

Ponti sospesi di grande luce: effetti di distorsioni tra le torri

Si analizzano gli effetti su un ponte sospeso di spostamenti permanenti impressi tra le due torri, dovuti a movimenti tettonici lenti.

Dallo studio qui riportato, condotto su un modello semplificato, che schematizza con buona approssimazione il comportamento strutturale, risulta che gli spostamenti ipotizzabili nei casi reali non sono tali da inficiare la sicurezza delle strutture.

E' comunque indispensabile, in questi casi, il monitoraggio geodetico delle coste e un'accurata analisi dei dettagli di progetto, al fine di programmare il controllo e l'eventuale manutenzione necessaria in fase di esercizio.

Long-span suspension bridges: effects of distortion between the towers

This paper analyses the effects of permanent shifts between the two towers of a suspension bridge due to slow tectonic movements. On the basis of the study described, which was carried out on a simplified model that provides a good approximation of the structural behaviour of the bridge, we can see that if the theoretical shifts were to occur in real these would have no influence on the safety of the structures. In such cases it is essential, however, to monitor the costs in geodesic terms and carry out a careful detailed analysis of the design with a view to programming the checks and any maintenance operations that might be necessary while the bridge is in operation.

Dr. ing. Paolo Clemente

ENEA Centro Ricerche Casaccia, Roma

1. INTRODUZIONE

Il violentissimo terremoto che il 17 gennaio 1995 devastò Kobe aveva l'epicentro in prossimità dell' Akashi Kaikyo Bridge (fig. 1), il ponte sospeso la cui campata principale è attualmente la più lunga al mondo. Al momento dell'evento sismico erano stati eretti i due piloni ed erano state messe in opera le funi principali, soggette perciò al solo peso proprio. Le strutture superarono egregiamente gli effetti del sisma, che causò anche uno spostamento permanente di allontanamento tra i due piloni di circa 1 m. Il progetto dell'impalcato fu adeguato alla nuova geometria, la costruzione proseguì e nella primavera del 1998 il ponte fu aperto al traffico (esclusivamente stradale), presentando una luce centrale maggiore di quella prevista inizialmente in sede di progetto: 1991 m anziché 1990.

Il tema degli spostamenti relativi tra le coste cui sono ancorate le estremità di un ponte sospeso è tornato a galla recentemente, con la pubblicazione di uno studio sulle coste della Sicilia e della Calabria, in corrispondenza dei punti dove dovrebbero essere fondati i piloni del Ponte sullo Stretto (Antonioli et al., 2002). In particolare, per effetto di movimenti della costa siciliana e della costa calabrese, la prima subirebbe rispetto alla terraferma (ma è giusto chiamarla così?) sia spostamenti verticali che orizzontali.

Va osservato che gli spostamenti lenti, al contrario di quelli generati da un sisma, sono facilmente controllabili; d'altra parte, se le distorsioni agiscono sulla struttura già interamente realizzata, sono interessati funi, piloni e ancoraggi, soggetti al carico di esercizio, e anche la travata; inoltre, non va sottovalutata la maggiore sensibilità alle distorsioni del percorso ferroviario rispetto a quello stradale.

Nel presente lavoro si riportano alcune considerazioni sugli effetti delle distorsioni permanenti sui ponti sospesi, prendendo in esame separatamente i casi di spostamenti relativi longitudinali, trasversali e verticali tra le due sponde.

