

INFLUENZA DELLE FASI COSTRUTTIVE SULLE CARATTERISTICHE STRUTTURALI DI UN PONTE SOSPESO DI GRANDE LUCE

DANIELE GIUSTI
Ingegnere Strutturista

LUCA SGAMBI
Dottorando in Ingegneria Strutturale
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

FRANCO BONTEMPI
Professore
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

SUMMARY

This paper deals with the construction phases analysis of the long suspension bridge. Many parameters are analyzed to give clear design indication.

1. INTRODUZIONE

I ponti sospesi di grande luce sono strutture complesse, il cui montaggio avviene in molteplici fasi. La costruzione di una tale struttura richiede un periodo di tempo non indifferente, durante il quale le caratteristiche meccaniche della struttura stessa evolvono con l'aggiungersi di nuovi elementi. L'analisi del processo costruttivo di una tale struttura non è semplice e richiede modellazioni numeriche avanzate e specialistiche in grado di tenere conto dell'elevata complessità del problema. In particolare, i principali aspetti che rendono l'analisi di difficile attuazione si possono riassumere nei tre punti seguenti (Giusti, 2004):

- Elevata non linearità geometrica.
- Comparsa di nuove parti strutturali durante l'analisi.
- Mancata conoscenza a priori dell'esatta posizione di montaggio dei nuovi elementi strutturali.

Il primo punto è chiaramente legato alla tipologia strutturale analizzata. L'analisi strutturale di ponti sospesi deve infatti prevedere l'utilizzo di formulazioni cinematiche in grandi spostamenti per tener conto dell'effetto irrigidente fornito alla struttura dall'azione assiale di trazione presente

nei cavi. In particolare è di estrema importanza considerare l'influenza della posizione deformata sulle equazioni di equilibrio (Bontempi, Catallo & Sgambi, 2004).

Il secondo punto è legato alle analisi delle fasi costruttive di una struttura. In strutture grandi e complesse, prima che la costruzione sia terminata la struttura si trova ad avere configurazioni meccaniche anche estremamente differenti da quella finale. Le caratteristiche meccaniche possono perciò variare durante la costruzione ed una loro valutazione in tal senso può essere utile nella scelta del processo costruttivo più adeguato. Chiaramente il codice di calcolo strutturale deve essere in grado di attivare parti di struttura durante l'evoluzione dell'analisi. Questo può essere agevolmente simulato tramite un'analisi suddivisa in vari passi in cui le varie parti di struttura vengono attivate in momenti differenti (*Birth and Deat option*).

Il terzo punto è una diretta conclusione dei primi due. In un'analisi in piccoli spostamenti gli elementi strutturali possono essere attivati nella loro posizione di equilibrio indeformata originaria, mentre in strutture geometricamente non lineari questa procedura non è corretta. Considerare la non linearità geometrica significa infatti considerare varie posizioni di equilibrio durante i vari passi dell'analisi. Le posizioni di equilibrio variano a seconda dei nuovi carichi e della nuova configurazione strutturale raggiunta durante i passi precedenti. Le parti strutturali nuove devono perciò essere attivate nella posizione deformata precedentemente raggiunta. Per questo motivo non è possibile conoscere a priori le esatte coordinate di montaggio delle varie parti.

2. PROBLEMA DI MODELLAZIONE E BACK-ANALYSIS

La problematica messa in evidenza nel paragrafo precedente rientra chiaramente nei cosiddetti *Problemi Inversi* in cui è nota la configurazione finale della struttura ma non i dati di input dell'analisi. Il processo di modellazione può quindi essere suddiviso in due parti, la modellazione delle fasi costruttive propriamente dette e la soluzione del problema inverso. Per quanto riguarda l'analisi strutturale, essa è stata svolta tramite l'utilizzo del codice ADINA in grado di poter far attivare o disattivare elementi strutturali durante l'analisi. Tramite l'uso di questa opzione è possibile conservare intatta la storia strutturale, in termini di stato tensionale e

deformativo, antecedente l'attivazione dei nuovi elementi.

Il problema inverso in questione vede come dato la configurazione finale (che chiameremo di riferimento) della struttura e come incognita la configurazione iniziale (quote di montaggio). Altri dati noti sono naturalmente le caratteristiche meccaniche delle varie parti di struttura (sezioni e materiali) nonché i pesi strutturali e non strutturali (pavimentazioni, protezioni, arredo...). Il metodo di soluzione utilizzato si indirizza verso il processo di modellazione di *Back Analysis* illustrato in Figura 1 e 2.

