomeni lenti nel tempo. Inoltre, quando si opera la decostruzione del ponte, la valutazione degli sforzi viene effettuata su una configurazione che non parte da uno stato di sollecitazione nullo (perché essa era già stata caricata), come avviene invece nella realtà quando si mette in opera il nuovo concio ed il nuovo strallo. Di conseguenza non è facile ottenere il profilo voluto con la singola tesatura di uno strallo; per fare ciò sarebbe necessario ritesare alcuni stralli o tutti, ovvero regolarli in più fasi. Ciò comporta però un notevole problema tecnologico e di costi, perché regolare uno strallo significa trasferire l’attrezzatura di pretensione di strallo in strallo e incidere più volte i trefoli con i coni di ancoraggio, danneggiandoli in diversi punti e diminuendone la resistenza a fatica [6]. Vanno quindi limitate le regolazioni di stralli già messi in tensione, specialmente se si tratta di rilasci; successive tesature che marcano lo strallo in zone vergini del trefolo pongono invece problemi minori relativamente al fenomeno della fatica.

L’analisi in avanzamento (forward) fornisce anche la possibilità, implementata in alcuni software commerciali, di tenere conto dei seguenti aspetti:

- quando si monta un nuovo concio, assemblandolo al precedente già montato e con lo strallo in tensione, è necessario posizionarlo in direzione tangente all’estremo del precedente, già deformato. Ciò evita la nascita di deformazioni imposte tra concio e concio e minimizza gli scostamenti del profilo d’impalcato costruito rispetto a quello teorico.
- Quando si monta e si mette in tensione lo strallo che viene ancorato al nuovo concio, la lunghezza iniziale dello strallo è diversa da quella teorica, per effetto dello spostamento del punto di ancoraggio nella posizione deformata. Di conseguenza lo sforzo nello strallo, quando viene applicata la pretensione, varia rispetto a quella teorica (lack-of-fit force).
- Il cavo di acciaio non è rettilineo tra i punti di ancoraggio sull’impalcato e sulla torre bensì presenta una freccia (sag effect), che è causa del suo comportamento non lineare; la non linearità può essere trascurata per stralli corti (generalmente fino a circa 300 metri per le normali tensioni di lavoro) ma può risultare significativa per gli stralli più lunghi [7].
- L’analisi in avanzamento è l’unica che può tenere conto dei fenomeni lenti nel tempo (ritiro e viscosità del calcestruzzo), secondo i modelli di previsione di letteratura e delle norme (CEB MC, ACI209, B3, GL2000) e con riferimento ai tempi effettivi di getto e maturazione nelle varie fasi di costruzione.
- Se la sezione è composta, gli elementi di diversi materiali (acciaio e calcestruzzo) vengono posti in opera in istanti diversi. Quando si realizza l’ultimo concio a sbalzo, si assembla la parte metallica con il concio precedente e questa si deforma; successivamente viene posto in opera lo strallo ed esso può essere tesato o lasciato alla sua lunghezza di montaggio. Infine viene gettata la soletta di calcestruzzo o vengono

poste solette prefabbricate con un getto di completamento. A questo punto si applica una distorsione allo strallo per fornire la pretensione voluta. Questa ultima fase di costruzione del concio, in cui la trave metallica è già deformata, comporta la comparsa di curvature flessionali che vengono congelate nel concio (lock-in curvature) e una variazione del diagramma dei momenti flettenti per effetto della variazione di sezione d'impalcato, prima soltanto metallica e poi mista.

Le metodologie che permettono di ottenere gli sforzi iniziali dei cavi, sia che si operi con analisi backward che forward, sono generalmente:

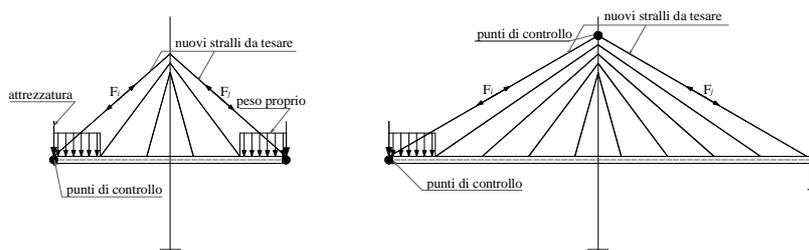
- 1) annullare gli spostamenti verticali dei punti di ancoraggio degli stralli all'impalcato o quelli orizzontali dei punti della torre (zero displacement method) [7,8];
- 2) raggiungere una determinata distribuzione dei momenti flettenti sull'impalcato (force-equilibrium methods e unit load method) [9];
- 3) minimizzare un'opportuna funzione energetica [10].