2. IL MODELLO STRUTTURALE

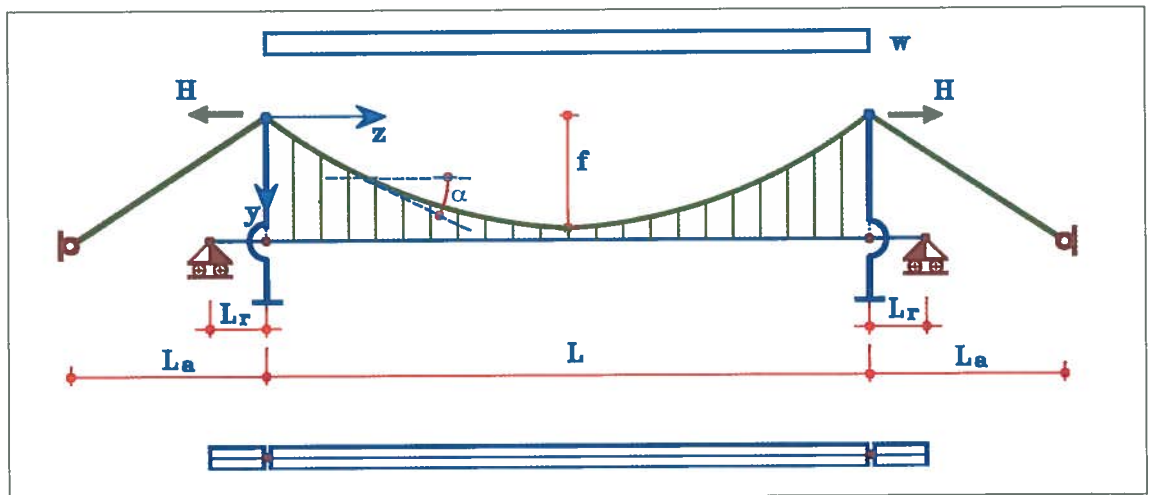
Lo schema di riferimento è mostrato in figura 2. Si opera nelle seguenti ipotesi:

- l'impalcato è sospeso alla fune principale soltanto nella campata centrale; tra la campata centrale e quelle di riva, ove presenti, esiste una cerniera sferica; in tal caso, in corrispondenza dei piloni, sono impediti gli spostamenti trasversali dell'impalcato, mentre sono consentiti quelli verticali e longitudinali; sono presenti appoggi scorrevoli ad entrambe le estremità della travata (eventualmente alle estremità della campata centrale, in caso di assenza delle campate di riva);



Figura 1 –
L' Akashi Kaikyo
Bridge,
completato nel
1998 (foto P.
Clemente)

Figura 2 –
Modello di calcolo



- i cavi sono fissati sulla sommità delle torri. Al riguardo va osservato che in realtà i cavi possono scorrere sulle torri; lo scorrimento per effetto delle distorsioni, però, è limitato giacché legato essenzialmente alla deformazione elastica della fune nei tratti compresi tra i piloni e gli ancoraggi, dove la fune stessa, tesa tra gli estremi e soggetta lungo l'asse esclusivamente al peso proprio, assume una configurazione molto prossima a quella rettilinea. L'ipotesi è a vantaggio di sicurezza nel caso di allontanamento tra i piloni, perché la deformazione della fune nelle campate di riva consente ad essa di assumere una freccia maggiore in campata centrale, riducendo l'effetto di un allontanamento longitudinale;
- la campata centrale è soggetta esclusivamente ad un carico w uniformemente distribuito su tutta la luce che simula i carichi fissi, molto maggiori dei carichi mobili; il carico w è somma del peso proprio dell'impalcato, dei sovraccarichi permanenti e del peso proprio della fune, che è assimilabile ad un carico uniforme nel caso, tipico dei ponti sospesi di grande luce, di basso rapporto freccia/luce;
- gli spostamenti di ciascun pilone e dell'ancoraggio corrispondente sono uguali, ossia lo spostamento differenziale è trascurabile rispetto a quello tra i due piloni; pertanto, la lunghezza L_a resta costante.

Le ipotesi formulate trovano giustificazione nell'essere l'analisi qui condotta rivolta ai ponti di grande luce. Per questi, come già dimostrato in precedenti lavori (Nicolosi et al. 1998, Clemente et al. 2000), il comportamento della struttura è molto prossimo a quello della sola fune principale, essendo trascurabile il contributo irrigidente della travata. In definitiva lo studio è condotto operando sullo schema di fune semplice e valutando successivamente gli effetti sulla travata.

Si consideri dunque una fune semplice di luce L , a vincoli fissi ed allo stesso livello, soggetta ad un carico w uniformemente distribuito su tutta la luce. Detta f l'ordinata della curva d'asse in mezzeria (freccia), dall'equilibrio alla rotazione intorno alla stessa sezione di ascissa $L/2$ si ricava il parametro di tiro mediante la nota espressione:

$$\frac{H}{wL} = \frac{1}{8(f/L)^2} \quad (1)$$

mentre la curva d'asse, in funzione dei parametri geometrici, è la parabola di equazione:

$$y = 4f \left(\frac{z}{L} - \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right) \quad (2)$$