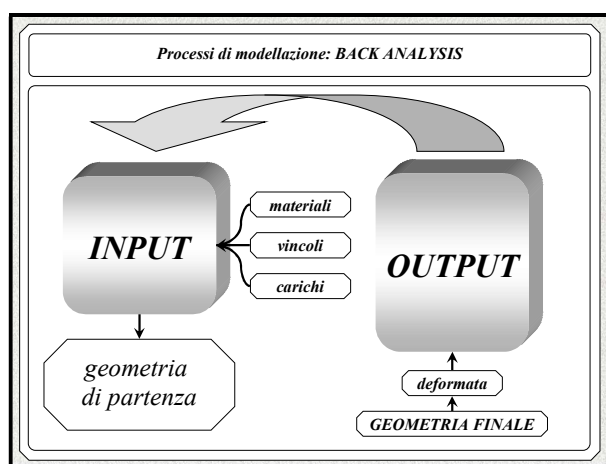


Figura 1. Schema qualitativo del problema inverso.

Le posizioni di montaggio delle varie parti strutturali vengono definite tramite la procedura iterativa mostrata in Figura 2. Variare la posizione (quota) di montaggio dei conci di impalcato comporta l'ottenimento di una configurazione finale differente. Essendo nota la configurazione di riferimento che la struttura deve possedere al termine della costruzione è possibile definire una funzione errore che descriva la lontananza delle configurazioni ottenute da quella di riferimento.

$$E = \sum_{i=1}^n (Z_i^k - Z_i^r)^2 \quad (1)$$

dove con Z_i^k si sono indicate le quote di montaggio dei conci di impalcato durante l'iterazione k , mentre con Z_i^r le quote di riferimento. Il procedimento iterativo atto alla definizione delle quote di montaggio dei conci verrà definito a convergenza quando l'errore espresso dalla Equazione 1 risulterà minore di un'opportuna tolleranza.

2. MODELLAZIONI CONSIDERATE

Le analisi sono state effettuate simulando tre diversi metodi di avanzamento per il montaggio dei conci dell'impalcato (mostrati in Figura 2), in modo da poter confrontare le differenti risposte strutturali dell'opera al variare del processo costruttivo.

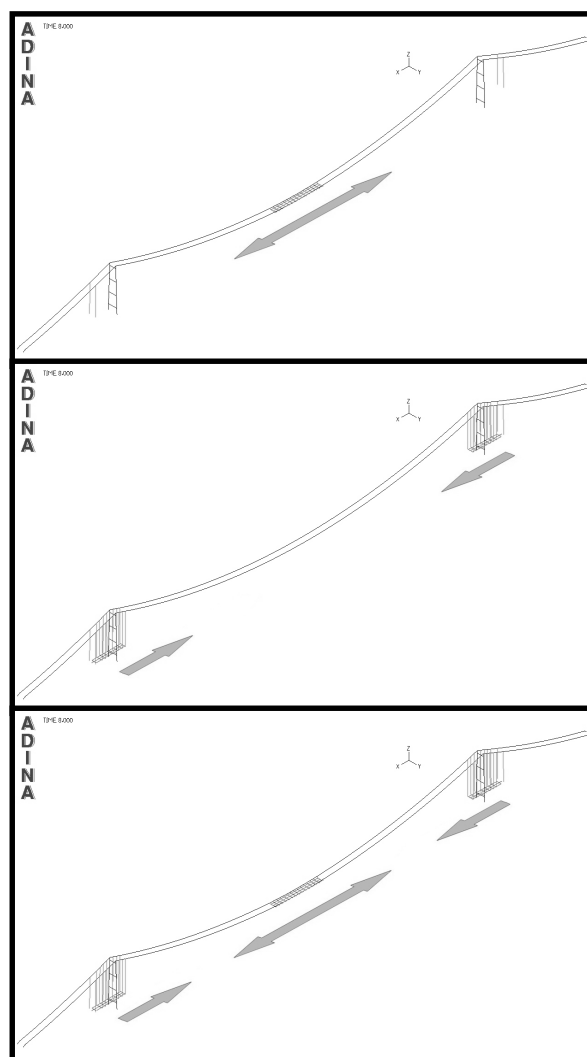


Figura 2. Procedimenti costruttivi simulati nelle analisi numeriche.

Il primo procedimento costruttivo analizzato prevede l'inizio del montaggio dei conci di impalcato dalla mezzeria verso le torri. Nel secondo procedimento i conci vengono montati a partire dalle torri e proseguendo verso la mezzeria. Il terzo procedimento prevede di iniziare il montaggio in tre punti differenti: dalle due torri e dalla mezzeria in modo contemporaneo.

3. DEFINIZIONE DELLA QUOTA DI MONTAGGIO DELL'IMPALCATO

In Figura 3 vengono espone le quote di montaggio calcolate tramite la procedura di back-analisis, la deformata dell'impalcato al termine della procedura di montaggio e la deformata finale dopo l'aggiunta del carico permanente non strutturale. Nel primo processo costruttivo analizzato, l'andamento della quota di montaggio dei conci presenta una sorta di cuspide verso l'alto in mezzeria. Difatti il primo concio ad essere montato è appunto quello di mezzeria e risente più di tutti delle deformate parziali cui è soggetto il ponte nel corso delle fasi costruttive. Il secondo processo costruttivo si presenta qualitativamente come il negativo del caso precedente in quanto i conci di mezzeria sono gli ultimi ad essere montati. L'analisi definisce un andamento della quota di montaggio con una cuspide verso il basso.

