

Effetti dei movimenti tettonici nei ponti sospesi di grande luce

Paolo Clemente, Ph.D., già Dirigente di Ricerca ENEA

INTRODUZIONE

Negli ultimi secoli il volume di traffico via mare è aumentato notevolmente e sta tuttora aumentando e, con esso, anche le dimensioni delle imbarcazioni. Ciò rende necessario allargare lo spazio libero per la navigazione e, di conseguenza, realizzare ponti di luce sempre maggiore. La soluzione di luci maggiori su un numero minore di pile è anche notoriamente meno costosa rispetto a quella di luci minori su un numero maggiore di pile, specie se con fondazioni profonde in acqua. Anche il vantaggio di ridurre il rischio di collisione di natanti contro i piloni non va trascurato.

Attualmente il primato della luce spetta al 1915 Canakkale Bridge, sullo stretto dei Dardanelli in Turchia, aperto al traffico nel 2022: la sua campata centrale raggiunge i 2023 m. Com'è noto, nel recente passato sono stati proposti diversi ponti di luce maggiore: tra questi il ponte sullo stretto di Messina, il cui progetto prevede una campata centrale di 3300 m, e quello sullo stretto di Gibilterra, per il quale esistono due proposte, una con luci di 3500 m e una con luci di 5000 m.

Tali distanze sono attualmente superabili con campate sospese a funi di acciaio armonico (Pugsley 1968, Buonopane and Billington 1993, Clemente 2022). La notevole distanza tra i punti di ancoraggio al suolo pone per tali ponti un problema che normalmente non si pone per strutture di dimensioni ordinarie: la possibilità di spostamenti tettonici tra le fondazioni e la variabilità spaziale dell'input sismico (Antonioli et al. 2002, Barreca et al. 2021, Doglioni et al. 2012, Lo Presti et al. 2022).

Spesso un ponte sospeso supera una o più faglie (Jia et al., 2012); è probabile, quindi, che possa essere interessato da movimenti tettonici lenti ma anche da violenti terremoti. Accadde in Giappone il 15 gennaio 1995, quando un violento sisma colpì l'Akashi Kaikyo Bridge, allora in costruzione, causando uno spostamento residuo di circa 1 *m* di uno dei due piloni (Yamagata et al., 1996). L'impalcato fu ridisegnato, adattandolo alla nuova geometria, e la costruzione proseguì. Al momento dell'inaugurazione nel 1998, l'Akashi Kaikyo era il ponte più lungo al mondo e ha tenuto il primato fino al 2022.

SCHEMA TIPICO DI UN PONTE SOSPESO

Lo schema tipico di ponte sospeso prevede una campata centrale di lunghezza L e due campate di riva, di lunghezze rispettivamente L_a e L_b (Figura 1). In quella centrale, l'impalcato è in genere sospeso a due funi parallele, poste alle estremità trasversali dell'impalcato stesso, tramite pendini; in quelle laterali, l'impalcato può essere sospeso per tutta la lunghezza delle funi o per solo una parte di esse o non essere sospeso bensì sostenuto da pile o altre strutture indipendenti. Le campate laterali possono anche non rispettare la simmetria, presentando luci diverse, come diverse possono essere le lunghezze delle porzioni di impalcato sospese.



Le funi sono rigidamente ancorate al suolo alle loro estremità (A e D), mentre possono scorrere in sommità ai piloni (B e C) evitando di trasmettere a questi il tiro, ossia la componente orizzontale dello sforzo nelle funi stesse. A volte le estremità delle funi si chiudono sull'impalcato, trasmettendo ad esso un notevole sforzo di compressione: si parla, in tal caso, di sistema auto-ancorato, che non viene utilizzato per ponti di grande luce.

Il comportamento di un ponte sospeso è influenzato anche dal contributo irrigidente della travata che, però, si riduce al crescere della luce fino a diventare pressoché ininfluente per ponti di grandissima luce.

Nel seguito si farà riferimento allo schema con le tre campate interamente sospese alle due funi. Pertanto, anche il carico permanente *w* sarà pressoché uguale nelle tre campate. Inoltre, si assumeranno i seguenti rapporti tipici tra le varie grandezze geometriche:



Figura 1. Schema tipico di un ponte sospeso.