La lunghezza della fune nella configurazione deformata, assunta in presenza del carico w , è fornita dall'espressione approssimata:

$$\ell_w = L \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Dal tiro si ricava lo sforzo normale massimo agli estremi e, quindi, fissata la tensione σ in presenza del carico w , l'area del cavo A . Dall'espressione dell'area può evidenziarsi il parametro, funzione della geometria della fune e del materiale:

$$\frac{wL}{EA} = 8 \frac{f/L}{\sqrt{1 + 4(f/L)^2}} \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

Tenendo conto della (1) e della (4), la lunghezza iniziale ℓ_0 , ossia quella della fune scarica prima del montaggio vale:

$$\ell_0 = L \left[\left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) - \frac{\sigma/E}{\sqrt{1 + 4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) \right] \quad (5)$$

in cui si sono volutamente tenuti distinti i due termini pari rispettivamente alla lunghezza deformata ℓ_w e alla variazione di lunghezza per effetto della deformazione assiale. Il rapporto ℓ_0/L , è funzione soltanto del

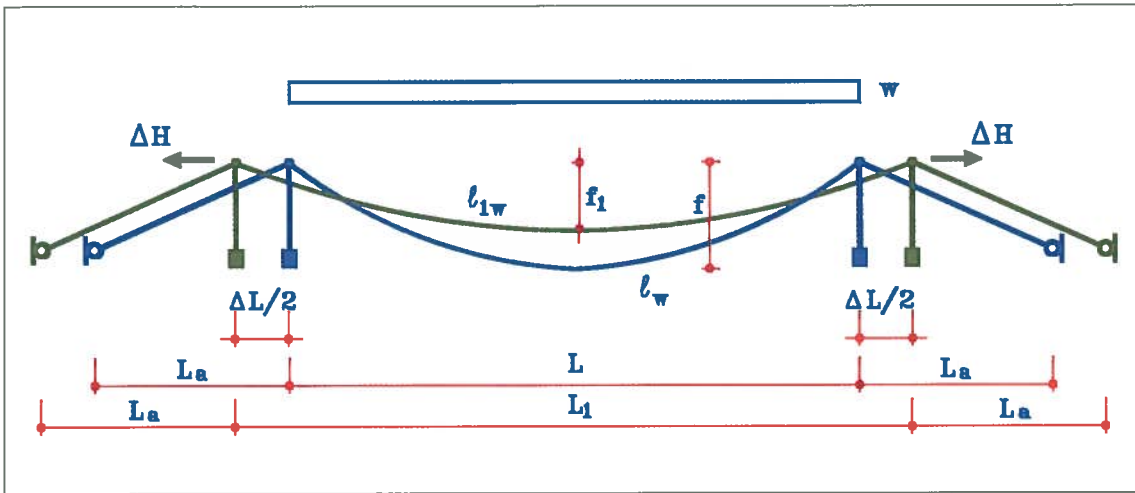


Figura 3 – Effetti di uno spostamento relativo longitudinale

rapporto f/L , che descrive la geometria della fune e del rapporto σ/E , che caratterizza il materiale.

3. EFFETTI DI UNA DISTORSIONE LONGITUDINALE

Una prima valutazione degli effetti di uno spostamento longitudinale ΔL di un estremo rispetto all'altro può effettuarsi ipotizzando che, a seguito della distorsione, la fune cambi forma ma non lunghezza. Detta $L_1 = L + \Delta L$ la luce della fune a seguito dello spostamento, la lunghezza della stessa, espressa in funzione dei nuovi parametri geometrici, è:

$$\ell_{1w} = L_1 \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Eguagliando le due espressioni si ricava il nuovo valore del rapporto freccia/luce:

$$\left(\frac{f_1}{L_1} \right)_{\ell_{1w} = \text{cost}}^2 = \frac{3}{8} \left[\frac{L}{L_1} \left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) - 1 \right] \quad (7)$$

La (7), si ripete, è ricavata nell'ipotesi che la fune, che presenta una lunghezza ℓ_w sotto il carico w , cambi forma per effetto della variazione di luce, conservando la lunghezza ℓ_w .