In questo caso, la quota di montaggio del concio di mezzeria risulta essere prossima alla quota della deformata sotto peso proprio strutturale.

Il terzo processo costruttivo si presenta come un compromesso fra le due situazioni, mostrando evidenti analogie con i primi due fronti di avanzamento studiati (Figura 3).

Le quote di montaggio di ogni concio dipendono perciò strettamente dal processo costruttivo adottato, in quanto le deformate parziali cui è soggetto il ponte sono intimamente legate allo stato deformativo dei cavi principali. I diversi punti d'applicazione dei carichi, in corrispondenza dei collari di collegamento tra cavi e pendini, implicano evidenti variazioni nelle configurazioni geometriche assunte dai cavi, il cui comportamento può essere quindi assimilato a quello di una fune la cui geometria coincide perfettamente con la curva isostatica di trazione, essendo priva di rigidità flessionale.

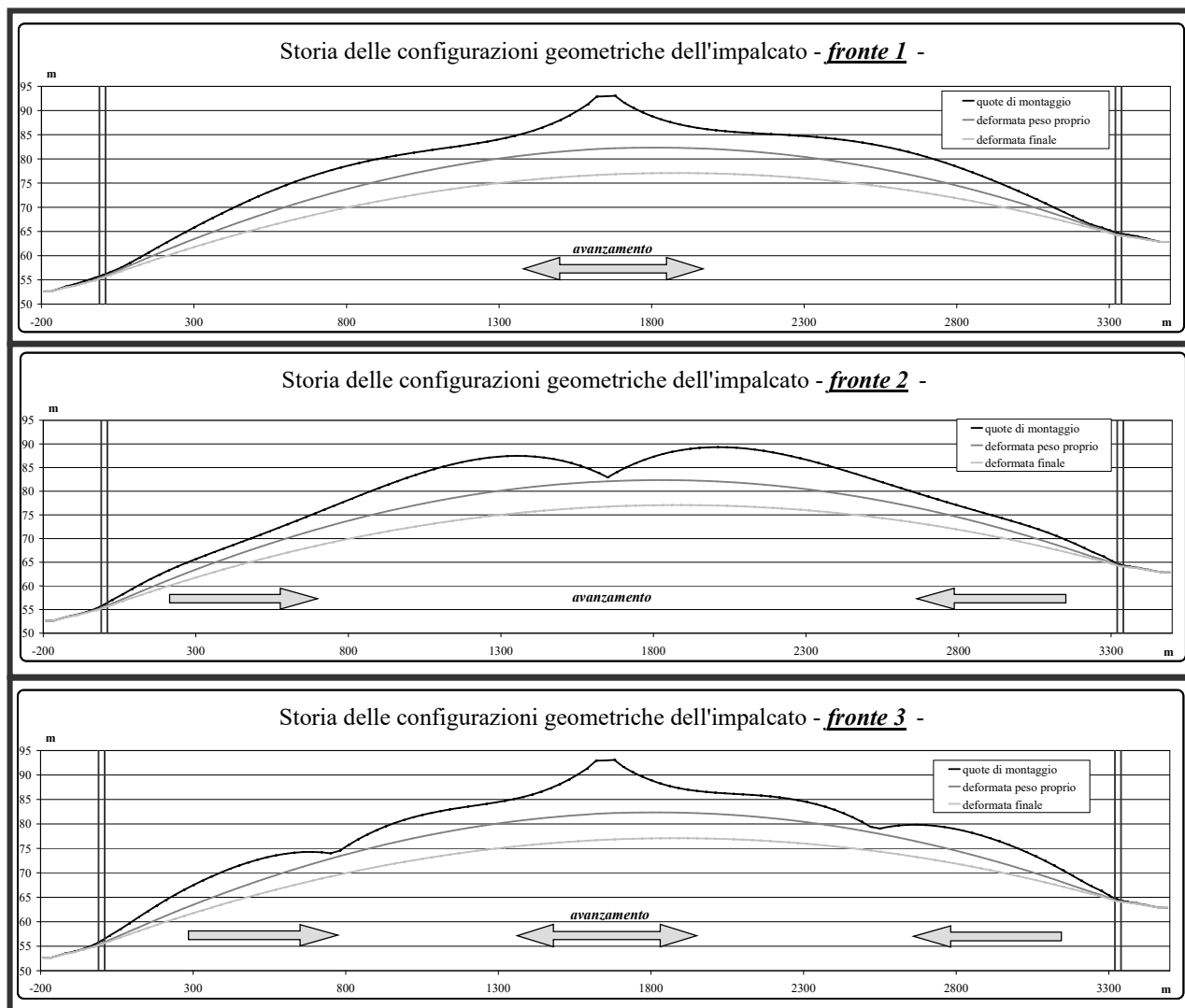


Figura 3. Evoluzione delle quote dell'impalcato durante le fasi costruttive.

