

Mario de Miranda
Michel Petrequin

Storebaelt East Bridge Aspetti del montaggio e della realizzazione

Lo Storebaelt East Bridge, con una lunghezza totale di 6.8 chilometri ed una campata centrale lunga 1624 m, è uno dei più grandi ponti finora costruiti nel mondo.

La sua realizzazione ha richiesto e comportato speciali procedure di montaggio quali l'installazione di un gran numero di intere travate, lunghe 193 m e del peso di 2400 t, nonché l'installazione di grandi elementi d'impalcato del ponte sospeso, con punte di produttività dell'ordine dei 3000 m² d'impalcato al giorno.

La sua costruzione ha anche richiesto il contributo ed una forte cooperazione tra Società e Gruppi provenienti da molti differenti Paesi, con un rilevante apporto italiano. Tecnici provenienti da Danimarca, Italia, Francia, Regno Unito, Olanda e Stati Uniti hanno partecipato al progetto. Main contractor per le sovrastrutture è stata infatti l'italiana COINFRA S.p.A., che ha completato l'opera di IRITECNA e CMF Sud, che vinsero la gara d'appalto nel 1992. Gli studi sul montaggio del ponte sono iniziati nell'estate del '94 e nel febbraio '95 è iniziato il montaggio degli impalcato. I viadotti d'accesso sono stati completati nel 1996 mentre il montaggio del ponte sospeso è terminato nel dicembre 1997. L'East Bridge è stato inaugurato nel giugno 1998. Le caratteristiche principali del ponte (fig. 1) sono riportate nella tabella qui sotto.

Lo Storebaelt East Bridge, recentemente realizzato in Danimarca, comprende un ponte sospeso lungo 2694 m con campata centrale di 1624 m e due viadotti d'accesso, con lunghezza di 1.5 e 2.5 km e campate di 193 m di luce.

Nella memoria vengono descritte le principali procedure adottate per il montaggio delle travate e discusse alcune scelte tecniche operate.

Vengono illustrati e discussi alcuni problemi posti dal montaggio di strutture di grandi dimensioni insieme alla loro soluzione. Vengono infine brevemente illustrati alcuni aspetti delle analisi strutturali sviluppate nell'ambito della progettazione per la messa in opera delle travate.

Storebaelt East Bridge Assembly and completion aspects

The Storebaelt East Bridge, recently built in Denmark, includes a major suspension bridge with a 2694 m total length and 1624 m central span, and two approach viaducts 1.5 km and 2.5 km long, with 193 m typical spans.

The paper describes the main erection procedures and some relevant technical decisions.

A discussion on problems related to the erection of large structures and their solution is also given. Some aspects of the analysis performed during the erection design are briefly reported and discussed.

Lunghezza totale:.....6.8 km	Altezza navigabile:65 m
Lunghezza dei viadotti di accesso:1.567 km (lato Sprogø) +2.529 km (lato Halskov)	Altezza delle antenne (s.l.m.m.):.....254 m
Lunghezza del ponte sospeso:.....2.694 km (535+1624+535) m	Larghezza dell'impalcato:31.20 m (ponte sospeso) 25.80 m (viadotti di accesso)
	Massa totale delle travate:.....83500 t
	Massa totale dei cavi:.....19700 t

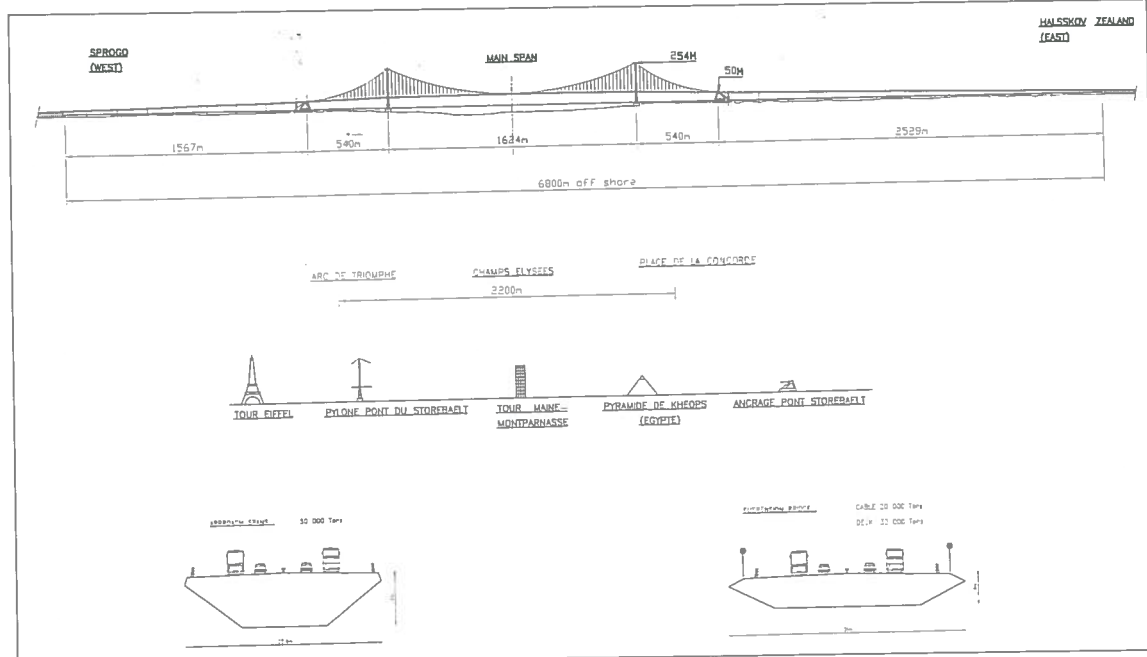


Fig. 1
Profilo
longitudinale.

Per evidenti questioni logistiche la sequenza della realizzazione delle sovrastrutture ha comportato innanzitutto il montaggio dei viadotti d'accesso e quindi, ottenuta l'agibilità ai blocchi d'ormeggio, dei cavi e dell'impalcato del ponte sospeso.

Questa sequenza verrà mantenuta nella presente descrizione, pur essendo il ponte sospeso di maggior importanza e richiamo rispetto ai viadotti d'accesso, che peraltro rappresentano di per sé un'opera di grande interesse per le notevoli dimensioni, ed il metodo di montaggio, mai utilizzato in passato per una simile combinazione di grandi luci e grande numero di travate da installare.

IL MONTAGGIO DEI VIADOTTI D'ACCESSO

Descrizione delle strutture

Le travate dei due viadotti d'accesso hanno luci tipiche di 193 m; nella configurazione finale hanno schema di trave continua con appoggi fissi sulle pile centrali di ciascun viadotto.

Le travate hanno sezione scatolare di larghezza pari a 25.80 m e di altezza pari a 6.70 m, con un'anima verticale centrale e due anime laterali inclinate (fig. 2).

Ad un passo di 4.0 m sono previste nervature trasversali e diaframmi reticolari realizzati con profili tubolari; sugli appoggi sono presenti diaframmi a parete piena.

L'acciaio utilizzato è del tipo Fe E 420, con una tensione di snervamento di 420 Mpa.

Il peso strutturale di una travata tipica di 193 m è pari a circa 2400 t.

La struttura risulta quindi particolarmente snella e leggera, con un peso unitario inferiore a 0.500 t/m², valore decisamente ridotto in considerazione delle grandi luci delle campate.

Peraltro questa ottimizzazione strutturale è stata condotta dai progettisti con riferimento al ponte nella sua configurazione finale di trave continua, disponendo il materiale secondo gli andamenti dei momenti flettenti corrispondenti a tale configurazione. Ciò ha quindi comportato, per quanto riguarda le attività di montaggio, uno sforzo progettuale significativo, seppure stimolante, per gestire e con-

trollare le rilevanti azioni e sollecitazioni che si stavano su differenti schemi strutturali nelle varie fasi della costruzione.

Sistema di montaggio dei viadotti d'accesso

Le travate scatolari sono state fabbricate in tre diverse fasi:

- a Livorno sono stati fabbricati i pannelli di lamiera irrigidita;
- a Sines (Portogallo) sono stati assemblati elementi d'impalcato della lunghezza tipica di 48 m;
- ad Aalborg (Danimarca) sono state assemblate le travate a piena lunghezza.

Tutte le giunzioni, nelle tre fasi descritte e nelle successive fasi in opera, sono state realizzate mediante saldature a piena penetrazione.

La travata continua d'impalcato è stata realizzata seguendo, in generale, le seguenti fasi operative:

- Carico dell'intera travata su di un natante e trasporto della stessa da Aalborg fino ad Halsskov, con un tragitto in mare di circa 300 km.
- Posizionamento e ormeggio del natante e di un pontone ausiliario e successivi sollevamenti della travata per mezzo di una speciale gru, installata all'estremità della travata precedentemente montata, e di un pontone galleggiante.
- Posa della travata su una serie di appoggi provvisori: la sezione d'estremità posteriore rimaneva sospesa alla gru fissa e allineata alla sezione già montata mentre la estremità in avanzata veniva posizionata su una struttura ausiliaria, ad una altezza di circa 4.50 m al di sopra del livello degli appoggi definitivi.
- Dopo il taglio a lunghezza finale della sezione per adattarsi alla esatta distanza tra le pile e della lunghezza effettiva della travata già montata, venivano saldati i giunti di testa fra le adiacenti travate.
- Abbassamento della travata sull'appoggio in avanzata e conseguente applicazione alla sezione sulla pila precedente di un momento flettente negativo che, sommato ai momenti delle fasi successive al termine delle fasi esecutive, fornirà il valore del momento di progetto sulla pila.

Queste fasi vengono nel seguito brevemente illustrate.