LA LUCE LIMITE

Quale è la luce massima realizzabile con lo schema sospeso e con i materiali attualmente disponibili?

Si consideri il caso di una fune soggetta soltanto al suo peso proprio. Con riferimento a ponti di grande luce, il rapporto f/L assume valori non superiori a 1/10 e, pertanto, il peso proprio della fune w_c può essere approssimato a un carico uniformemente distribuito:

$$w_c = \gamma_c A_c \cdot \ell / L = \gamma A_c$$

essendo ℓ la lunghezza della fune nella configurazione deformata sotto il suo peso proprio. Il peso specifico γ è, quindi, un peso specifico equivalente che tiene conto dell'effettiva lunghezza della fune ed è proporzionale a γ_c . In presenza del solo peso proprio della fune, il tiro vale:

$$H = \gamma A_c \cdot \frac{L}{8f/L}$$

e lo sforzo massimo (in B e C) è:

$$N_{\rm max} = \gamma A_c \cdot \frac{L}{8 f / L \cdot \cos \alpha}$$

Essendo α l'angolo che la tangente alla fune forma con l'orizzontale. Eguagliando N_{max} allo sforzo di progetto del cavo, pari a $f_d A_c$, con f_d tensione di calcolo e A_c area del cavo, si ottiene il massimo valore della



luce, che dipende soltanto dalle caratteristiche del materiale e dalla geometria della struttura ma non dall'area del cavo:

$$L_{\rm lim} = 8 f / L \cdot \cos \alpha \cdot \frac{f_d}{\gamma}$$

Con $f/L \cos \alpha \approx 0.1$ e assumendo valori usuali per il peso specifico e la resistenza dell'acciaio armonico $(f_d/\gamma \approx 10^4 \text{ m})$, risulta $L_{lim} \approx 8000 \text{ m}$.

Si può dimostrare (Clemente et al., 2000) che, detto β il rapporto tra il carico addizionale (sovraccarico permanente + carico mobile, entrambi uniformemente distribuiti sull'intera luce) e il peso proprio, per ciascuna fune, tiro e sforzo massimo diventano, rispettivamente:

$$H = \gamma A_c \cdot (1 + \beta) \frac{L}{8f/L}$$
$$N_{\text{max}} = \gamma A_c \cdot (1 + \beta) \frac{L}{8f/L \cdot \cos \alpha}$$

e la luce limite risulta:

$$L_{\rm lim} = \frac{8f/L \cdot \cos\alpha}{1+\beta} \cdot \frac{f_d}{\gamma}$$

Per β = 1, ossia nel caso di fune in grado di portare un carico addizionale pari al peso proprio, la luce limite si dimezza, risultando pari a circa 4000 *m*. La possibilità di realizzare ponti di luce maggiore, come ben noto, è legata al rapporto f_d/γ e, quindi, alla disponibilità di materiali più resistenti e più leggeri.

La configurazione meccanica e geometrica della struttura in presenza dei soli carichi permanenti, nell'ipotesi usuale di piloni alla stessa quota, può essere rappresentata tramite il parametro adimensionale

$$\rho = \frac{\alpha f_d}{E\sqrt{(L/f)^2 + 16}}$$

dove α (<1) rappresenta il rapporto tra la tensione in presenza dei soli carichi permanenti (peso proprio delle funi + sovraccarichi permanenti) e la tensione di calcolo f_d . Nel seguito si assumerà α = 0.9, valore tipico per ponti di grande luce.

EFFETTI DI UNO SPOSTAMENTO RELATIVO TRA I PILONI

Un ponte sospeso presenta periodi di vibrazione molto lunghi (anche decine di secondi) che lo renderebbero insensibile agli scuotimenti dovuti ai terremoti. Non vanno però trascurati alcuni aspetti.

Il primo riguarda gli effetti che un evento sismico, specie se con epicentro a poca distanza (*near field*), può avere sulle strutture di ancoraggio delle funi al suolo e sui piloni. Inoltre, a causa della distanza tra piloni e ancoraggi delle funi al suolo, vanno tenuti in debito conto sia la variabilità dell'input sismico sia il problema degli spostamenti relativi residui tra i punti di vincolo delle funi, che vanno a sommarsi a quelli tettonici lenti, contribuendo a cambiare la geometria del ponte. Nel seguito ci si sofferma su quest'ultimo aspetto.