In realtà, per effetto della variazione della curva d'asse, cambia il valore del tiro e , e quindi, la lunghezza della fune (fig. 3). Un confronto più significativo, pertanto, va fatto ipotizzando costante la lunghezza iniziale ℓ_0 . Per effetto di uno spostamento longitudinale relativo ΔL di un estremo rispetto all'altro, le espressioni del tiro, della lunghezza deformata e della lunghezza iniziale si modificano nelle seguenti, dove con il pedice "1" sono contraddistinti i parametri relativi alla nuova configurazione:

$$\frac{H_1}{wL} = \frac{1}{8} \frac{L_1}{(f_1/L_1) L} \quad (8)$$

$$\ell_{1w} = L_1 \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\ell_0 = L_1 \left[\left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^2 \right) - \frac{L_1}{L} \frac{(f/L)}{(f_1/L_1)} \frac{1}{\sqrt{1 + 4(f/L)^2}} \frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^2 \right) \right] \quad (10)$$

Il problema quindi consiste nel trovare la nuova configurazione della fune sotto lo stesso carico w , il nuovo tiro H_1 , e la nuova lunghezza effettiva ℓ_{1w} , essendo ovviamente costante ℓ_0 . Essendo noto dalla (5) il valore di ℓ_0 , dalla (10) si ricava la cubica:

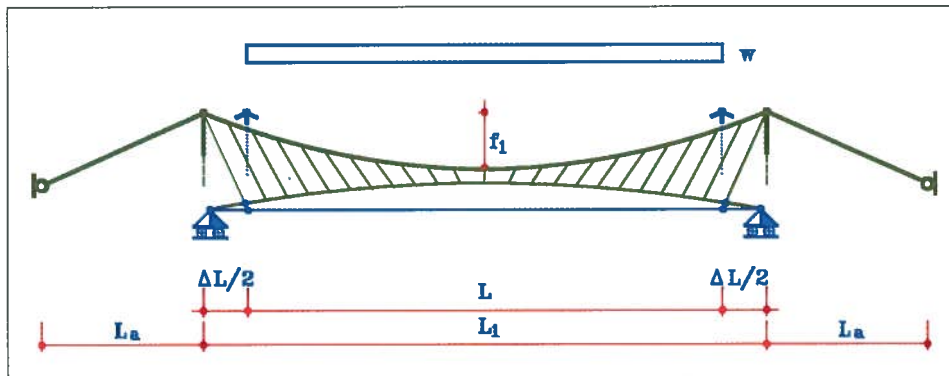


Figura 4 – Effetti di uno spostamento relativo longitudinale sulla travata

$$\begin{aligned} & \frac{8}{3} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \cdot \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^3 + \\ & - \frac{16}{3} \left[\frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{f_1}{L_1} \right)^2 + \\ & + \left[\left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) - \left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) + \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) \right] \cdot \left(\frac{f_1}{L_1} \right) + \\ & - \left[\frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

nella quale si è evidenziata la distorsione ΔL . La (11) va risolta per tentativi; noto il nuovo rapporto freccia/luce, si risale al tiro H_1 e alla lunghezza l_{1w} , rispettivamente attraverso la (8) e la (9).

L'impalcato, sospeso ai pendini, segue la fune principale nel suo movimento verso l'alto subendo uno spostamento massimo in mezzeria pari alla riduzione della freccia. I vincoli terminali, inoltre, consentono gli spostamenti longitudinali dell'impalcato e, quindi, non interferiscono con le distorsioni impresses. I pendini non subiscono variazioni di sforzo e, quindi, di lunghezza. A rigore andrebbe considerata una loro variazione di pendenza, dovuta al differente comportamento di fune e travata (fig. 4): ne deriva che la travata è leggermente tesa. Inoltre, l'impalcato presenta agli imbocchi rotazioni che potrebbero recare fastidi al percorso ferroviario. La presenza di una cerniera fissa ad un'estremità della travata causerebbe la perdita di simmetria, ma non cambierebbe la sostanza di quanto affermato.

4. EFFETTI DI UNA DISTORSIONE TRASVERSALE

Lo spostamento relativo trasversale Δu tra i due piloni causa una variazione di luce della campata principale; il nuovo valore della luce (fig. 5)

$$L_2 = \sqrt{L^2 + \Delta u^2} \approx L \quad (12)$$

è, però, praticamente coincidente con L , essendo lo spostamento Δu molto piccolo rispetto alla luce stessa. Per lo stesso motivo può asserirsi che la variazione di freccia è trascurabile. Inoltre, a seguito dello spostamento la fune si svilupperà su tre piani diversi, relativi rispettivamente alla campata principale e a quelle di riva.