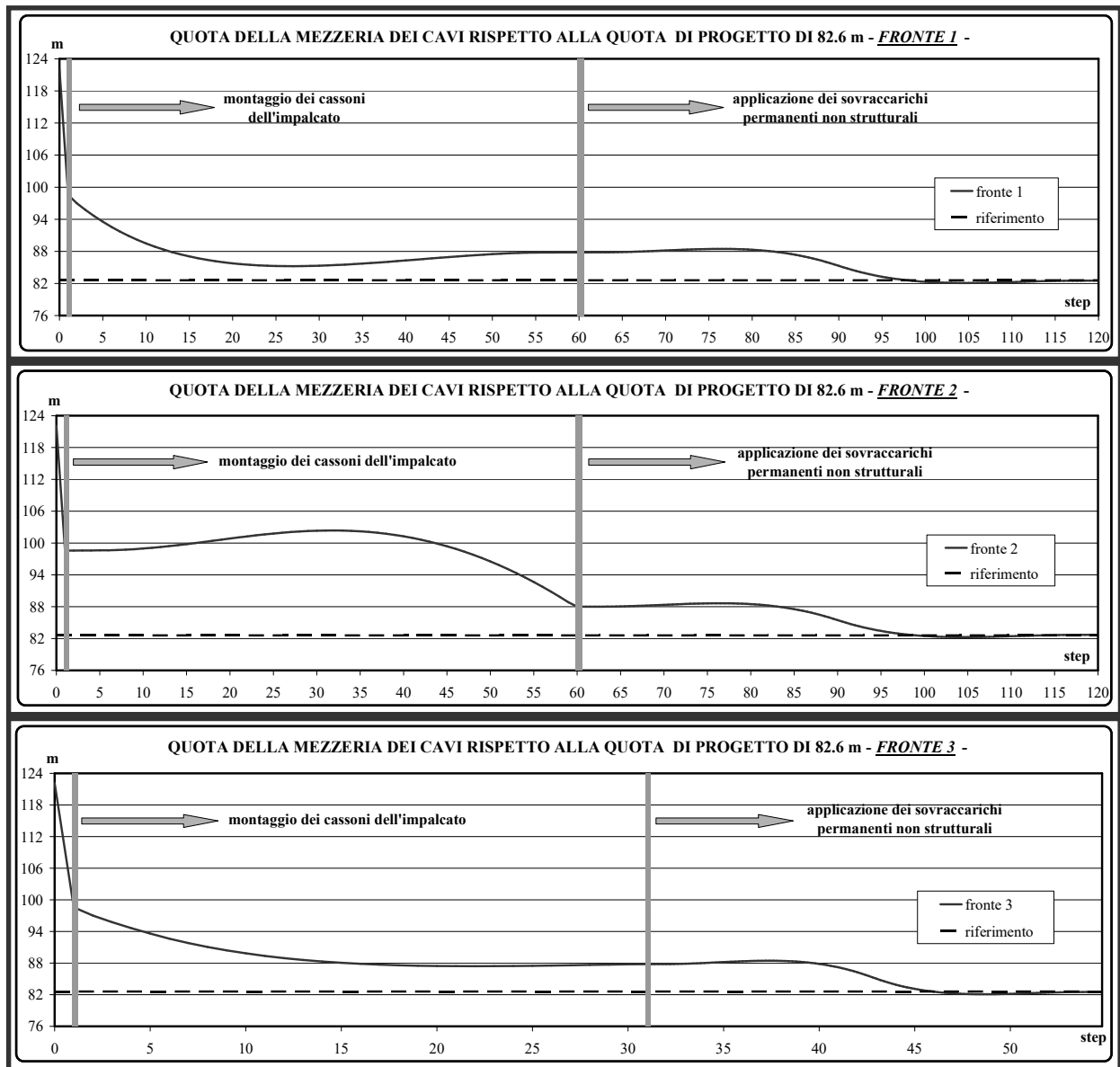


Figura 4. Evoluzione della quota del punto di mezzeria dei cavi principali durante le fasi costruttive.

Le curve di Figura 4 mostrano le quote parziali presentate dalla mezzeria dei cavi nei tre processi costruttivi studiati, in funzione degli step di attivazione dei conci. A tal proposito è importante sottolineare come le deformate parziali, e quindi le quote temporanee della mezzeria, dipendano strettamente dai punti d'applicazione dei carichi. Infatti la mezzeria del ponte (cavi e impalcato) nel fronte 1 (Figura 2) presenta inizialmente degli abbassamenti, in quanto nelle prime fasi costruttive i carichi interessano essenzialmente la zona centrale del ponte, seguiti, con l'incedere della costruzione, da sollevamenti quando i carichi iniziano a decentrarsi e a concentrarsi verso le estremità dell'impalcato.