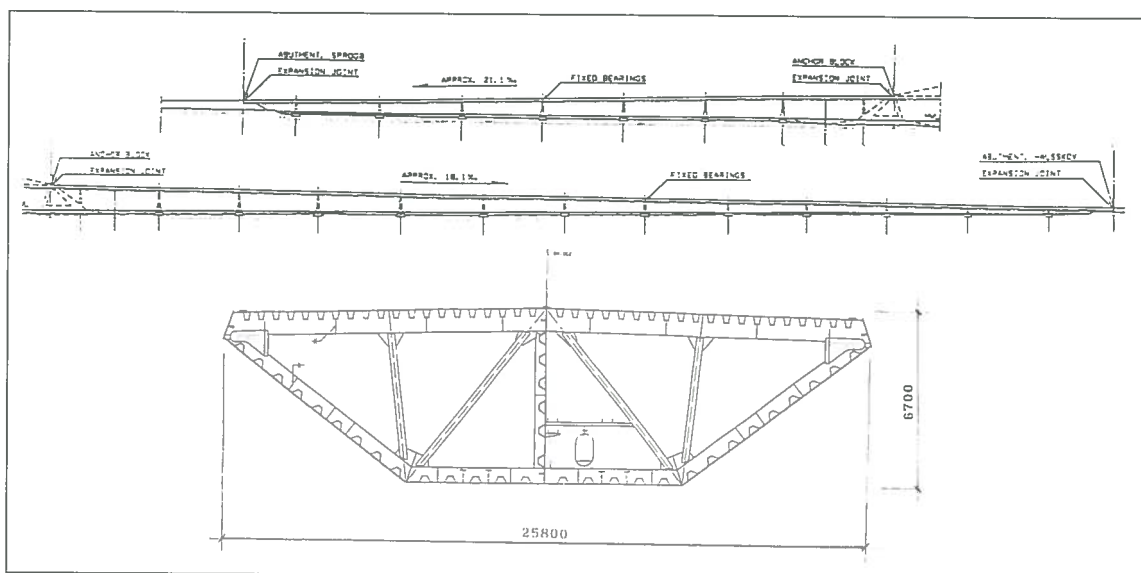


Fig. 2
Viadotti d'accesso:
profilo e sezione
trasversale
della travata.

Carico e trasporto via mare. Il trasferimento della travata sul natante è stato realizzato per mezzo di speciali carrelli con carico equiripartito e controllato via computer e cilindri idraulici (fig. 3a, b).

Con questo sistema veniva assicurato, a terra, un carico pressochè uniforme per tutti i punti d'appoggio, evitando sovratensioni locali nelle varie fasi di trasporto.

La travata veniva quindi caricata su di una "chiatta" di circa 110 m di lunghezza, appoggiata su due serie di appoggi elastomerici e vincolata con un sistema di ritenute (fig. 4).

Gli appoggi elastici sono stati progettati in modo da limitare le massime reazioni d'appoggio durante il trasporto via mare e durante il sollevamento delle travate.

In effetti il progetto del sistema d'appoggio era governato da due effetti contrastanti:

- Da una parte, l'esigenza di distribuire il carico verticale e sostenere i carichi dinamici indotti dall'azione del vento e del moto ondoso (beccheggio e rollio incrementavano sensibilmente le reazioni) induceva ad adottare un gran numero di appoggi.

Inoltre, data la diversità di lunghezza fra travata e natante, gli appoggi risultavano in parte ubicati nelle zone di minori spessori strutturali, in cui per carichi permanenti a struttura completata si avevano minimi momenti flettenti, ben diversamente da quanto si sarebbe verificato durante il trasporto.

- Dall'altra parte il gradiente termico tra estradosso ed intradosso della travata tendeva a produrre, nelle giornate soleggiate, una sensibile deformazione longitudinale con profilo convesso e di conseguenza un forte aumento delle reazioni degli appoggi più estremi.

Tale aumento dipendeva sia dalle rigidità elastiche reciproche fra travata e natante, che dalla rigidità degli appoggi stessi e dal loro numero.

Per l'analisi di questi effetti ed il conseguente dimensionamento e ottimizzazione dei supporti e la verifica locale delle strutture d'impalcato interessate, furono quindi innanzitutto analizzate, in campo statico e dinamico, l'interazione fra travata, natante e sottospinta idraulica, e quindi analizzate e verificate a livello locale lo stato tensionale e di stabilità delle strutture d'impalcato soggette alle azioni localizzate dei supporti.

Le operazioni di sollevamento. Le travate, come accennato, sono state sollevate e poste in opera per mezzo di una coppia di gru di grande portata (fig. 5). La prima, detta BLS (Bridge Lifting System) era una speciale attrezzatura, zavorrata ad acqua, del peso di circa 900 t e con una portata di 1400 t, che veniva appoggiata ad una estremità della travata già montata.

Il carico applicato sulla travata già montata veniva quindi a variare da un minimo di 900 t ed un massimo di circa 2300 t.

La seconda, il Taklift 4, era una gru su natante con una portata di 1400 t in grado di sollevare, ruotare e posizionare sugli appoggi provvisori la travata (fig. 6a,b,c,d,e).

Mentre all'estremità anteriore era possibile sostenere la travata in corrispondenza del diaframma di



Fig. 3 a, b
Trasporto a terra
di una travata.



Fig. 4
Trasporto
via mare.

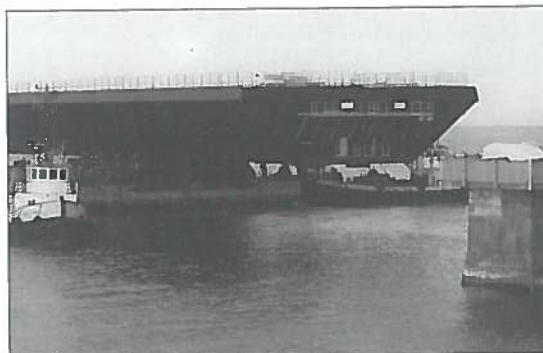


Fig. 5
Fasi
di sollevamento
di una travata
del viadotto
lato Halskov.



testata, cioè in una sezione di grande resistenza, all'estremità posteriore, la sezione era di tipo aperto e per sostenere e distribuire le reazioni d'appoggio erano disponibili soltanto i diaframmi reticolari interni, relativamente leggeri.

Fu quindi ideato e progettato un sistema di travi di distribuzione in grado sia di ripartire le reazioni di sospensione (circa 1250 t) sui diaframmi, che di irrigidire localmente i diaframmi stessi, pur mantenendo un peso limitato per non incidere sulla portata della gru.

Tutti i punti di ancoraggio per il sollevamento, sulla travata, sono stati progettati con giunzioni bullonate allo scopo di consentirne il riutilizzo e per evitare saldature e possibili indebolimenti per fatica nelle sezioni resistenti della struttura della travata (fig. 7). Problemi particolari sono stati posti dalle travate in prossimità dei blocchi d'ormeggio, di minore lun-



Fig. 6 a,b,c,d,e
Installazione
della travata
n. 2.

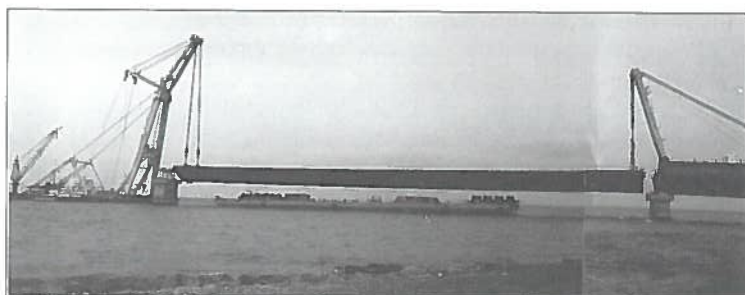


Fig. 7
Dispositivi
di sollevamento.



Fig. 8
Sollevamento
della travata
n. 14,
travata di arrivo
sul blocco
d'ormeggio.

ghezza, che furono installate utilizzando una coppia di gru in quanto l'ingombro dei blocchi d'ormeggio ne limitava fortemente l'accesso (fig. 8).

Le operazioni di saldatura. L'attività di saldatura della giunzione tra due travate aveva luogo dopo il taglio dell'estremità del giunto alla lunghezza finale ed il preciso posizionamento dell'estremità della travata mediante martinetti idraulici.

Per assicurare il posizionamento delle lamiere adiacenti e per garantire una adeguata resistenza al giunto nelle prime fasi transitorie della saldatura sono stati previsti, ed ottimizzati in dimensione e numero, una serie di piastre provvisorie (cavalletto) a cavallo del giunto.

Veniva quindi effettuata, nelle ore notturne per evitare movimenti dovuti ai gradienti termici verticali e orizzontali, una saldatura di prima fase in grado di garantire sufficiente resistenza al giunto nelle successive ore diurne, in cui venivano quindi completate le operazioni di saldatura.

Tutte le operazioni di preparazione, saldatura e controllo, venivano effettuate in uno speciale "shelter" autovarante, con struttura a sbalzo sostenuta con carrelli gommati posizionati sui bordi superiori dell'impalcato.

Ottimizzazione dei momenti flettenti. Come accennato, le travate dei viadotti d'accesso al termine delle operazioni di montaggio e dell'applicazione dei carichi permanenti presentano, conformemente alle specifiche di progetto, una distribuzione di momenti flettenti bilanciata, con momenti negativi sugli appoggi pressoché uguali in valore assoluto ai positivi in campata.

Tuttavia nelle prime fasi di sollevamento e posa sulle pile, ciascuna travata presentava chiaramente un diagramma di momenti corrispondente allo schema di vincolo di trave in semplice appoggio.

Di conseguenza le procedure di montaggio sono state progettate in modo da far evolvere la distribuzione dei momenti flettenti dalla situazione iniziale di posa a quella finale di progetto, con le fondamentali condizioni di garantire sia il rispetto delle caratteristiche di resistenza della travata che il rispetto della geometria finale dell'impalcato. A tale scopo si è operato nel modo seguente (fig. 9):

- Dopo le varie fasi di sollevamento la travata tipica veniva disposta su appoggi provvisori in posizione angolata, in senso longitudinale, rispetto alla travata precedente: l'appoggio in avanzata era posizionato ad una quota superiore di circa 4.50 m rispetto all'appoggio posteriore.
- Veniva quindi realizzata la giunzione saldata fra le due travi adiacenti, operando in modo da controllare i sensibili movimenti (dell'ordine di centimetri), nonché le tensioni indotte dalle variazioni termiche differenziali.
- terminate le operazioni di saldatura, operando con gru galleggianti da 1400 t, l'estremità anteriore della travata veniva sollevata e veniva rimosso l'appoggio anteriore, facendolo scorrere su un telaio ancorato alla sommità della pila; veniva quindi lentamente abbassata l'estremità anteriore della travata inducendo di conseguenza un momento flettente negativo sull'appoggio retrostante e dei momenti di segno alternato sui precedenti appoggi.

Tutte le fasi esecutive sono state quindi studiate mediante una analisi passo-passo che teneva conto della successione di applicazioni e rimozioni dei carichi di costruzione e della progressiva evoluzione degli schemi strutturali (fig. 10).

Nella definizione del sistema di abbassamento dell'estremità anteriore della travata sono state valutate diverse procedure alternative.

Inizialmente è stata prevista e studiata una procedura tradizionale di abbassamento progressivo mediante calaggi e martinetti.

Allo scopo di accelerare i tempi di montaggio fu viceversa ideata e realizzata una procedura più drastica: usare una gru su pontone per sostenere temporaneamente l'estremità delle travate, rimuovere il telaio frontale di supporto facendolo scorrere longitudinalmente su vie di corsa a sbalzo, e abbassare quindi la travata sugli appoggi in pila (fig. 11).