Detto H_2 il tiro, che per quanto detto in relazione alla luce differisce da H per entità trascurabili, l'effetto di Δ_w si traduce in un'azione orizzontale, agente in una direzione prossima alla trasversale, individuata dall'angolo:

$$\beta = \arctan(\Delta u/L) \quad (13)$$

e, data la piccolezza di β , pari a:

$$H_\beta = 2H_2 \cdot \sin(\beta/2) \approx H \cdot \frac{\Delta u}{L} \quad (14)$$

Per quanto detto circa il tipo di vincolo tra la campata centrale e quelle di riva, uno spostamento trasversale relativo tra i piloni non ha conseguenze di rilievo sull'impalcato (fig. 6).

5. EFFETTI DI UNA DISTORSIONE VERTICALE

Per effetto di uno spostamento relativo verticale Δv tra i due piloni i vincoli della fune non sono più allo stesso livello (fig. 7). Detta f_3 l'ordinata in mezzeria, l'espressione della curva d'asse si modifica nella seguente:

$$y_3 = \Delta v \frac{z}{L} + 4 \left(f_3 - \frac{\Delta v}{2} \right) \cdot \left(\frac{z}{L} - \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right) \quad (15)$$

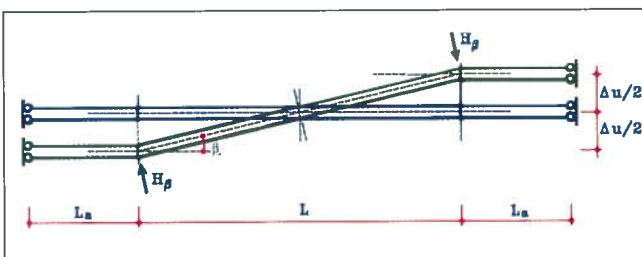


Figura 5 – Effetti di uno spostamento relativo trasversale

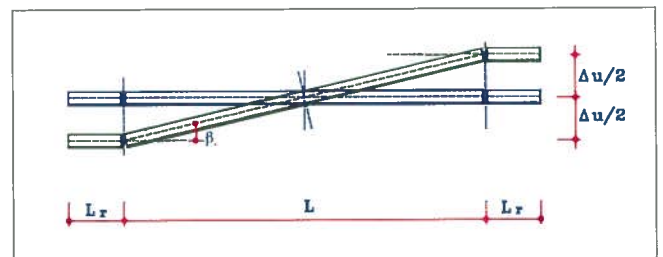


Figura 6 – Effetti di uno spostamento relativo trasversale sulla travata

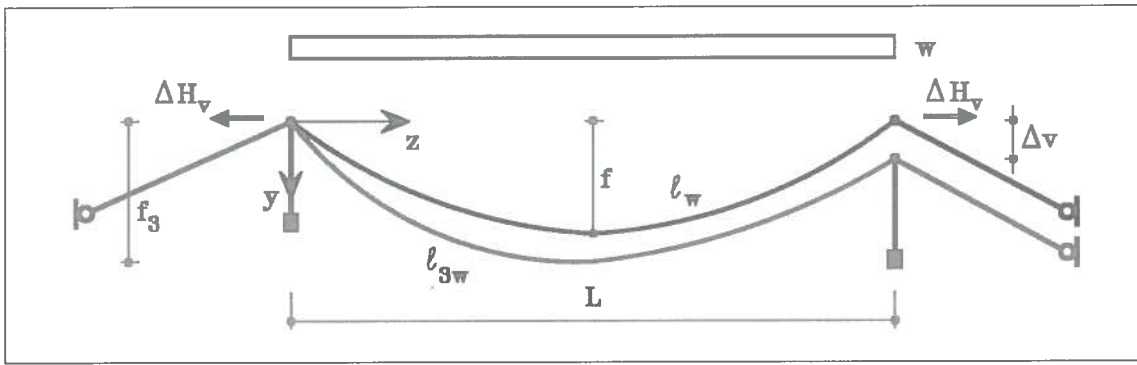


Figura 7 – Effetti di uno spostamento relativo verticale

mentre il parametro di tiro, la lunghezza deformata e la lunghezza iniziale si esprimono:

$$\frac{H_3}{wL} = \frac{1}{8(f_3/L - \Delta v/2L)} \quad (16)$$

$$l_{3w} = L \left[1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_3}{L} \right)^2 + \frac{\Delta v^2}{2L^2} \right] \quad (17)$$

$$l_0 = L \left[\left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f_3}{L} \right)^2 + \frac{\Delta v^2}{2L^2} \right) - \frac{1}{\left(\frac{f_3}{L} - \frac{\Delta v}{2L} \right)} \frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 + \frac{\Delta v^2}{L^2} \right) \right] \quad (18)$$