Recupero [11] ha proposto un metodo misto per ponti interamente metallici che considera una configurazione geometrica predeterminata e la contemporanea ottimizzazione del diagramma dei momenti sull'impalcato. Nei paragrafi seguenti si propongono alcune metodologie per la tesatura degli stralli nei ponti composti e si discutono i risultati di un esempio numerico.

### 3 METODOLOGIE PROPOSTE DI TESATURA DEGLI STRALLI

In questo studio si porrà attenzione soltanto all'analisi di tipo forward, ovvero in avanzamento. La determinazione degli sforzi iniziali nei cavi viene operata attraverso schemi elastici parziali della struttura, uno per ogni fase di costruzione, cioè per ogni concio assemblato e per ogni strallo inserito. I tre approcci proposti per lo studio della sequenza di tesatura nei ponti ad impalcato misto sono i seguenti:

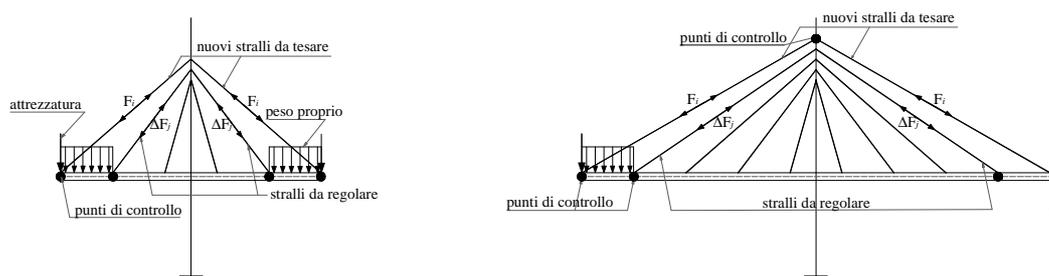
A) si assembla la trave o le travi in acciaio di un concio a sbalzo a partire dal concio precedente e si aggancia lo strallo alla parte metallica già deformata, senza variare la lunghezza dello strallo; successivamente si getta la soletta e si tesa lo strallo in un'unica fase al valore di tiro necessario per recuperare gli spostamenti del punto di ancoraggio. Il valore di pretensione si ottiene dallo schema elastico parziale della fase considerata, annullando tutti gli spostamenti dovuti alla deformazione iniziale della parte metallica a mensola e del successivo getto della soletta, considerando anche il peso di eventuali attrezzature di cantiere (fig. 1).



**Fig. 1:** Schemi elastici parziali delle fasi di costruzione. Approccio A.

B) Si assembla la parte metallica a sbalzo dal concio precedente, si aggancia lo strallo e lo si tesa una prima volta in modo da compensare lo spostamento verso il basso dell'estremo della mensola, riportando il punto di ancoraggio dello strallo alla sua posizione teorica. Successivamente si getta la soletta, si lascia indurire e si tesa nuovamente lo strallo al suo valore finale per compensare i nuovi carichi, dovuti alla costruzione della parte in calcestruzzo della sezione composta. In questo caso la tesatura avviene sempre sull'ultimo strallo messo in opera ma in due fasi successive per ogni stage di costruzione. Nello schema elastico parziale è necessario valutare i due contributi dovuti al solo acciaio e al solo calcestruzzo, valutando separatamente le pretensioni da dare al cavo.