Queste operazioni hanno richiesto di sfruttare in pieno la capacità della gru in quanto era necessario

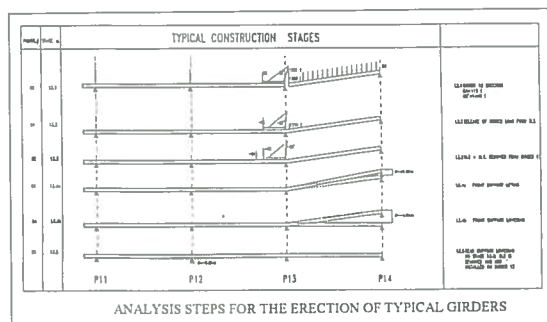


Fig. 9
Schemi statici delle fasi di installazione di una travata del viadotto.

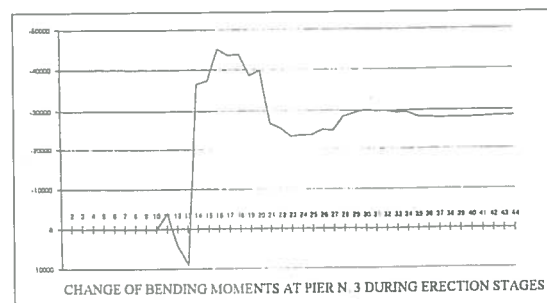


Fig. 10
Evoluzione del momento flettente su una pila durante le fasi di costruzione del viadotto.

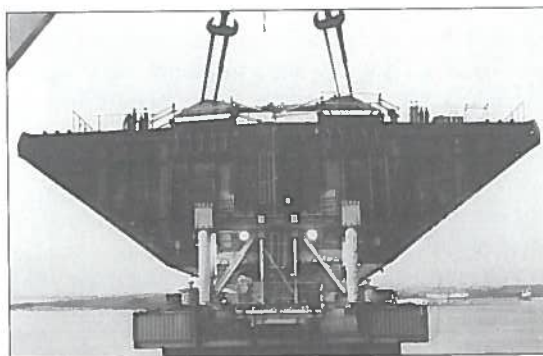


Fig. 11
Abbassamento dell'estremità anteriore di una travata tipica.



Fig. 12
Il viadotto lato Halskov prima dell'installazione della travata n. 14.

sollevare e quindi forzare la travata già continuizzata posteriormente. Inoltre la reazione anteriore, e quindi il tiro della gru, veniva notevolmente incrementato dalle variazioni termiche differenziali nelle giornate di sole. Il necessario controllo di tali effetti è stato quindi realizzato mediante diversi sistemi: operando nelle ore serali, disponendo mezzi d'opera (pesi) nelle zone d'influenza della travata posteriore o, per le operazioni diurne, operando un adeguato raffreddamento del deck mediante apporto di acqua, operazione che si è rivelata particolarmente efficace nel controllo delle reazioni d'appoggio.

Malgrado le difficoltà, tutte superate, questo metodo ha consentito un importante guadagno di tempo: è stato infatti possibile completare l'intera operazione di abbassamento nell'arco di sole due ore di lavoro e rispettare i programmi di montaggio (fig. 12).

Influenza della temperatura, delle onde e del vento

Gli effetti delle variazioni termiche in strutture di grandi dimensioni giocano quindi un ruolo importante nella progettazione dei metodi e delle attrezzature di montaggio.

L'azione del moto ondoso ha anche fortemente influenzato, sia nei viadotti d'accesso che nel ponte sospeso, le fasi di trasporto via mare e di sollevamento, come verrà meglio illustrato nei capitoli successivi.

L'azione del vento, tuttavia, ha giocato probabilmente un ruolo ancora maggiore nelle attività di montaggio. L'azione dei vortici di Von Karman, infatti, si è subito dimostrata una condizione di carico significativa poiché le frequenze di vibrazione nelle varie fasi di costruzione risultavano vicine alle frequenze critiche correlate alle velocità di progetto del vento durante la costruzione.

Poiché le possibili oscillazioni della travata per effetto delle scie vorticose avrebbero prodotto inaccettabili incrementi di sollecitazione, fu quindi necessario studiare e realizzare un sistema di smorzamento e controllo di tali vibrazioni (fig. 13) che si è rivelato adeguato ed efficace dato che, con la sua installazione, non si sono più manifestate oscillazioni delle travate ed il lavoro ha potuto proseguire secondo i programmi prefissati.

Tale sistema semplicemente consisteva in due coppie di cavi d'acciaio in grado di vincolare la travata in avanzata a dei blocchi in calcestruzzo posati, in progressione, sul fondo marino.

L'area dei cavi, la loro posizione e lunghezza, il loro tensionamento ed il peso dei blocchi d'ormeggio

sono stati determinati e ottimizzati per le varie fasi esecutive in modo da incrementare le frequenze fondamentali di vibrazione, consentendo di evitare la risonanza per le più frequenti velocità del vento, e per controllare e limitare i momenti flettenti nella travata per le condizioni di risonanza che potevano verificarsi alle velocità più alte.

È infine interessante notare che i risultati delle indagini in galleria del vento, sia su modelli sezionali che su modelli dell'intero ponte, sono stati in una certa misura contraddetti dalle osservazioni in situ delle oscillazioni che effettivamente si verificavano per le prime campate prima di installare il sistema di controllo.

In sostanza il numero di Strouhal, e quindi le velocità critiche effettivamente riscontrate sul prototipo a "scala naturale", risultavano differenti per circa il 20% rispetto alle previsioni formulate in base alle indagini su modello.

Tale discordanza, che è stata attribuita principalmente alla differenza tra i numeri di Reynolds del modello e del prototipo, induce comunque ad una certa cautela nell'affrontare i problemi connessi all'azione del vento su grandi strutture, seppur supportati dalle più avanzate indagini teoriche e sperimentali oggi disponibili.

IL MONTAGGIO DEL PONTE SOSPESO

Descrizione della struttura

La struttura principale del ponte sospeso è formata essenzialmente dalle due torri in cemento armato, alte 254 m sul l.m.m., che supportano i due cavi portanti del diametro di 0.827 m, ancorati alle estremità ai blocchi d'ormeggio.

Ogni cavo è formato da 37 trefoli paralleli, ciascuno formato da 504 fili paralleli di 5.38 mm di diametro. Ai cavi è sospesa, mediante una serie di pendini distanziati longitudinalmente di 24 m, una travata scatolare con forma aerodinamica, continua e senza giunti su tutta la sua lunghezza tra i due blocchi d'ormeggio. Ciascun pendino ("hanger"), è formato da una coppia di funi chiuse collegate ai cavi portanti da selle di bloccaggio ("clamps") a perno ed all'impalcato da ancoraggi regolabili.

La travata scatolare ha una sezione con forma trapezia e profilo rastremato, con una larghezza totale di 31.20 m ed una altezza massima di 4.34 m (fig. 14).

Fig. 13
Damper
per il controllo
delle vibrazioni
indotte dal vento
durante
il montaggio
delle travate
dei viadotti.

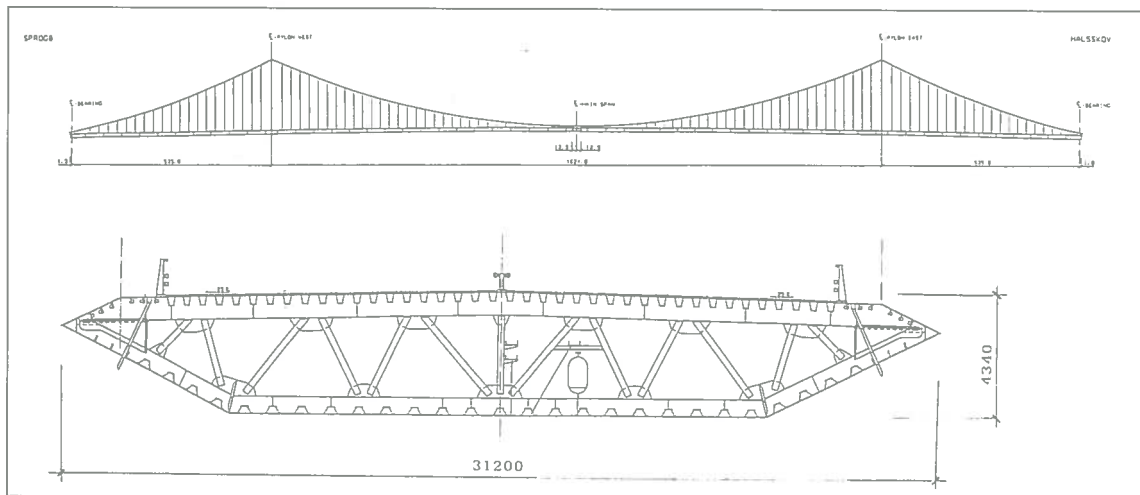
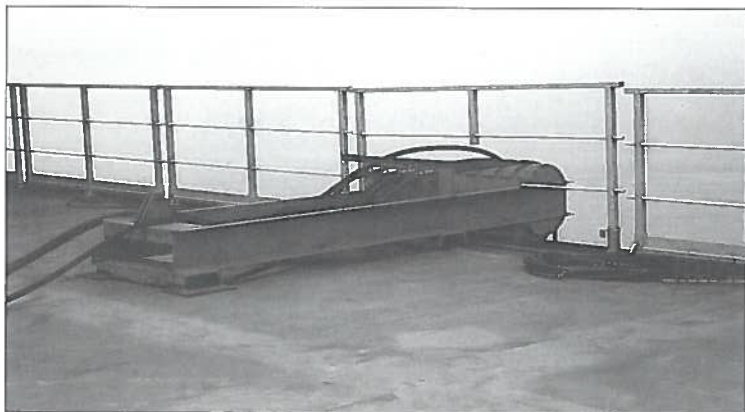


Fig. 14
Profilo
longitudinale
e sezione
trasversale
del ponte sospeso.

La struttura è a lastra ortotropa con nervature longitudinali a sezione chiusa e con nervature trasversali e diaframmi reticolari ad un passo tipico di 4.00 m. Ogni elemento da montare in opera ha una lunghezza tipica di 48 m ed è formato dall'assemblaggio a piè d'opera di conci lunghi 16 m.

Il peso dell'elemento tipico è pari a circa 530 t. L'acciaio utilizzato è del tipo Fe 510 con tensione di snervamento di 355 Mpa.