Al contrario, per le stesse motivazioni, il fronte 2 presenta inizialmente un sollevamento della mezzeria seguito da un abbassamento avente luogo nelle ultime fasi costruttive, che si chiudono con il montaggio del concio di chiave in mezzeria. Il terzo processo costruttivo esaminato si presenta con dei valori mediati fra i primi due, con scarse variazioni di curvatura, a testimonianza di una distribuzione di carico più uniforme. Quanto detto può essere riassunto dall'equazione di equilibrio della fune, che sintetizza perfettamente la risposta strutturale dei cavi durante le fasi costruttive (Gimsing, 1993).

$$(H + \Delta H) \cdot \frac{d^2(z + w)}{dx^2} = p + \Delta p. \quad (2)$$



Figura 5. Comportamento qualitativo dei cavi nei tre processi costruttivi esaminati

Gli incrementi locali di carico Δp possono generare sollevamenti o abbassamenti locali ($\pm w$) che provocano variazioni di curvatura, espressa dalla derivata seconda della quota della fune rispetto all'ascissa di riferimento, responsabili delle diverse configurazioni geometriche assunte dai cavi nei tre processi costruttivi considerati (Figura 5).

E' importante osservare anche la stretta dipendenza, a parità di carico, tra stato deformativi e stato tensionale, espresso in funzione del tiro H della fune.

Successivamente sono riportati i grafici relativi alle variazioni dello stato di sforzo trasmesso ai cavi durante le fasi di montaggio dell'impalcato, ottenuti prendendo come riferimento i punti più significativi dei cavi principali (Figura 6).

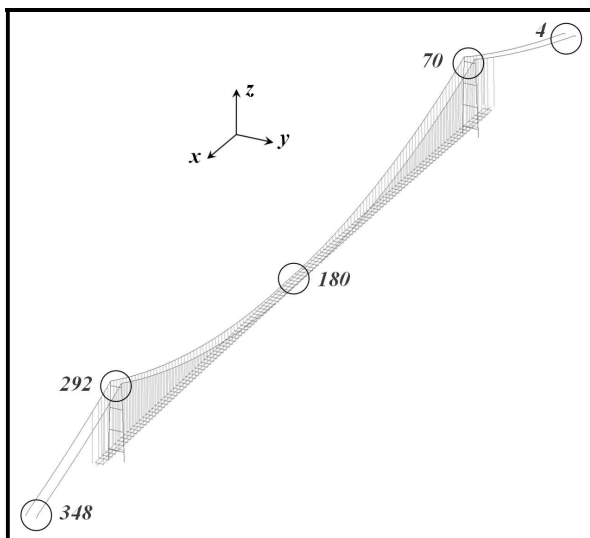


Figura 6. Punti di misura dell'azione assiale nei cavi principali.

4. ANALISI DELL'AZIONE ASSIALE NEI CAVI PRINCIPALI

I punti di misura dell'azione assiale nei cavi principali vengono posizionati nelle zone (Figura 6):

- in prossimità degli ancoraggi terminali (punto 4 e 348)
- in prossimità delle torri (punto 70 e 292)
- in prossimità della mezzeria dell'impalcato (punto 180)

I relativi grafici sono riportati in Figura 7. Benché l'opera non possieda una perfetta simmetria, le curve relative a punti di misura opposti rispetto la mezzeria del ponte, sono risultate pressoché coincidenti.

Si può osservare che, a parità di carico, durante le fasi costruttive, gli sforzi di trazione trasmessi ai cavi nel fronte 1 (Figura 7) sono sempre maggiori di quelli relativi al fronte 2, confermando quindi la perfetta analogia con la teoria della fune, nel rispetto della suddetta equazione di equilibrio.

Gli sforzi di trazione relativi al terzo processo costruttivo presentano, come per le deformate, dei valori mediati tra i due casi precedenti, ad ulteriore conferma di una distribuzione di carico più uniforme.

In tutti i procedimenti costruttivi analizzati, il tiro maggiore risulta essere nella zona in prossimità della torre, mentre quello minore in mezzeria.

E' interessante notare che in tutti i procedimenti analizzati, le curve di variazione dello sforzo assiale rimangono pressoché parallele (Figura 7) e la differenza fra le azioni assiali in mezzeria e nella zona delle torri rimane immutata al variare del processo costruttivo.