C) Si assembla la parte metallica a sbalzo, si monta lo strallo ancorandolo ad essa e si getta la soletta, così come nell'approccio A senza modificare la lunghezza dello strallo. Successivamente si tesa lo strallo messo in opera e si regola il precedente in modo da compensare gli spostamenti dovuti sia alla fase a mensola che a quella di getto, operando su due stralli contemporaneamente. Si propone questo approccio perché esso permette una compensazione più precisa degli spostamenti e lo schema finale si avvicina maggiormente a quello di trave continua su appoggi rigidi. L'inconveniente è che esso comporta una doppia tesatura di ogni strallo e quindi bisogna ritornare con l'attrezzatura di tiro sugli stralli precedentemente posti in opera e già tesati, per una regolazione. Dal punto di vista degli schemi elastici parziali, la valutazione delle tensioni di prima tesatura e delle regolazioni avviene sempre sullo schema della fase interessata compensando gli spostamenti indotti dai carichi dell'ultimo concio sui punti di ancoraggio dell'ultimo strallo e del penultimo (fig. 2).



**Fig. 2:** Schemi elastici parziali delle fasi. Approccio C

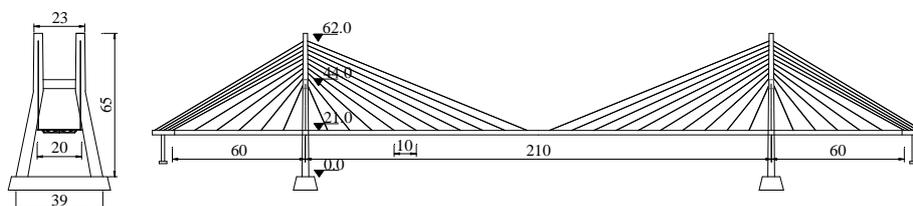
In tutti gli approcci proposti è necessario comunque considerare una regolazione finale, qualora si vogliano compensare anche gli spostamenti dovuti all'applicazione dei carichi permanenti aggiuntivi dovuti a pavimentazione, cordoli, guardrail, marciapiedi e impianti. Inoltre va considerata l'influenza del ritiro e della viscosità, che per la componente assiale, comporta un accorciamento delle parti in calcestruzzo, in particolare le torri. Ciò induce un ulteriore spostamento verso il basso dell'impalcato, dovuto alla variazione di posizione dell'ancoraggio dello strallo sulla torre. Schlaich [1] consiglia di costruire gli elementi di calcestruzzo fin dall'inizio con una lunghezza incrementata del valore di accorciamento previsto per effetto dei fenomeni lenti. Per quanto riguarda gli effetti flessionali di viscosità e ritiro, bisogna tenere conto del fatto che ci si trova in presenza di strutture miste e quindi reologicamente non omogenee. Questo comporta una redistribuzione interna degli sforzi nella sezione dovuta al cambiamento nel tempo della posizione del baricentro della sezione omogeneizzata. La variazione delle caratteristiche inerziali della sezione trasversale d'impalcato induce la nascita di momenti flettenti aggiuntivi rispetto a quelli della configurazione di fine costruzione, anche se si è raggiunto e ottenuto lo schema di trave continua su appoggi rigidi.

Un'ulteriore considerazione va fatta sul punto di ancoraggio dello strallo all'impalcato; quando esso è posto all'estradosso della sezione, si genera un'eccentricità tra baricentro della sezione e punto di applicazione delle forze dei cavi, producendo una coppia concentrata ad ogni strallo. Tale evenienza comporta una variazione del diagramma dei momenti flettenti rispetto a quello teorico di trave continua per carico uniformemente ripartito e viene generalmente amplificata dalla variazione di posizione del baricentro della sezione per effetto dei fenomeni lenti nel tempo.