Un insieme di spostamenti relativi tra i piloni e gli ancoraggi delle funi al suolo determina un cambiamento delle luci e, quindi, delle frecce e del tiro H. Assumendo che le funi assumano una forma parabolica sia prima che dopo l'applicazione dell'insieme di spostamenti suddetto, le due configurazioni, ante e post, sono definite soltanto dalla freccia f della campata centrale che può essere individuata attraverso



l'equazione di congruenza che impone l'unicità della lunghezza totale iniziale di ciascuna fune in condizioni scariche (Clemente, 2024). Su tali basi è stata eseguita un'ampia indagine numerica sugli effetti degli spostamenti tettonici sui ponti sospesi di grande luce, considerando separatamente i casi di spostamento longitudinale, verticale e trasversale di un solo ancoraggio terminale delle funi (D) e dell'ancoraggio e del pilone corrispondente (C e D). Volutamente è stato considerato un intervallo di spostamenti più ampio di quello ipotizzabile nella realtà.

In Figura 2 sono diagrammati i valori di *f* e *H* rapportati a quelli iniziali, nel caso di spostamenti longitudinali. In particolare, in Figura 2a sono riportati i valori dovuti allo spostamento del solo ancoraggio D, in Figura 2b quelli dovuti allo spostamento contemporaneo e di uguale entità dell'ancoraggio D e del pilone C. Come si evince, nel primo caso, spostamenti pari all'1% della luce della campata principale causano variazioni della freccia e del tiro non superiori al 15% dei rispettivi valori nella configurazione iniziale. Leggermente maggiori risultano le variazioni dovute al contemporaneo spostamento di C e D.

Per entrambe le situazioni, nel caso di allontanamento, ossia uno spostamento longitudinale positivo, la luce della campata centrale aumenta e la freccia diminuisce ($f_1 < f$); di conseguenza il tiro aumenta ($H_1 > H$). Se, invece, si ha un avvicinamento, ossia uno spostamento longitudinale negativo, la luce diminuisce, la freccia aumenta ($f_1 > f$) e il tiro si riduce ($H_1 < H$).



Figura 2. Variazioni della freccia f e del tiro H per effetto (a) dello spostamento longitudinale di D e (b) dello spostamento longitudinale, contemporaneo e di uguale entità, di C e D.

In Figura 3 sono diagrammati i valori di *f* e *H* rapportati a quelli iniziali, per il caso di spostamenti verticali. In Figura 3a sono riportati i valori dovuti allo spostamento del solo ancoraggio D, in Figura 3b quelli dovuti allo spostamento, contemporaneo e di uguale entità, dell'ancoraggio D e del pilone C. Nel primo caso, uno spostamento verso il basso dell'1% della luce della campata principale causa una variazione del 12% della freccia e del 13% del tiro. Leggermente inferiori sono le variazioni per uno spostamento verso l'alto. Nettamente inferiori sono, invece, gli effetti dovuti al contemporaneo spostamento di C e D.

In Figura 4 sono diagrammati i valori di *f* e *H* rapportati a quelli iniziali, per il caso di spostamenti verticali. In Figura 4a sono riportati i valori dovuti allo spostamento del solo ancoraggio D, in Figura 4b quelli dovuti allo spostamento, contemporaneo e di uguale entità, dell'ancoraggio D e del pilone C. Uno spostamento dell'1% della luce della campata principale causa, in entrambi i casi, variazioni trascurabili sia della freccia sia del tiro.

Come è ovvio, uno spostamento relativo longitudinale comporta effetti maggiori rispetto a uno spostamento trasversale o verticale di parità di entità, in quanto determina una maggiore variazione delle luci interessate.





Figura 3. Variazioni della freccia f e del tiro H per effetto (a) dello spostamento verticale di D e (b) dello spostamento verticale, contemporaneo e di uguale entità, di C e D.