Eguagliando i secondi membri della (5) e della (18) si ottiene:

$$\begin{aligned} & \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_3}{L} \right)^3 + \\ & - \left[\frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} + \frac{4}{3} \frac{\Delta v}{L} \right] \cdot \left(\frac{f_3}{L} \right)^2 + \\ & + \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta v}{L} \right)^2 - \left[\left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) - \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) \right] \right] \cdot \left(\frac{f_3}{L} \right) + \\ & - \left[\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta v}{L} \right)^3 + \frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(\frac{\Delta v}{L} \right)^2 + \left[\frac{8}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 - \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} \left(1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right) \right] \left(\frac{\Delta v}{L} \right) \right] + \\ & - \frac{f}{L} \frac{\sigma/E}{\sqrt{1+4(f/L)^2}} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

che va risolta per tentativi, come detto per la (11).

6. VALUTAZIONI NUMERICHE

L'utilizzo delle formulazioni proposte richiede di fissare il rapporto f/L per quel che riguarda la geometria e il rapporto σ/E che caratterizza il materiale. Essendo il presente studio rivolto ai ponti di grande luce si è assunto $f/L = 1/11$ e $\sigma/E = 0.005$.

Nelle figure 8 e 9 sono riportati gli andamenti del rapporto f_1/L_1 e della variazione percentuale del tiro in funzione dello spostamento longitudinale relativo $\Delta L/L$ tra i piloni. Per confronto sono riportate anche le

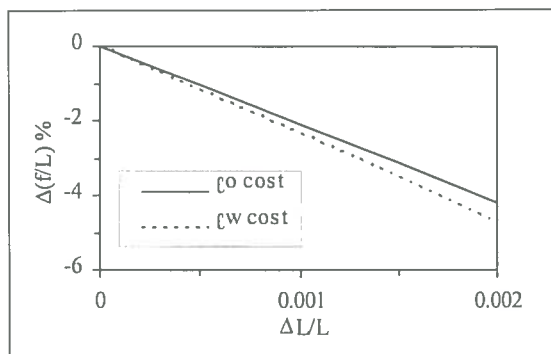


Figura 8 – Variazione % del rapporto freccia/luce per uno spostamento relativo longitudinale

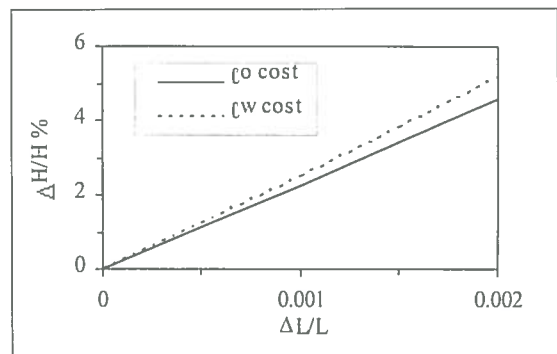


Figura 9 – Variazioni % del tiro in funzione dello spostamento relativo longitudinale

Figura 10 –
Variazioni % del
tiro per elevati
valori dello
spostamento
relativo
longitudinale

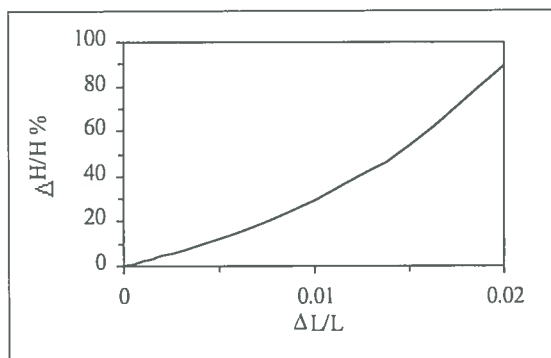


Figura 11 – Valori
% del tiro H_p/H in
funzione dello
spostamento
relativo
trasversale