La travata, come accennato, è sospesa mediante i tiranti su tutta la lunghezza tra i due blocchi d'ormeggio: sulle pile non sono presenti appoggi verticali, ma soltanto vincoli trasversali.

Nonostante la sospensione elastica continua fornita da cavi e pendini, per la travata è stato previsto, in sede di progetto, che al termine della costruzione in essa fosse presente una particolare distribuzione di momenti flettenti, in particolare nelle zone in prossimità delle antenne e dei blocchi d'ormeggio, allo scopo di ottimizzare il dimensionamento e la distribuzione delle azioni interne negli elementi strutturali.

Il sistema di montaggio del ponte sospeso

I conci della travata del ponte sospeso, analogamente a quanto previsto per le travate dei viadotti d'accesso, sono stati fabbricati in pannelli a Livorno, assemblati a Sines (Portogallo) e a Taranto, e quindi trasportati via mare ad Aalborg dove avevano luogo le operazioni di finitura e di carico sui natanti predisposti per il sollevamento.

Il montaggio della travata del ponte sospeso ha avuto inizio circa un anno dopo il completamento dei viadotti d'accesso, cioè dopo che erano terminate le attività relative al sistema di cavi e tiranti: passerelle di servizio e sistema controventante, serraggio, compattazione, installazione dei bloccaggi e dei tiranti (fig. 15a,b,c,d,e).

La realizzazione della travata sospesa ha seguito, fondamentalmente, le seguenti fasi operative:

- Installazione sui cavi portanti di quattro gru a ponte (GLS) della portata di 600 t (fig. 16a), in grado di muoversi sui cavi e di sollevare e posizionare con adeguata precisione gli elementi di travata. Ogni sollevamento avveniva per mezzo di una coppia di gru, con un totale di quattro punti di sospensione (fig. 16b, c).
- Presa dell'elemento d'impalcato a mezzo di una coppia di travi di ripartizione e di particolari dispositivi di aggancio e suo sollevamento dal pontone fino alla quota finale.
- Traslazione del concio sollevato e suo posiziona-



Fig. 15a,b,c,d,e
Fasi di installazione della passerella di servizio (catwalks), della sella di bloccaggio dei cavi (cable clamps) e dei tiranti di sospensione (hangers).

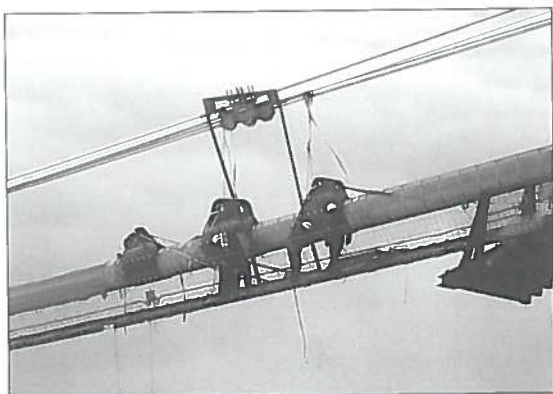
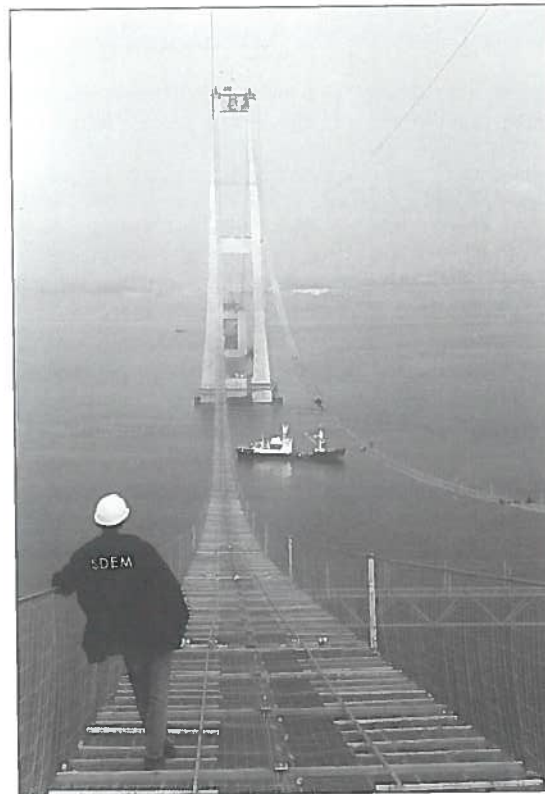
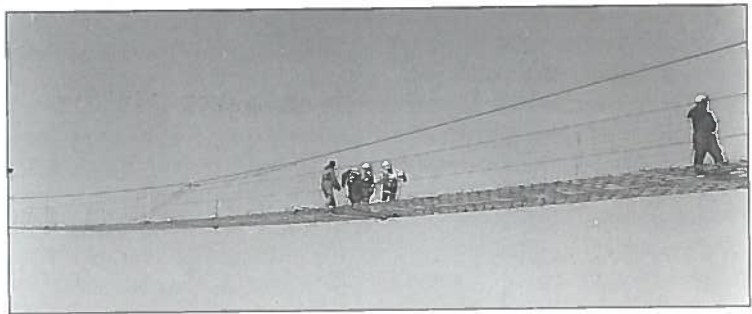


Fig. 16a, b, c
Fasi
di installazione
di un concio
della travata
del ponte sospeso.

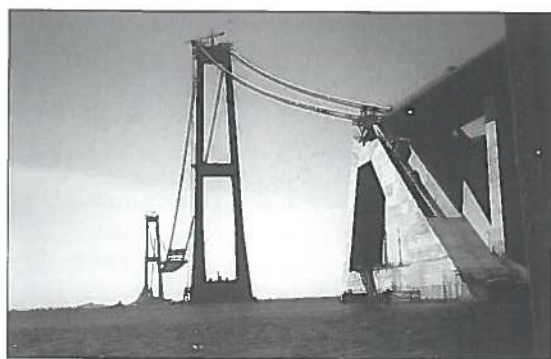
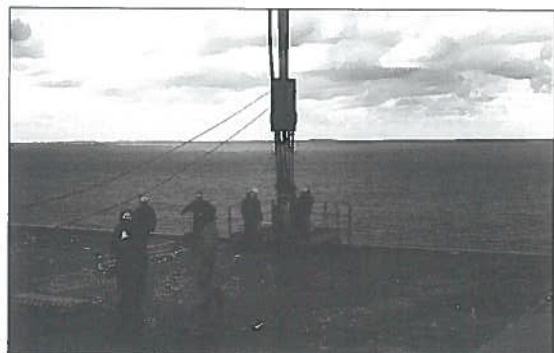


Fig. 17
Ancoraggio
di un tirante
all'impalcato.



- Collegamento del concio sollevato con il precedente per mezzo di connessioni provvisorie.
- Installazione delle teste d'ancoraggio dei tiranti nei rispettivi blocchi d'ancoraggio e quindi successivo trasferimento del carico dal GLS ai tiranti (fig. 17).
- Saldatura dei concii quando i giunti tra gli stessi, in una certa fase di montaggio, andavano a chiudersi consentendo il contatto tra le lamiere di fondo, e quindi le operazioni di saldatura.
- Applicazione dei momenti di presollecitazione dove richiesto.

La sequenza di montaggio. Il montaggio degli elementi è stato sviluppato secondo la seguente sequenza (fig. 18):

- Inizio del montaggio partendo dai concii in mezzzeria della campata centrale, procedendo verso le antenne fino al completamento della campata centrale;
- montaggio dei concii presso i blocchi d'ormeggio, procedendo verso le antenne;
- chiusura dell'impalcato, montando i concii in corrispondenza delle antenne (conci chiave).

Per quanto fossero possibili differenti sequenze operative, e malgrado fossero preferibili dal punto di vista logistico di accesso all'impalcato sequenze che partissero dalle pile, la sequenza adottata fu dettata dall'esigenza di garantire condizioni di stabilità nei confronti del "flutter" nelle varie fasi di costruzione.

Infatti, durante le fasi di montaggio di un ponte sospeso la velocità critica del vento per "flutter", cioè per le oscillazioni autoeccitate di tipo flessio-torsionale, risulta generalmente minore di quella corrispondente alla struttura finita; essa raggiunge un minimo pari a circa il 50÷60% della velocità critica del ponte completo quando l'impalcato è montato al 10÷20% (fig. 19a, b) per poi risalire verso il valore finale man mano che aumenta il rapporto tra la rigidità torsionale e quella flessionale del sistema.

Allo scopo di ottenere velocità critiche superiori alle velocità del vento di progetto nelle prime fasi di montaggio, fu quindi necessario studiare in dettaglio il comportamento torsionale dell'impalcato nelle prime fasi di costruzione, fasi in cui i concii risultavano collegati mediante le sole connessioni temporanee, e progettare un sistema di connessioni e vincoli che garantisse, oltre che le esigenze di montaggio, anche i requisiti di rigidità torsionale per la necessaria stabilità aerodinamica.

Le fasi di sollevamento. L'elemento di maggior peso e dimensioni sollevato nelle varie fasi è stato il concio centrale della campata principale, cioè il primo elemento montato in assoluto, di peso pari a circa 900 t.

I concii tipici, del peso di circa 530 t, sono stati installati con una sequenza media di uno per giorno, con punte di due elementi per giorno quando le condizioni ambientali lo consentivano.

Durante il sollevamento dei concii le azioni applicate alla gru sui cavi ed a tutto il sistema di sollevamento erano affette da significative componenti di-

Fig. 18
Schema
della sequenza
di installazione
dei conci
d'impalcato.