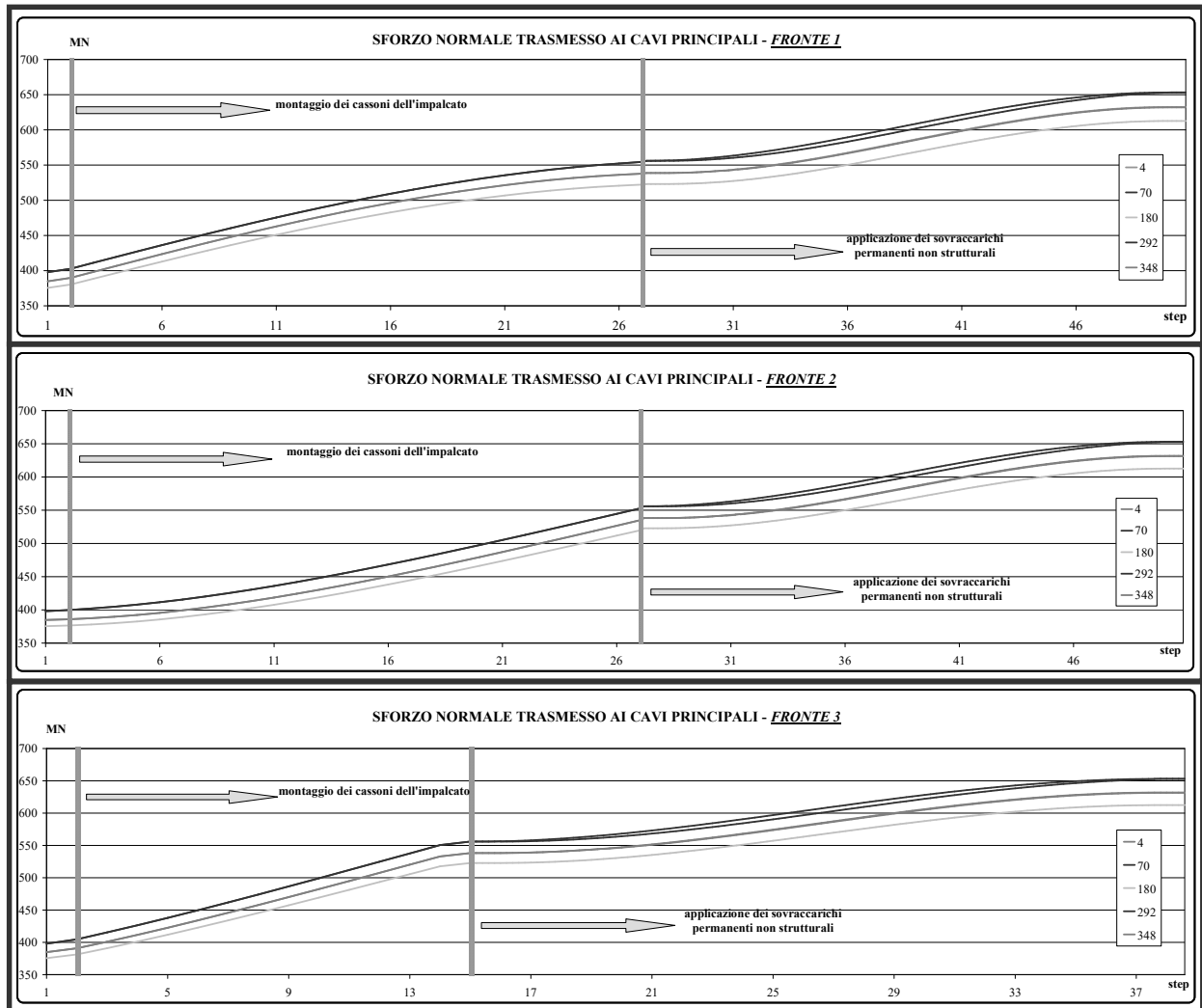


Figura 7. Evoluzione dell'azione assiale presente nei punti di misura dei cavi principali durante le fasi costruttive.

5. ANALISI DEI MODI DI VIBRAZIONE PRINCIPALI

A tal proposito sono stati esaminati, per ogni fase costruttiva, i modi di vibrare lungo la direzione trasversale del ponte, dove la struttura manifesta la maggior flessibilità, con le oscillazioni più ampie e periodi propri più elevati. Le curve mostrate in Figura 8 mostrano le variazioni del periodo proprio del ponte dei modi di vibrare che eccitano la maggior parte della massa nei tre processi costruttivi esaminati e nelle tre direzioni Cartesiane (trasversale, longitudinale, verticale). Il periodo proprio dell'opera, quando sono montati i soli cavi si aggira fra i 30 e i 31 secondi, ovviamente per tutti i fronti, per poi assumere delle variazioni diverse a seconda del tipo di montaggio eseguito per l'impalcato.

Esaminiamo i grafici presenti in Figura 8 relativi al modo di vibrare trasversale. Il primo processo costruttivo presenta un graduale aumento, quasi lineare, del periodo, dovuto al progressivo aumento della massa in corrispondenza della mezzera. Il comportamento è analogo a quello di un pendolo la cui massa aumenta nel tempo (Figura 9).

La struttura, con il procedere delle fasi costruttive, aumenta considerevolmente la sua massa ma non la sua rigidità, che assume in parte in corrispondenza del montaggio del collegamento tra l'impalcato e la torre. Viene quindi a generarsi in questo modo il primo vincolo alla traslazione trasversale che, conferendo rigidità alla struttura, produce un significativo abbassamento del periodo. Un ulteriore importante abbassamento del periodo si ha al completamento dell'impalcato, con il montaggio dei conci di

estremità, a diretto contatto con le campate laterali appoggiate, che formano un secondo vincolo alla traslazione trasversale.

L'ultima fase riguarda l'applicazione dei carichi permanenti. In questa nuova configurazione si manifestano due fenomeni diversi ma compartecipanti. Infatti, da una parte si manifesta un aumento di massa globale in corrispondenza dell'impalcato, mentre dall'altra i carichi agenti sull'impalcato contribuiscono ad aumentare la rigidità della struttura, aumentando la trazione nei cavi (le analisi sono eseguite in presenza di non linearità di geometria).