#### 4 ESEMPIO NUMERICO

Viene presentato un esempio numerico allo scopo di illustrare le conseguenze dei tre approcci proposti attraverso i risultati delle analisi numeriche effettuate. Il caso-studio è quello di un

ponte strallato con due torri in calcestruzzo, campata principale di 210 m di luce, campate laterali lunghe 60 m. Lo schema è a doppio piano di stralli, misto ad arpa-ventaglio e semi-ancorato a terra: si tratta di 21 stralli per semi-impalcato di cui gli ultimi cinque, con funzione di controstrallo, ancorati al suolo. Gli stralli sono distanziati di 10 m sull'impalcato e di 2 m sulla torre. Il peso proprio dell'impalcato è pari a  $q_{d,a} = 100$  kN/m per la parte in acciaio e di  $q_{d,c} = 150$  kN/m per quella in calcestruzzo. Il carico permanente aggiuntivo è  $q_s = 60$  kN/m. L'impalcato è costituito da un cassone monocellulare in acciaio e da una soletta superiore in calcestruzzo, con larghezza totale di 20 m ed altezza di 1.20+0.30 m. Le caratteristiche del cassone in acciaio sono:  $A = 1.27$  m<sup>2</sup>,  $J = 0.397$  m<sup>4</sup>,  $y_G = 0.465$  m (posizione del baricentro). Gli stralli hanno diametro equivalente di acciaio  $\phi_s = 0.125$  m, mentre i controstralli ancorati a terra  $\phi_{bs} = 0.18$  m. La sezione media della torre ha area  $A_t = 10.5$  m<sup>2</sup> e momento d'inerzia  $J_t = 10.8$  m<sup>4</sup>. Il profilo d'impalcato richiesto è parabolico con monta al centro di 1.60 m rispetto agli ingressi del ponte. Modulo elastico del calcestruzzo  $E_c = 30000$  MPa, modulo dell'acciaio  $E_s = 200000$  MPa per l'impalcato e  $E_{sa} = 190000$  MPa per gli stralli.

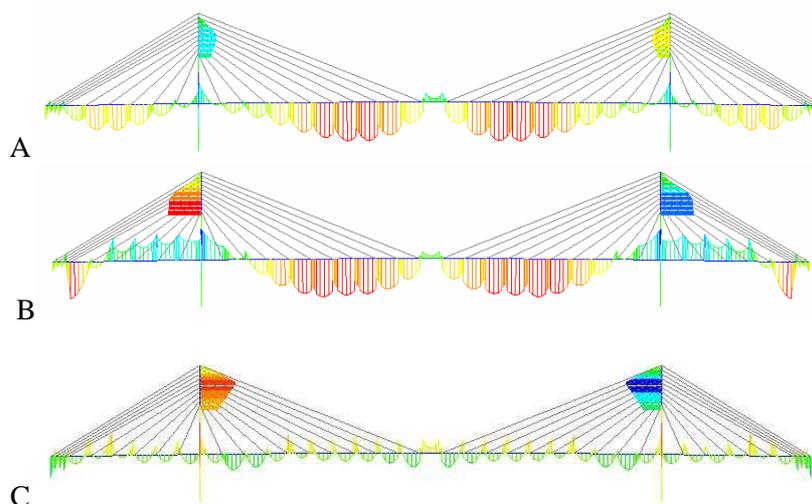


**Fig. 3:** Geometria del ponte in studio

Sono state applicate le tre metodologie sopra esposte per l'individuazione degli sforzi iniziali nei cavi attraverso il metodo degli schemi elastici parziali ed implementate le relative sequenze di tesatura. La tabella 1 fornisce i risultati in termini di massimi momenti positivi e negativi sull'impalcato, spostamenti verticali dell'impalcato e spostamenti orizzontali della torre, a fine costruzione.

**Tabella 1:** Risultati dell'analisi a fine costruzione per i tre approcci

Approccio A				Approccio B				Approccio C			
max M [kNm]	min M [kNm]	$\delta_{vert}$ [cm]	$\delta_{horiz}$ [cm]	max M [kNm]	min M [kNm]	$\delta_{vert}$ [cm]	$\delta_{horiz}$ [cm]	max M [kNm]	min M [kNm]	$\delta_{vert}$ [cm]	$\delta_{horiz}$ [cm]
16050	-9270	-10.94	0.72	18200	-14900	7.67	6.68	4350	-6360	3.54	0.50