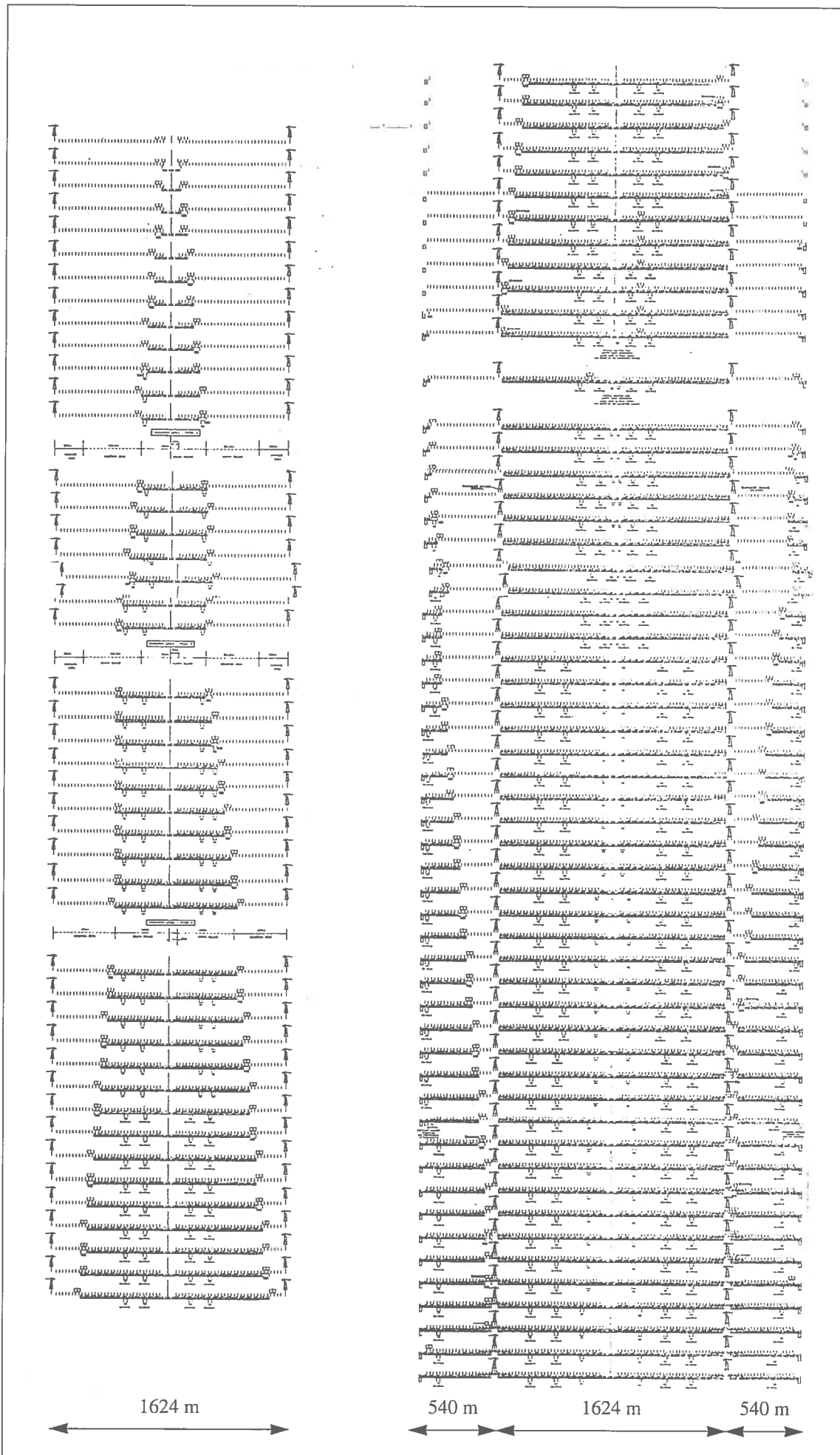


Fig. 19a
Impalcato montato
per il 20%
della lunghezza
della campata
centrale,
nella condizione
di minima
velocità critica.

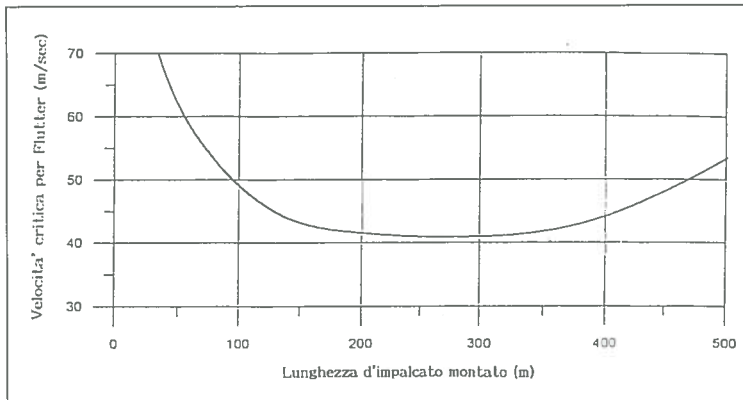
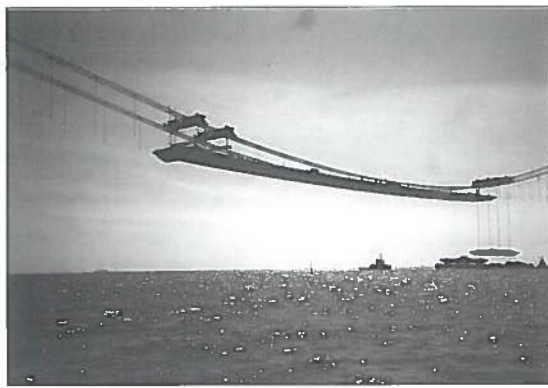


Fig. 19b
Velocità critiche
per flutter
in funzione
della lunghezza
di impalcato
montato
(S.O. Hansen).

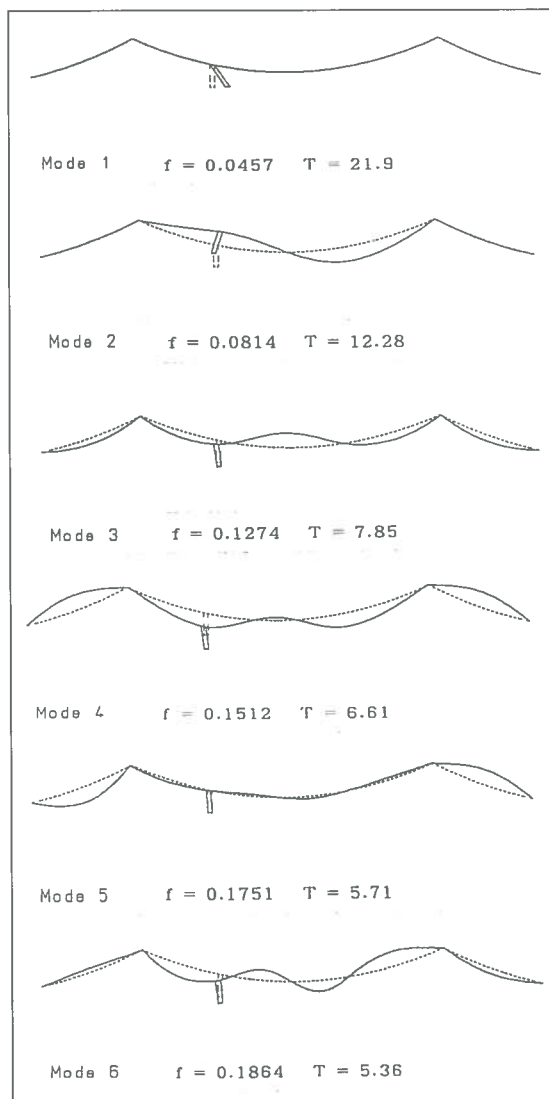


Fig. 20
Modi e frequenze
di vibrazione
durante
il sollevamento
di un concio
a un quarto
della luce.

namiche per l'azione del mare e del vento.

La principale amplificazione dinamica si verificava all'inizio del sollevamento per l'azione combinata del movimento verso il basso dovuto al moto ondoso ed alla ripresa delle funi di sollevamento: la massima azione si verifica infatti quando natante e concio vengono spinti verso il basso dal moto ondoso nel momento in cui il peso del concio è quasi interamente trasferito al sistema di sollevamento.

Questi effetti sono stati necessariamente analizzati per varie fasi di costruzione mediante analisi dinamiche non lineari per le condizioni del moto ondoso di progetto, anche allo scopo di verificare i limiti e la necessaria sicurezza nei confronti di possibili fenomeni di ri-contatto tra concio e natante in caso di forte moto ondoso e inadeguata velocità di sollevamento (fig. 20, 21).

Gli effetti del vento, quali vibrazioni e amplificazioni dinamiche dovute al "buffeting" ed alle scie di vortici, sono stati anch'essi indagati, verificando i rispettivi valori di amplificazione dinamica; essi sono risultati tuttavia meno importanti di quelli afferenti all'interazione mare-struttura.

Le connessioni temporanee e l'azione del vento.

Durante il montaggio dell'impalcato di un ponte sospeso la grande deformabilità dei cavi per l'applicazione di stese di carico parziali comporta grandi spostamenti (fig. 22) ed una linea d'asse dell'impalcato con curvature molto elevate soprattutto nelle prime fasi.

È quindi necessario, per motivi statici e operativi, realizzare tra i concii un collegamento provvisorio che consenta la libera rotazione reciproca tra i concii stessi nel piano verticale.

In un ponte sospeso, sia con sequenza di montaggio a partire dal centro che dalle estremità, l'asse dell'impalcato presenta una curvatura positiva, con concavità superiore, durante la maggior parte delle fasi di installazione dei concii (fig. 23a,b), ed in genere fino a che non viene completato circa il 70% della campata centrale. I giunti tra i concii si presentano quindi aperti, con rotazione reciproca tra le facce adiacenti e con una distanza tra le lamiere di fondo che presenta valori variabili durante il montaggio e, nel nostro caso, dell'ordine dei 150 mm nelle prime fasi (fig. 23c).

Le connessioni temporanee dovevano quindi essere progettate per soddisfare differenti esigenze: dovevano innanzitutto essere concepite in modo tale che le operazioni di collegamento tra i concii fossero rapide e semplici; dovevano inoltre resistere alle azioni indotte dagli effetti dinamici del vento sull'impalcato e dalle azioni indotte dalle sequenze di montaggio, pur garantendo una elevata capacità di rotazione tra i vari concii. Dovevano infine fornire una sufficiente rigidità torsionale all'impalcato allo scopo di garantire la adeguata stabilità aerodinamica nei confronti del fenomeno di flutter.

Le connessioni progettate e realizzate sono del tipo a doppia cerniera con diagonali tubolari interne alla struttura per riprendere le azioni di taglio verticale, e vincoli torsionali scorrevoli per garantire rigidità e resistenza alle azioni torcenti.