In tutti i processi costruttivi analizzati, il periodo proprio di vibrazione in questa fase ha un aumento, per cui si può affermare che l'effetto dell'aumento di massa è sempre preponderante rispetto all'effetto dell'aumento di rigidità.

Chiaramente, il periodo proprio finale si attesta in un unico valore (circa 31.1 secondi) per tutte le analisi eseguite.

La curva relativa al fronte 2 mostra invece un andamento completamente diverso. La struttura, nelle prime fasi di montaggio, presenta un aumento di massa che stavolta è accompagnato da un aumento in rigidità, perché i primi conci, in questo caso, sono montati direttamente a contatto con le campate laterali, già vincolate. Nelle prime fasi si osserva perciò una diminuzione del periodo, in quanto l'oscillazione coinvolge il solo sistema di sospensione (Figura 9), che con l'incedere della costruzione diviene più rigido. In seguito al montaggio della metà dei conci si osserva poi un'inversione di tendenza, con un progressivo aumento del periodo.

I periodi propri parziali del terzo processo costruttivo, come per le altre grandezze finora studiate nei precedenti paragrafi, presentano una sorta di compromesso tra le due situazioni, con una certa predilezione per il comportamento a pendolo caratteristico del fronte 1.

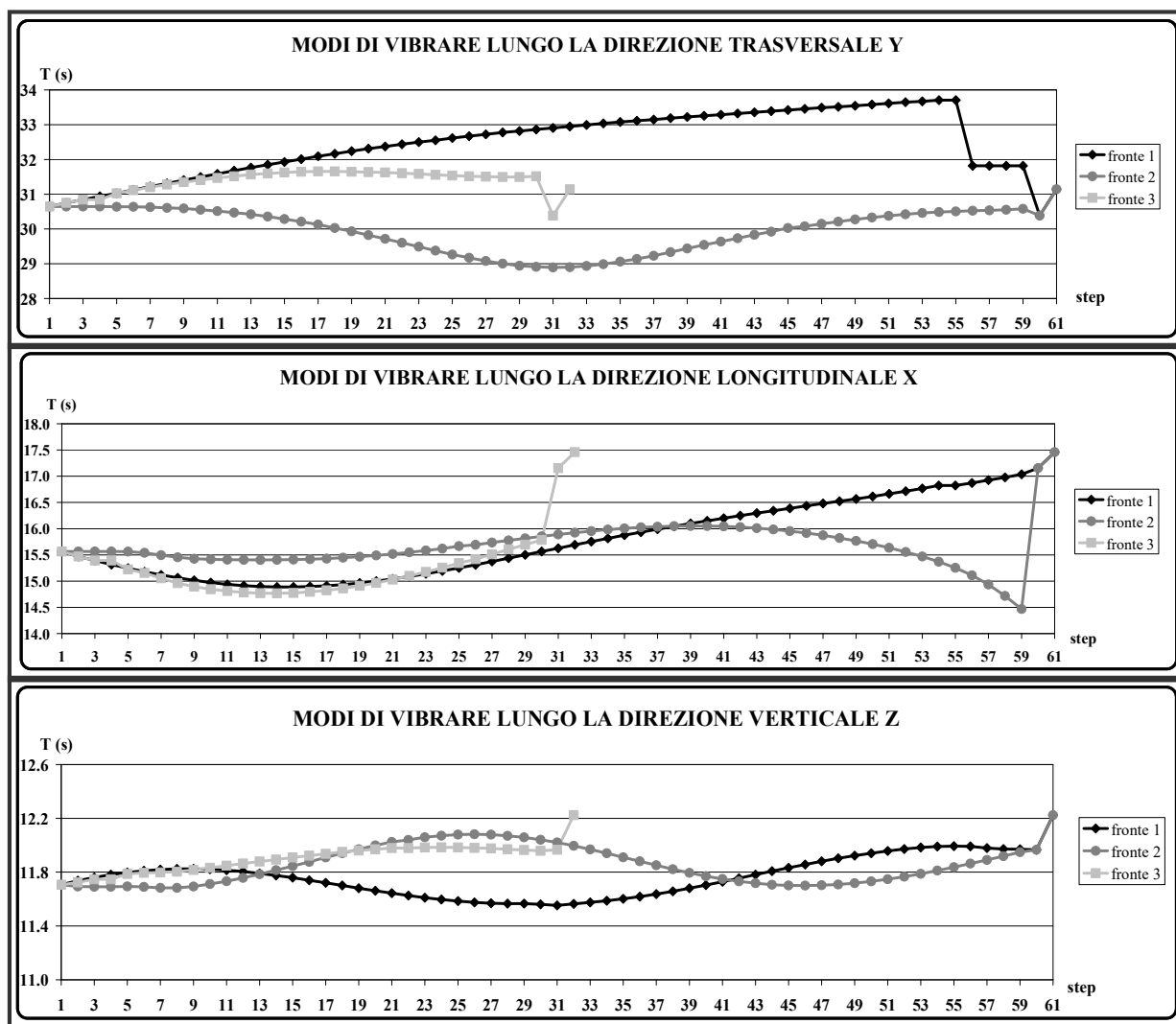


Figura 8. Evoluzione dei modi principali di vibrazione durante le fasi costruttive.