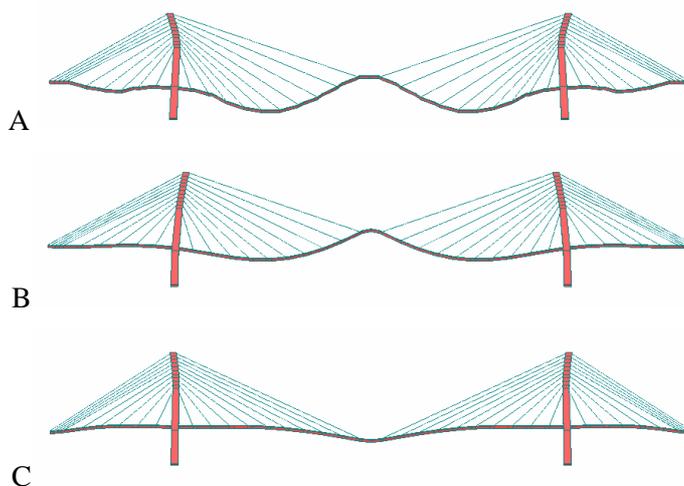


**Fig. 4:** Diagrammi dei momenti flettenti nella fase di fine costruzione per i tre approcci

La figura 4 mostra il confronto tra i diagrammi dei momenti flettenti a fine costruzione, nella configurazione per carichi permanenti, per le tre metodologie proposte. E' evidente che

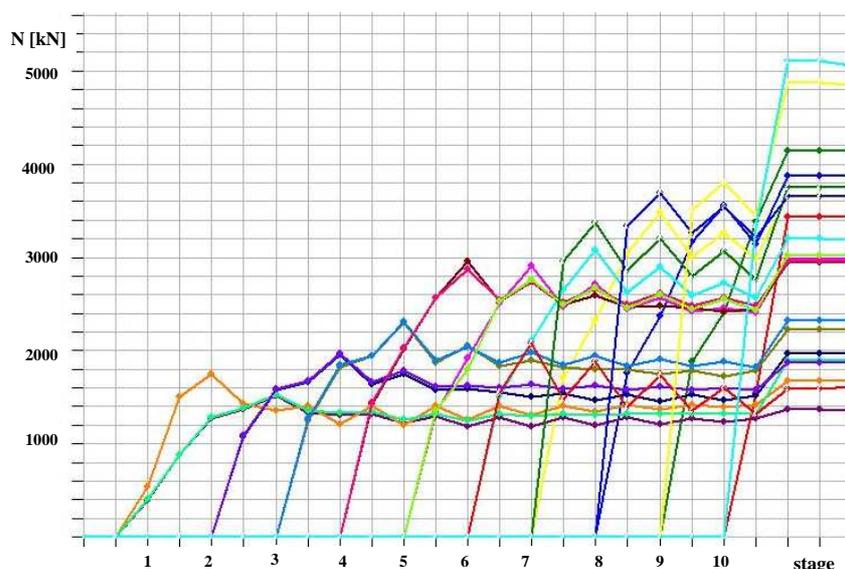
l'unica tesatura degli stralli quando essi vengono posti in opera (approcci A e B) risulta meno vantaggiosa della procedura con doppia tesatura in cui è prevista la regolazione dello strallo precedente (approccio C). Inoltre il diagramma finale approssima bene il comportamento a trave continua solo nell'ultimo approccio. Ciò avviene non solo nella fase finale ma anche in quelle intermedie costituendo un innegabile vantaggio, in quanto i momenti massimi si mantengono sempre dello stesso ordine di grandezza. Va comunque considerato che nei ponti misti con costruzione a sbalzo, la fase a mensola, prima del getto della soletta ed il montaggio dello strallo, comporta sempre l'introduzione di momenti negativi sull'impalcato e ciò deve essere tenuto in conto, anche se si tratta di fasi transitorie.

La figura 5 mostra un confronto delle deformate a fine costruzione. Il raggiungimento del profilo voluto con unica tesatura è un traguardo molto arduo da ottenere; la doppia tesatura dell'approccio C fornisce sempre il risultato migliore.