Con tali vincoli la rigidità torsionale risultava pari al 70% di quella dell'impalcato saldato, e pari al doppio della rigidità afferente alle sole cerniere,

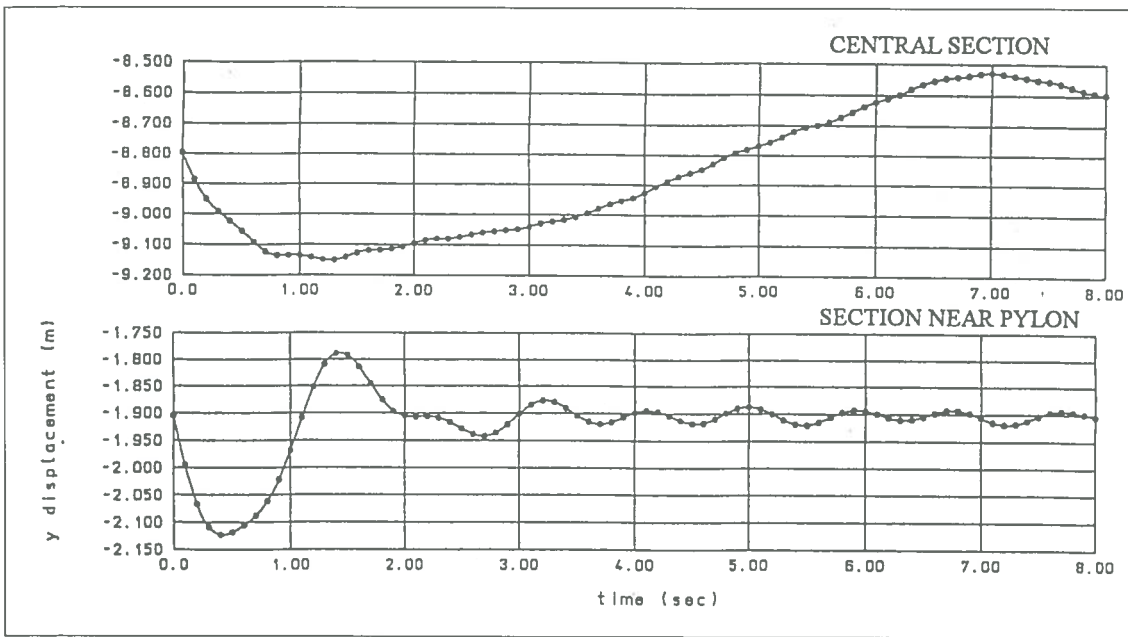


Fig. 21
Diagrammi degli spostamenti verticali del concio sospeso per l'azione del moto ondoso prima del distacco dal pontone.

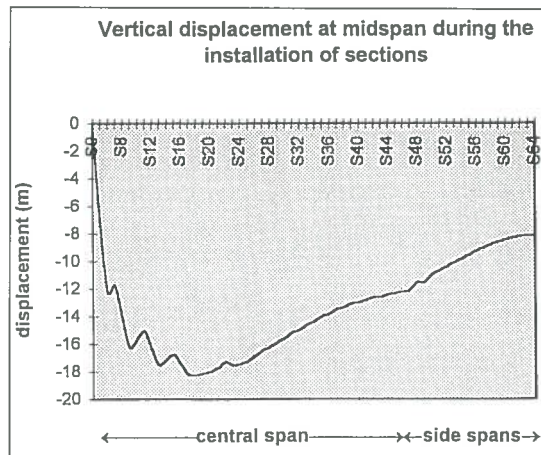


Fig. 22
Spostamenti verticali in mezzeria della campata centrale durante le fasi di installazione dei concii.



Fig. 23a, b
Apertura dei giunti delle lamiere di fondo indotti dalla curvatura (verso l'alto) dell'impalcato nelle prime fasi di montaggio.

Fig. 23c
Con le fasi successive la curvatura si inverte ed i giunti si chiudono.

garantendo quindi la necessaria stabilità aerodinamica durante la costruzione.

La stabilità statica è stata altresì controllata determinando le massime azioni agenti sull'impalcato e sulle connessioni temporanee per l'azione del vento e le distorsioni al montaggio.

Dalle analisi effettuate è innanzitutto apparsa chiara l'opportunità di mantenere l'impalcato svincolato dalle antenne fintanto che non fossero completate le saldature dei conci in quanto questa condizione minimizzava i momenti ed i tagli orizzontali indotti dal vento.

Inoltre, nelle fasi di costruzione, l'elevata flessibilità dell'impalcato derivante dalla grande luce, dallo svincolo in corrispondenza delle antenne e dalle deformabilità delle connessioni temporanee, portava ad amplificare sia il comportamento non lineare del sistema cavi - hangers - impalcato che la risposta all'azione dinamica del vento.

Si è infatti riscontrata, ad esempio, una notevole sensibilità della risposta strutturale a variazioni anche limitate nella ripartizione tra l'azione del vento sui cavi e sull'impalcato.

Si noti, a tale proposito, che mentre la resistenza aerodinamica dell'impalcato è influenzata dalla presenza di mezzi d'opera e dall'angolo d'incidenza del vento, la resistenza dei cavi pone analoghe alee essendo dipendente dalla presenza delle passerelle di servizio e dalla variabilità del coefficiente di resistenza in funzione del Numero di Reynolds.

Si è inoltre riscontrato che la grande flessibilità e lunghezza dell'impalcato, associate all'azione dinamica del vento, davano luogo ad una risposta strutturale caratterizzata da elevate componenti risonanti, afferenti prevalentemente al 3° ed al 4° modo di vibrare nel piano orizzontale, col risultato che tale risposta dinamica risultava preponderante sulla risposta all'azione quasistatica della componente uniforme dell'azione del vento.

In altri termini la componente variabile, nel tempo e nello spazio, dell'azione del vento tendeva a indurre oscillazioni dell'impalcato, amplificate dinamicamente, con momenti superiori a quelli corrispondenti alla massima azione del vento, applicata staticamente e uniformemente su tutta la lunghezza del ponte.

Le varie analisi di "buffeting", cioè della risposta strutturale all'azione della componente turbolenta dell'azione del vento, hanno peraltro mostrato la grande variabilità di risultati ottenibili utilizzando differenti spettri di potenza della fluttuazione delle velocità e diverse funzioni di correlazione spaziale dell'azione del vento.

Il controllo delle fasi di costruzione. Il montaggio dell'impalcato sospeso ha comportato la definizione, l'analisi ed il controllo statico delle varie fasi esecutive, comprendendo per ciascun concio le fasi di sollevamento, di collegamento al concio adiacente, nonché le movimentazioni dei GLS e della unità di saldatura (welding shelter) (fig. 24), e le varie fasi di presollecitazione per i conci delle zone in prossimità delle pile e degli ormeggi.

Un'analisi preventiva consentì di definire e ottimizzare le successive sequenze di saldatura, di dimensionare le attrezzature di montaggio e le strutture ausiliarie.

La definitiva analisi step by step con struttura analizzata per fasi in regime di grandi spostamenti consentì di determinare le entità delle distorsioni da applicare per le fasi di presollecitazione, di verificare gli elementi strutturali, nonché di controllare il comportamento del ponte attraverso il confronto tra l'evolversi delle deformazioni e le previsioni teoriche (fig. 25).

Malgrado gli spostamenti del sistema fossero dell'ordine dei metri e, con riferimento alla geometria indeformata dei cavi, dell'ordine delle decine di metri, e malgrado la forte non linearità del sistema e le numerose fasi esecutive, i risultati delle analisi effettuate trovarono un buon riscontro nel monitoraggio strutturale.

La presollecitazione dell'impalcato. Analogamente ai viadotti d'accesso, anche la travata sospesa al termine della costruzione doveva presentare un particolare stato di presollecitazione con momenti flettenti di segno ed entità predeterminata, allo scopo di ottimizzare i momenti flettenti e le reazioni nei pendini in esercizio.

Quindi, in corrispondenza delle antenne e dei blocchi d'ormeggio, alla travata sono state imposte di-

Fig. 24
Diagramma
dei momenti
flettenti
per il transito
di una coppia
di GLS sui cavi
in prossimità
della mezzeria.

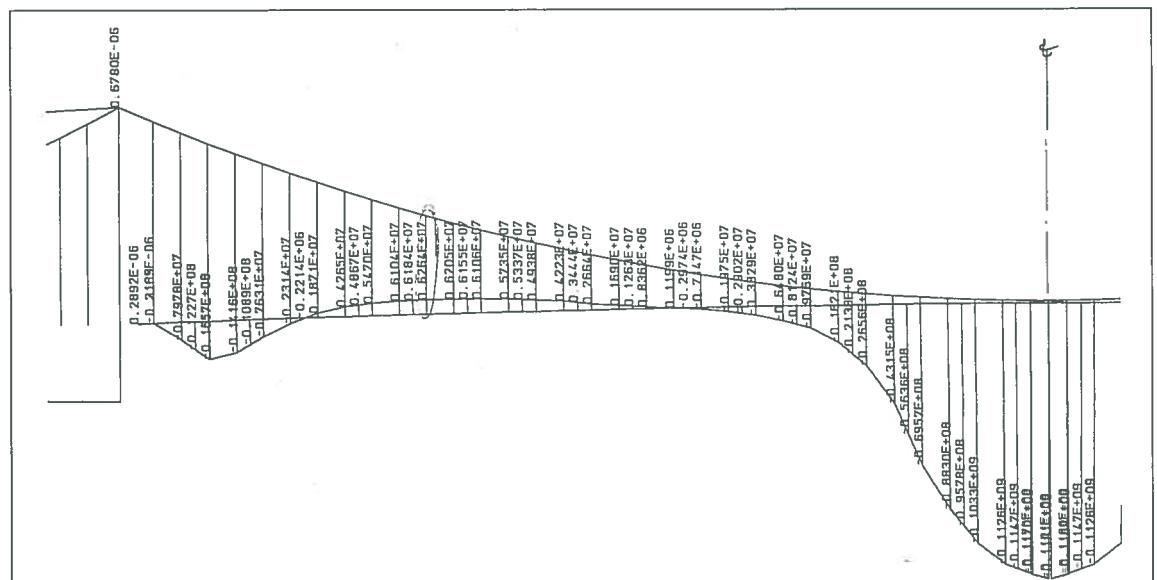


Fig. 25
Diagrammi
di deformazione
verticale
della campata
centrale
durante
l'installazione dei
conci.