Osservazioni analoghe possono essere eseguite per i modi di vibrazione in direzione longitudinale e verticale.

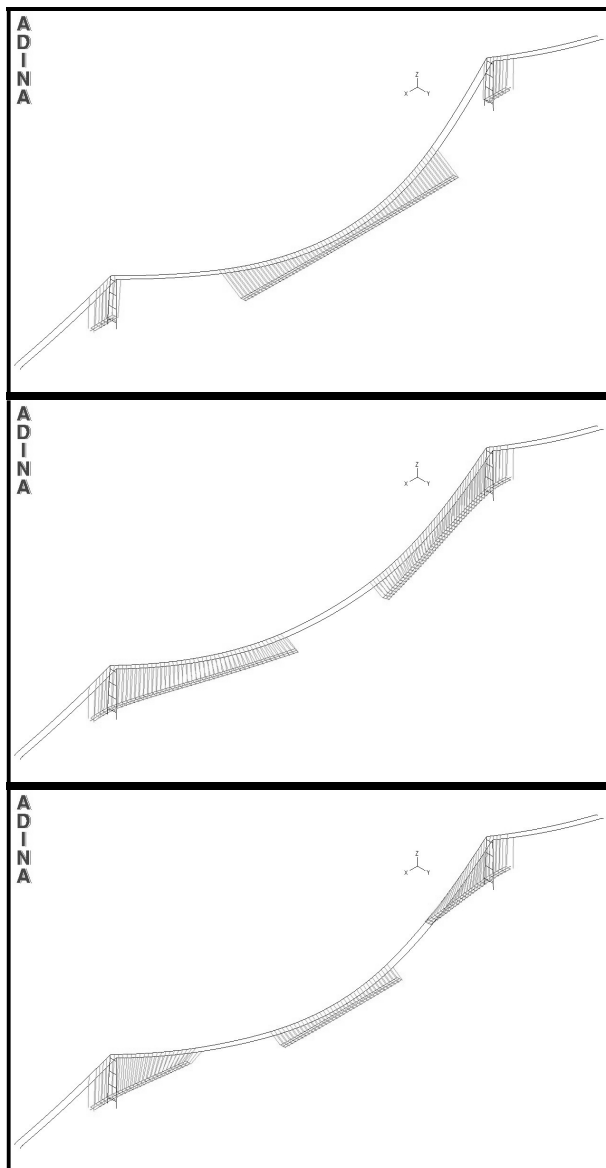


Figura 9. Immagini qualitative del modo di vibrazione principale nei tre procedimenti costruttivi analizzati.

6. CONCLUSIONI

L'analisi dei procedimenti costruttivi è di fondamentale importanza nelle grandi opere. L'analisi numerica svolta permette di dare chiare indicazioni sul processo costruttivo, fornendo le variazioni temporali di grandezze significative quali la tensione nei cavi o i modi propri di vibrare della struttura. In questo modo il progettista può

orientarsi verso la metodologia costruttiva più adeguata.

7. RIGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato reso possibile grazie al finanziamento COFIN2002 e ad altri fondi di ricerca dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", di cui è responsabile scientifico il professore Franco Bontempi.

8. BIBLIOGRAFIA

- [01] **E. F. RADOONA**, "Tecnica delle costruzioni – Sicurezza strutturale, analisi delle costruzioni, analisi della risposta", seconda edizione, Zanichelli, 1993.
- [02] **N. J. GIMSING**, "Cable supported bridges – Concept and design", second edition, John Wiley & Sons, 1993.
- [03] **L. SGAMBI**, "Valutazione ed accuratezza dei codici di calcolo per l'analisi strutturale", Giornata LUSAS, Roma, 16/01/2004.
- [04] **F. BONTEMPI**, "Il ponte sullo Stretto di Messina. Impostazione concettuale del processo di progettazione ed analisi di strutture complesse". Notiziario dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, n.° 445 – marzo/aprile 2003.
- [[05] **R. CALZONA & F. BONTEMPI** "Research activity for the definition of the conceptual framework and the operative tools for the design and the analysis of the Messina Strait Bridge". Materiali e tecnologie per i grandi ponti del XXI secolo, Roma, 28/02/2003.
- [06] **D. GIUSTI** " Modellazione del processo costruttivo per fasi nei ponti sospesi", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", aprile 2004.
- [07] **F. BONTEMPI, L. CATALLO & L. SGAMBI** "Structural analysis and design of long span suspension bridges with regards to nonlinearities, uncertainties, interactions and sustainability", IABMAS Conference 2004, Kyoto, Japan, 19-22 October 2004.