Figura 4. Variazioni della freccia f e del tiro H per effetto (a) dello spostamento trasversale di D e (b) dello spostamento trasversale, contemporaneo e di uguale entità, di C e D.

La variazione di tiro, si traduce in una variazione della tensione sotto i carichi permanenti, ossia in una variazione del già definito fattore α , ossia del rapporto tra la tensione effettiva in presenza dei solo carichi permanenti e quella di progetto. In Figura 5 è diagrammato il valore del fattore α a seguito di uno spostamento longitudinale e uno verticale, contemporanei e di uguale entità, di C e D. Si evince che per spostamenti dell'ordine del 0.45% della luce principale la tensione raggiunge quella di progetto, rendendo la struttura incapace di sopportare ulteriori carichi.



Figura 5. Variazione della tensione nei cavi per effetto di spostamenti longitudinale e verticale, contemporanei e di uguale entità, di C e D.



Va osservato che in caso di avvicinamento e, quindi, di riduzione della tensione, le funi potrebbero diventare più deformabili di quanto previsto in fase di progetto.

CONCLUSIONI

Movimenti tettonici lenti e spostamenti residui di un evento sismico rappresentano effetti di cui tener conto nel progetto di un ponte sospeso di grande luce e nella verifica di un ponte esistente. Al riguardo, il monitoraggio dei punti di vincolo delle funi al suolo, ossia i piloni e gli ancoraggi terminale, sarebbe sufficiente per controllare tali effetti e intervenire in tempo utile, qualora necessario.

BIBLIOGRAFIA

- Antonioli F., Sylos Labini S., Ferranti L. Il Ponte sullo Stretto: Problematiche geologiche. *Energia Ambiente e Innovazione* 2002, 1, 63–67.
- Barreca G., Gross F., Scarfi L., Aloisi M., Monaco C., Krastel S. The Strait of Messina: Seismotectonics and the source of the 1908 earthquake. *Earth-Science Reviews* 2021, 218, 103685, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103685.
- Buonopane S.G., Billington D.P. Theory and History of Suspension Bridge Design from 1923 to 1940. *Journal* of Structural Engineering 1993, 119, 954–977, https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:3(954).
- Clemente P. L'evoluzione dei ponti: materiali e schemi strutturali. INGENIO 2022, https://www.ingenioweb.it/ (versione aggiornata di: Clemente P. I ponti: monumento al progresso, INGENIO 2018).
- Clemente P. Effects of differential displacements between the ground anchors in suspension bridges. *Infrastructures* 2024, Vol. 9, Issue 11, Article Number 211, https://doi.org/10.3390/infrastructures9110211.
- Clemente P., Nicolosi G., Raithel A. Preliminary design of very long-span suspension bridges. *Engineering Structures* 2000, 22, 1699–1706, https://doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00112-1.
- Doglioni C., Ligi M., Scrocca D., Bigi S., Bortoluzzi G., Carminati E., Cuffaro M., D'Oriano F., Forleo V., Muccini
 F., Riguzzi F. The tectonic puzzle of the Messina area (Southern Italy): Insights from new seismic reflection data. *Scientific Reports* 2012, 2, 970, https://doi.org/10.1038/srep00970.
- Jia H., Jia K., Sun C., Li Y., Zhang C., Zheng S. Preliminary numerical study on seismic response of ordinary long-span suspension bridges crossing active faults. *Advances in Bridge Engineering* 2021, 2, 16, https://doi.org/10.1186/s43251-021-00035-w.
- Lo Presti V., Antonioli F., Casalbore D., Chiocci F.L., Lanza S., Sulli A., Randazzo G. Geohazard assessment of the north-eastern Sicily continental margin (SW Mediterranean): Coastal erosion, sea-level rise and retrogressive canyon head dynamics. *Marine Geophysical Research* 2022, 43, 2, https://doi.org/10.1007/s11001-021-09463-9.

Pugsley A. The Theory of Suspension Bridges, 2nd Ed., Arnold LTD: London, UK, 1968.

Yamagata M., Yasuda M., Nitta A., Yamamoto S. Effects on the Akashi Kaikyo Bridge. *Soils and Foundations* 1996, 36, 179–187, https://doi.org/10.3208/sandf.36.Special_179.