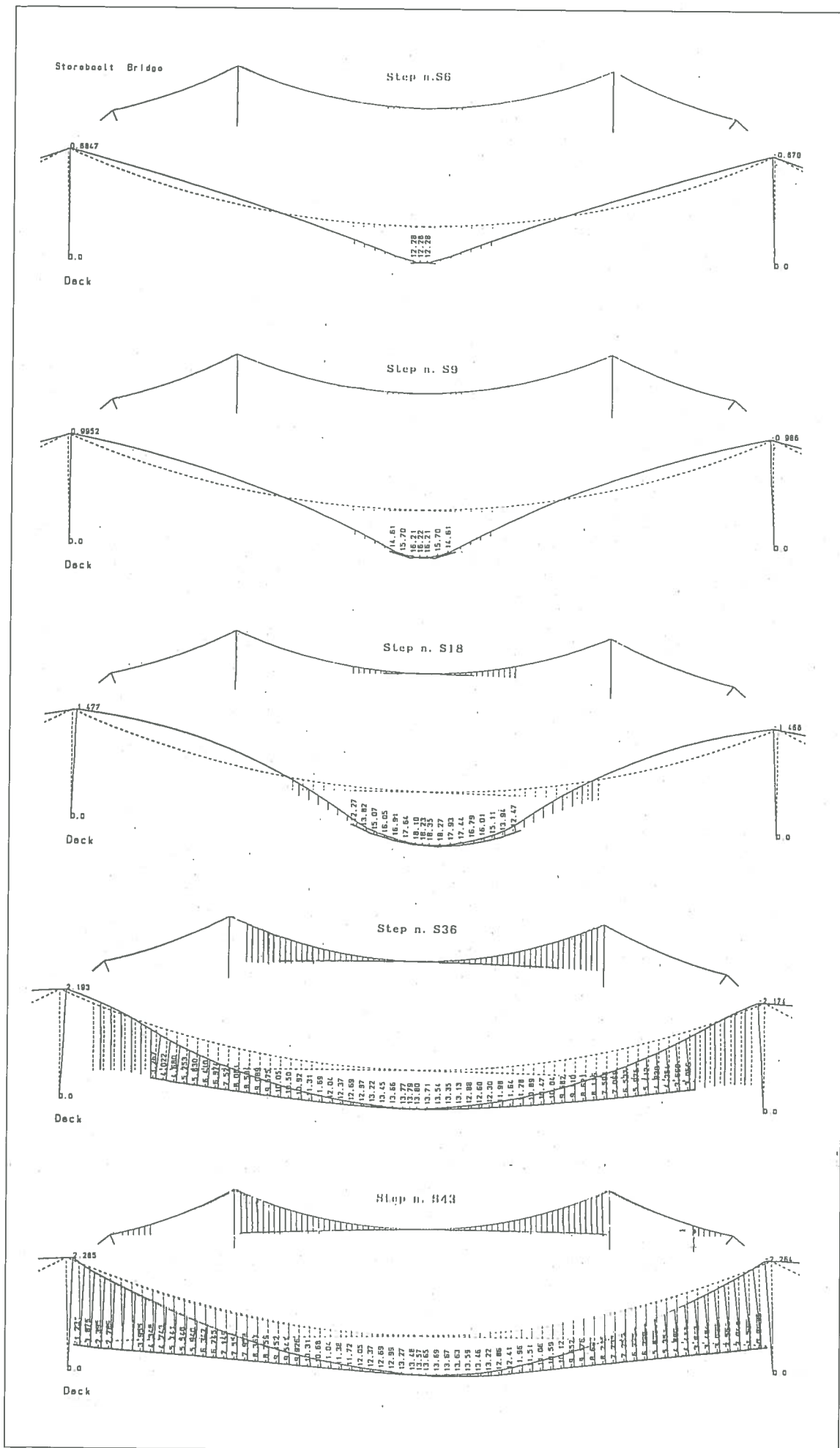
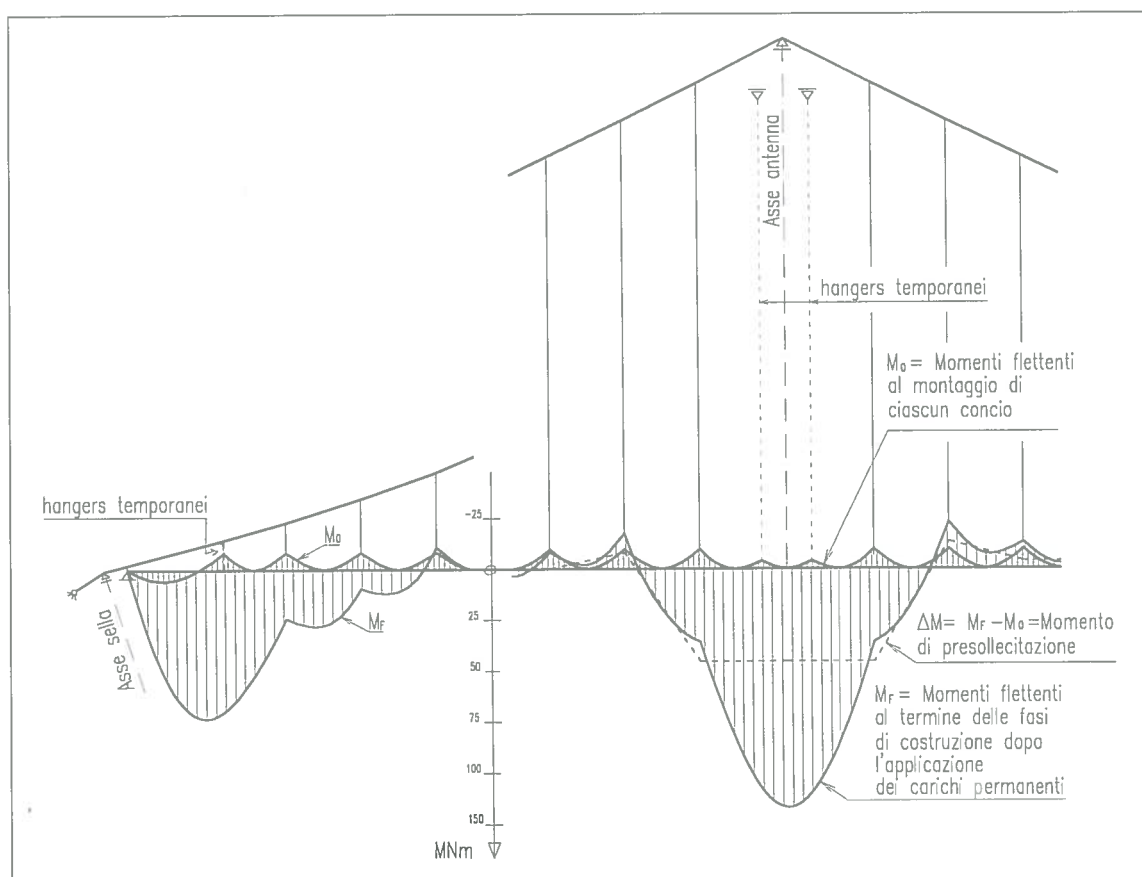


Fig. 26
Momenti flettenti
nell'impalcato
vicino al blocco
d'ormeggio
ed in prossimità
delle antenne
prima e dopo
le fasi di
presollecitazione.



storsioni in grado di applicare una progressiva distribuzione di momenti flettenti tale da indurre al termine della costruzione la distribuzione di progetto (fig. 26).

Questi momenti aggiuntivi sono stati applicati attraverso numerose fasi successive, secondo la seguente procedura:

- installando e saldando le sezioni vicine alle antenne ad una quota più elevata della quota finale mediante opportuni spessoramenti (shimming) sulle teste d'ancoraggio dei tiranti;
- forzando la travata, dopo l'installazione dei conci di chiusura in corrispondenza delle antenne, rimuovendo progressivamente, ed in opportuna sequenza, gli spessoramenti, cioè facendo scorrere la travata rispetto ai tiranti, realizzando quindi la necessaria distribuzione di momenti positivi (fig. 27).

Per effettuare queste operazioni fu quindi necessario definire le lunghezze dei tiranti, le quote di montaggio e le sequenze operative necessarie per ottenere i momenti flettenti richiesti, ma anche, e soprattutto, per garantire la precisa corrispondenza dei conci in modo da consentire l'assemblaggio e la saldature di testa delle lamiere, in opera.

La precisione nella presentazione dei conci di chiave verso i tratti d'impalcato già montati (circa 1600 m il tratto centrale e circa 540 m i tratti laterali) fu veramente soddisfacente: il dislivello tra i conci risultò, invero, sempre inferiore ai 10 mm (fig. 28), pur dopo l'evoluzione di centinaia di fasi operative.

CONSIDERAZIONI FINALI

Il ponte sul Grande Baelt è attualmente il ponte di maggior luce nel mondo con impalcato a sezione

scatolare di tipo alare e, con i viadotti d'accesso, rappresenta uno dei più grandi ponti finora realizzati sia per lunghezza che per ampiezza delle campate.

I risultati ottenuti in termini di realizzazione degli obiettivi prefissati nel rispetto dei tempi contrattuali ed il superamento, ad essi correlato, di numerose difficoltà e problemi, consentono di formulare alcune riflessioni.

Nella costruzione dei ponti di grande luce le fasi di montaggio sono spesso le più critiche, soprattutto nei riguardi della stabilità aerodinamica rispetto alle condizioni di ponte completato.

Risulta quindi essenziale, per motivi non solo economici ma di sicurezza, individuare procedure di montaggio che consentano il completamento della struttura in tempi rapidi.

Ciò implica l'impiego di metodi di installazione che prevedano la prefabbricazione a piè d'opera di macroelementi di sempre maggiori dimensioni, ed il loro montaggio in opera a mezzo di attrezzature di elevata capacità.

Questi metodi richiedono che tutte le procedure ed i problemi di montaggio siano esaminati in dettaglio e risolti nelle fasi iniziali del progetto, in quanto rappresentano uno degli aspetti condizionanti della stessa fattibilità del ponte.

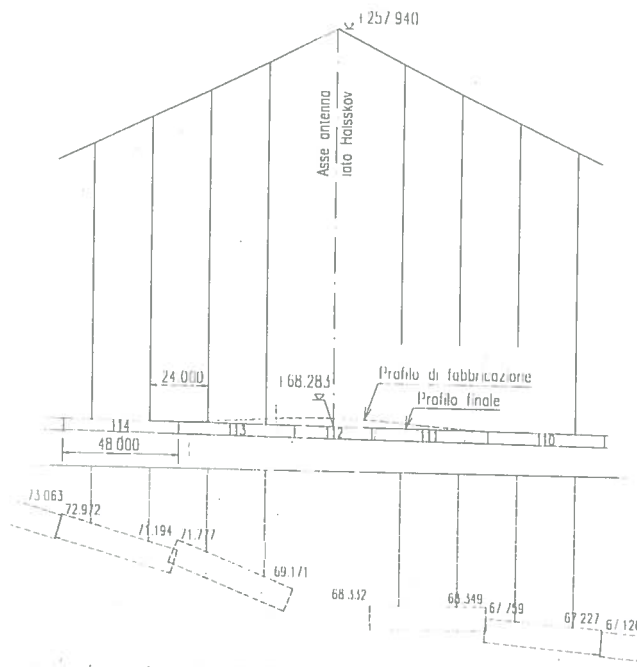
Gli effetti del vento, come ben noto, giocano un ruolo dominante e, sebbene l'ingegneria del vento abbia fatto formidabili progressi negli ultimi anni, esistono ancora gradi di incertezza tali da suggerire una certa prudenza nella definizione delle condizioni e delle procedure di montaggio, e nel determinare la fattibilità delle strutture di maggiori dimensioni.