**Fig. 5:** Deformate a fine costruzione per i tre approcci

Un'ultima considerazione riguarda la differenza tra l'approccio A, in cui lo strallo messo in opera è tesato solo alla fine della costruzione del concio, e quello B in cui si tesa parzialmente per la sola parte metallica a mensola. In effetti quest'ultimo metodo permette di ridurre la curvatura imposta alla trave metallica [1] ma esso è molto più efficace quando ci si riferisce a ponti completamente auto-ancorati.



**Fig. 6:** Grafico degli sforzi negli stralli per le fasi costruttive. Approccio C.

Il ponte parzialmente ancorato a terra si discosta dal comportamento favorevole del ponte auto-ancorato e induce maggiori curvature per effetto del compenso dovuto ai controstralli rigidi ed alla deformazione della campata centrale, quando lo strallo in punta tira l'ultimo concio verso la torre. Nasce in questi casi uno spostamento verso il basso delle sezioni della campata centrale con massimi che non sono in mezzeria ma ad una sezione intermedia, fino anche ad ottenere spostamenti verso l'alto nella zona di mezzeria (deformata approccio A). La fig. 6 riporta il grafico degli sforzi negli stralli per la sequenza di tesatura dell'approccio C.

## 5 CONCLUSIONI

E' stato presentato uno studio sulle sequenze di tesatura dei ponti strallati con impalcato misto acciaio-calcestruzzo, illustrando le problematiche e le peculiarità di questa tipologia strutturale. La determinazione degli sforzi iniziali negli stralli è stata operata tramite schemi elastici parziali delle fasi costruttive, tenendo conto della costruzione a sbalzo del concio metallico e del successivo getto della soletta. Sono state proposte tre possibili sequenze di tesatura e sono stati messi a confronto i risultati dell'analisi su un'applicazione numerica in termini di sollecitazioni e deformazioni a fine costruzione. L'approccio che è risultato maggiormente conveniente è quello che prevede una doppia tesatura degli stralli, quando essi vengono messi in opera e successivamente mediante una singola regolazione. Il progettista può tenere conto di tali indicazioni, quando si trova a dover scegliere una sequenza di tesatura in questo tipo di ponti.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Schlaich M. B. Erection of cable-stayed bridges having composite decks with precast concrete slabs. *Journal of Bridge Engineering ASCE*. 6(5), 333-339. 2001.
- [2] Arici M., Granata M.F., Recupero A. The influence of time-dependent phenomena in segmental construction of concrete cable-stayed bridges. *Bridge Structures*. 7(4). 2011.
- [3] Chen Wai-Fah, Duan L. *Bridge Engineering Handbook*, CRC Press, Washington. 1999.
- [4] Gimsing N.J. *Cable supported bridges. Concepts and design*. John Wiley. 1997.
- [5] Cassity P., He E.Y. Sequential stressing of cable-stayed bridges erected on falsework. *IABSE Conference on cable-supported bridges*. Seoul. 2001.
- [6] Petrangeli M.P. The bridge over the Wadi Dib in Algeria. *L'Industria Italiana del Cemento*. LXIX (743), 362-379. 1999.
- [7] Wang P.H., Tseng T.C., Yang C.G. Initial shape of cable-stayed bridges. *Computers and Structures*. 46(6), 1095-1106. 1993.
- [8] Wang P.H., Tang T.Y., Zheng H.N. Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever methods. *Computers and Structures*. 82, 329-346. 2004.
- [9] Janjic D, Pircher M., Pircher H. Optimization of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges. *Journal of Bridge Engineering ASCE*. 8(3), 131-137. 2003.
- [10] Xiao R., Jia L., Song X., Xiang H. Influence matrix method of cable tension optimization for long span cable-stayed bridges. *IABSE Conference on cable-supported bridges*. Seoul. 2001.
- [11] Recupero A. Initial Cable-Forces Adjustments in Cable-Stayed Bridges: Effects of Parameters Uncertainties. *Advances in Structural Engineering and Mechanics ASEM'04*. Seoul. 2004.

## PAROLE CHIAVE

Ponti strallati, sezioni composte, cavi, sequenze di tesatura, pretensioni