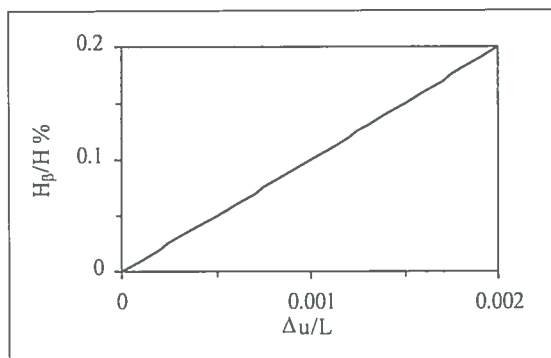
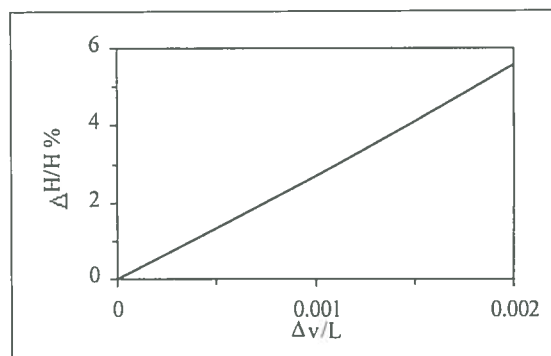


Figura 12 –
Variazioni % del
tiro in funzione
dello spostamento
relativo verticale



curve ottenute nell'ipotesi di lunghezza costante (ℓ_w cost), molto prossime a quelle ottenute tenendo conto della variazione di lunghezza (ℓ_0 cost). L'andamento pressoché lineare è giustificato dall'essere gli spostamenti impressi, e quindi le variazioni di freccia e di tiro, molto piccoli rispetto ai valori assoluti iniziali. Infatti per valori maggiori di $\Delta L/L$ si evidenzia un andamento fortemente non-lineare (fig. 10). In figura 11 è riportato l'andamento di H_p/H in funzione della distorsione trasversale $\Delta u/L$. La figura 12 mostra l'incremento di tiro in funzione dello spostamento verticale.

In tutti i casi si ottengono variazioni del tiro molto contenute, almeno fino a valori delle distorsioni non superiori a $0.001 \cdot L$, che può essere assunto come valore limite di guardia. Va anche osservato che al crescere della luce si ottengono variazioni percentuali inferiori, a parità di distorsione assoluta.

Attesa la linearità del comportamento, i diagrammi illustrati sono validi anche per spostamenti di segno opposto a quelli ipotizzati.

7 CONCLUSIONI

Gli spostamenti relativi ipotizzabili tra i piloni di un ponte sospeso di grande luce determinano piccole variazioni della geometria e, di conseguenza, piccoli incrementi percentuali delle sollecitazioni che rientrano negli intervalli di variabilità delle sollecitazioni stesse per effetto dei carichi accidentali. Nella progettazione vanno, comunque, valutati gli effetti delle distorsioni sui dettagli costruttivi, quali giunti e vincoli interni ed esterni, sui quali non sono da escludere interventi di manutenzione correttivi durante la vita del ponte. La possibilità di realizzare tali interventi va, ovviamente, prevista in fase di progetto, così come l'installazione di un adeguato sistema di monitoraggio della struttura.

BIBLIOGRAFIA

Antonioli F., Sylos Labini S., Ferranti L., "Il ponte sullo Stretto: problematiche geologiche", Energia, Ambiente e Innovazione, ENEA, No. 1, 2002

Clemente P., Nicolosi G., Raithel A., "Preliminary design of very long-span suspension bridges", Int. J. Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, Vol. 22, No. 12, 1699-1706, 2000

Nicolosi G., Raithel A., Clemente P., "Static Issues in Very Long-Span Suspension Bridge Design", Proc., IABSE Symposium Long-Span and High-Rise Structures (Kobe, September), IABSE, Zurich, 545-546, 1998

Stretto di Messina S.p.A., Ponte sullo Stretto di Messina. Progetto definitivo. Relazione di sintesi generale, Società Stretto di Messina S.p.A., 1997