Si può infine notare che con l'aumento del fattore di scala i problemi connessi alla costruzione ed al

Fig. 27
Sequenza di montaggio dei conci in prossimità dell'antenna: installazione, sospensione con "shimming" iniziale, chiusura dei gap, saldatura, "shimming" di seconda fase, inserimento e saldatura del concio in chiave, rilascio dei tiranti temporanei e abbassamento.

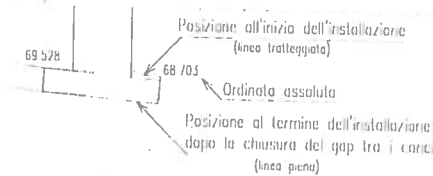
FASE 0

Geometria indeformata teorica basata sulla lunghezza di fabbricazione degli hangers a partire dal profilo iniziale dei cavi



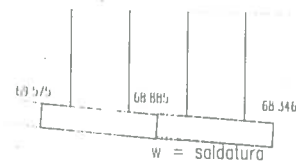
FASE 1

Installazione concio 114



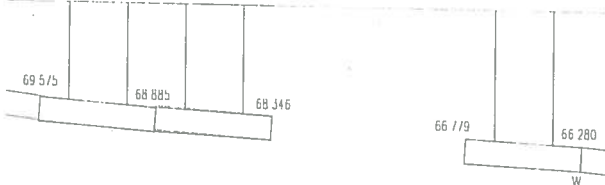
FASE 2

Installazione concio 115



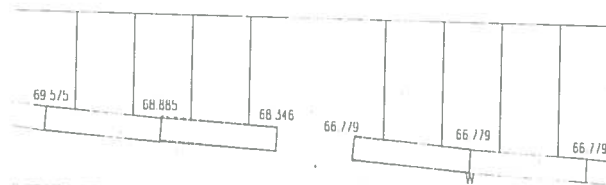
FASE 3

Installazione concio 110



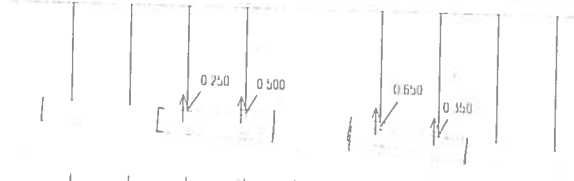
FASE 4

Installazione concio 111



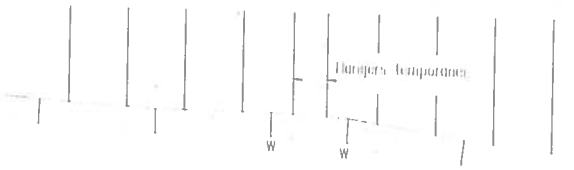
FASE 5

Sollevamento e shimming per l'inserimento del concio in pile (n° 7 fasi)



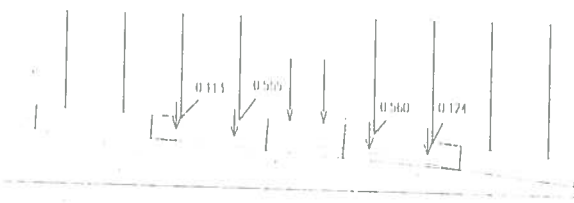
FASE 6

Installazione del concio in pile



FASE 7

Rilascio degli hangers temporanei
Abbassamento mediante shimming con presollecitazione finale (n° 12 fasi)



(Fotografie: Studio De Miranda Associati - Riproduzione riservata)

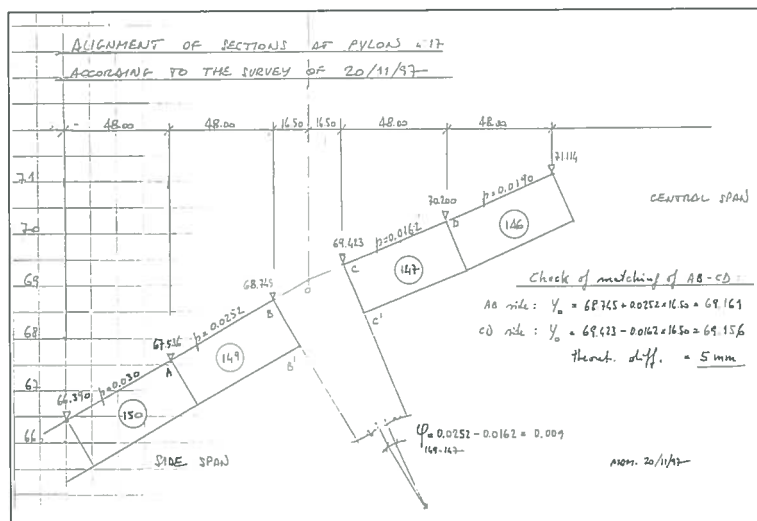


Fig. 28 Rilievo della posizione degli ultimi conci prima dell'installazione del concio in chiave e verifica geometrica dell'allineamento teorico.

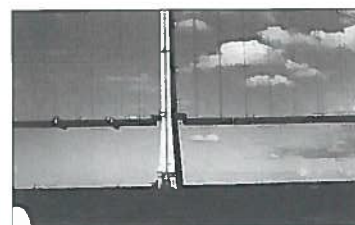


Fig. 29 - Montaggio di un concio di chiusura sull'antenna

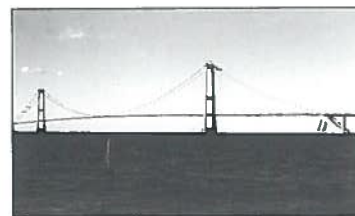


Fig. 30 Fasi finali di saldatura dei conci.

montaggio sembra tendano ad aumentare più rapidamente di quanto non avvenga per le problematiche progettuali connesse al comportamento in esercizio del ponte nella sua configurazione finale. La stessa fattibilità di un manufatto di grande luce,

intesa come ragionevole certezza di poter realizzare l'opera in condizioni di sicurezza, in tempi definiti e con costi accettabili, è strettamente legata agli aspetti costruttivi, e questo legame certamente si rafforza al crescere delle dimensioni della struttura.

Dr. ing. Mario de Miranda
 Studio De Miranda Associati Ingegneria Strutturale - Milano
Dr. ing. Michel Petrequin
 Ingegnere Consulente, già direttore di Gec Alsthom SDEM

RICONOSCIMENTI

Il gruppo operativo della G.A. SDEM, che ha elaborato piani di vario genere nelle fasi del progetto, comprende, tra gli altri, le seguenti persone: Jack Montaz, Project Manager nell'ultimo anno, con François Gueneau e Bob Spackman, precedenti Project Managers; Jean François Serrà e Frédéric Labaye, responsabili delle operazioni in cantiere; Gerard Spaini, Jean Claude Daniel, Jean Paul Auvergne e Steven Byrne, che hanno lavorato nel gruppo di progettazione a Grenoble e ad Halskov, sotto la direzione di Michel Petrequin. Dello Studio De Miranda Associati, oltre al contributo allo sviluppo delle analisi statiche e dinamiche di Elena Gnechchi-Ruscone per il ponte sospeso, e di Luca Strata per i viadotti, si vogliono soprattutto ricordare i preziosi suggerimenti e le utili indicazioni del professor Fabrizio de Miranda. Si desidera inoltre riconoscere la costruttiva collaborazione alle attività di montaggio da parte dello staff operativo della Coinfra, ed in particolare di E. Rolla, U. Sparatore, A. Testa, M. Padovan, P. Stellati, J. Mac Gibbon J. Mikinen; e degli ingegneri e dei tecnici della CMF Sud. Un ricordo particolare va all'ing. Gianfranco Vannacci che dall'inizio ha creduto in questo progetto e nella capacità dei tecnici italiani di realizzarlo.

PROGETTO E COSTRUZIONE

Lo Storebaelt Bridge, è stato progettato dal Consorzio CBR tra le società danesi COWIconsult, B. Hojlun Rasmussen e Ramboll e Hanneman. Mentre l'esecuzione delle sottostrutture, delle pile e delle torri, è stata affidata ad un consorzio Danese e Tedesco, il contratto per la realizzazione delle sovrastrutture è stato vinto, nel 1992, dal gruppo italiano formato da IRITECNA e CMF Sud, poi portato avanti da COINFRA, del gruppo Fintecna. COINFRA ha affidato al gruppo Anglo Francese GEC-ALSTHOM-SDEM il subappalto per il montaggio degli impalcati e dei cavi. G.A.Sdem si è avvalsa del contributo degli olandesi della SMIT-Maritime per i sollevamenti e i trasporti via mare, dei francesi della COMAG per le attività connesse alla fabbricazione dei cavi, dei danesi della BM e dei francesi della SDEM Entreprise per lavori di saldatura in opera, della inglese GIBSON per le attrezzature di sollevamento dei conci del ponte principale. Lo Studio De Miranda Associati ha operato come consulente per G.A.Sdem, per gli studi di montaggio e sviluppando varie analisi strutturali necessarie per la realizzazione dei viadotti di accesso e del ponte sospeso, tra cui le analisi finali "step by step" della travata sospesa. Per COINFRA e G.A. Sdem hanno anche collaborato consulenti americani, inglesi, francesi, danesi in vari settori specifici. Diverse aziende italiane hanno contribuito direttamente con importanti forniture: ILVA ha fornito le lamiere d'acciaio; CMF Sud ha fabbricato gli impalcati; Redaelli ha fornito i cavi ed i pendini; Inse e Fonderie Cividale hanno realizzato le selle d'appoggio dei cavi; FIP ha fornito gli appoggi e i dispositivi di ritegno; Anticorrosione ha realizzato la pavimentazione. E ancora italiano è il contributo di Cividini, Peyrani, Mapei, Omba, Belleli, nonché di altri subcontractors per varie attività di supporto.

RIFERIMENTI

1. From Little Belt to Great Belt - Klaus H. Ostenfeld, Proceedings AFPC IABSE Conference - Deuville - Ottobre 1994.
2. The construction of the Storebaelt East Bridge - A. Caramelli, G. Vannacci, Costruzioni Metalliche - n. 1 - 1994
3. Great Belt - East bridge - The steel superstructure of approach spans: construction aspects. G. Mazzali - CTA Conference 1993 e Costruzioni Metalliche - n. 2 - 1994.
4. Aerodynamic design of the Great Belt East Bridge - A. Larsen and A.S. Jacobsen. Copenhagen DMI Congress - 1992.
5. Beyond the limits of the erection activities - M. De Miranda e M. Petrequin, Kobe IABSE Congress - 1998.