

Ars Pontificia et Scientia: alcune riflessioni

WEBINAR – 2 luglio 2021

EVOLUZIONE DELLA COSTRUZIONE DEI PONTI DI GRANDE LUCE

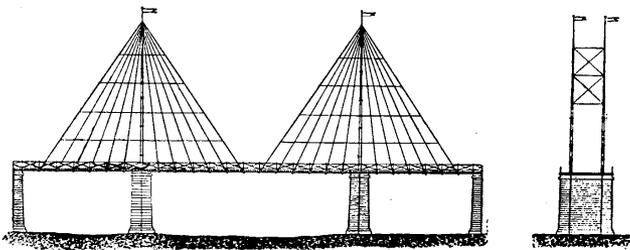
Mario Como
AISI

Il grande sviluppo della costruzione dei ponti di grande luce, avvenuto negli ultimi due secoli, pur penalizzato da molti insuccessi, è stato dovuto ai contemporanei avanzamenti dell'Ingegneria strutturale e della Tecnologia dei materiali.

Nel seguire tale evoluzione, ci si soffermerà ad evidenziare i momenti di crisi verificatisi ed i conseguenti momenti di progresso nella conoscenza del comportamento di tali opere.

Due diverse tipologie caratterizzano, a partire dai primi dell'Ottocento, i ponti di grande luce: *il ponte strallato ed il ponte sospeso*, inizialmente in ferro e poi in acciaio.

Il primo ha travata sostenuta da cavi rettilinei (stralli) che si dipartono dalla testa delle pile e si agganciano alla travata; il secondo ha travata sostenuta da cavi, prima a catene e poi a fune, che si appoggiano sulla sommità delle pile e si ancorano a terra.



Puyet 1821



Ponte sul Menai (1826); $L = 168$ m a catene articolate

La storia della costruzione di questi ponti fu segnata inizialmente da molti insuccessi. Molti di questi ponti crollarono poco dopo la costruzione, così come il ponte sul Menai.

La riconosciuta, ma, all'epoca, non compresa, della tipologia del ponte strallato

Soprattutto i ponti strallati crollarono in gran numero, tanto che la loro costruzione fu bandita in tutta Europa per oltre un secolo: essa riprese solo a partire dalla metà del Novecento.

La grande evoluzione del ponte sospeso

E' la sola soluzione a ponte sospeso che venne quindi perseguita sistematicamente a partire dalla prima metà dell'Ottocento. Si ricordano il :ponte sul Garigliano (L= 80 m) di Giura (1838); il ponte Clifton (L= 214 m) di Brunel: entrambi esempi di ponti sospesi, rimasti in funzione per circa un secolo.

I primi ponti con cavi in funi di acciaio



Ponte sulle cascate del Niagara (1855)

Ellet, Roebling

L = 251 m

Travata in ferro battuto

Treni e carrozze



Ponte di Brooklyn (1867–1883)

Roebling

L = 486 m

Travata in ferro battuto e funi di acciaio

Il progetto integra l'azione di sostegno dei cavi con quella di stralli aggiuntivi

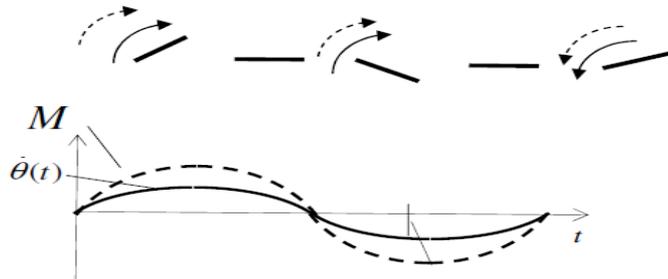
Dalla curvatura dei cavi si riconosce che gli stralli sostengono le fasce laterali della travata, mentre le funi la sostengono nella sua zona centrale.

Tale soluzione, molto brillante, dovuta alle intuizioni creative di Roebling, non venne più adottata ulteriormente per le incertezze sulla capacità di sostegno degli stralli, in relazione alle vicende della costruzione dei ponti strallati costruiti in Europa.



I primi approcci alla definizione della statica del ponte sospeso

Punto debole del cavo: incapacità di sostegno dei carichi antisimmetrici



Rankine (1858): modello travata rigida

Tutti i carichi uniformemente distribuiti si consideravano sostenuti dalle sole funi, tutti gli altri carichi dalla sola trave. Conseguenze: travata a sezione trasversale sovradimensionata



Un ponte costruito a travata rigida

Williamsburg bridge (1903) (sull'East River New York)

$L = 480 \text{ m}$, $h = 12 \text{ m}$; $h/L = 1/40$

2 corsie stradali + 2 linee ferroviarie

Pietra miliare nell'evoluzione della progettazione dei ponti sospesi: la formulazione rigorosa della statica del ponte (Melan 1888)

Ipotesi: Pendini di sostegno inestensibili

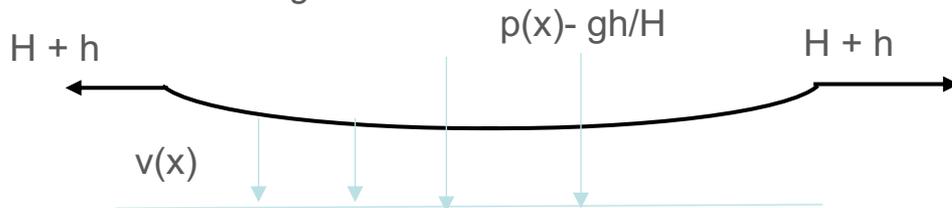
Configurazione da peso proprio $y(x)$. Deformata aggiuntiva $v(x)$ delle funi e della travata per effetto del carico $p(x)$ sulla travata

Pietra miliare nell'evoluzione della progettazione dei ponti sospesi: la formulazione rigorosa della statica del ponte (Melan 1888)

Equazioni integro-differenziali del ponte sospeso

$$EIv^{iv} - (H + h)v''(x) = p(x) - \frac{h}{H}g$$

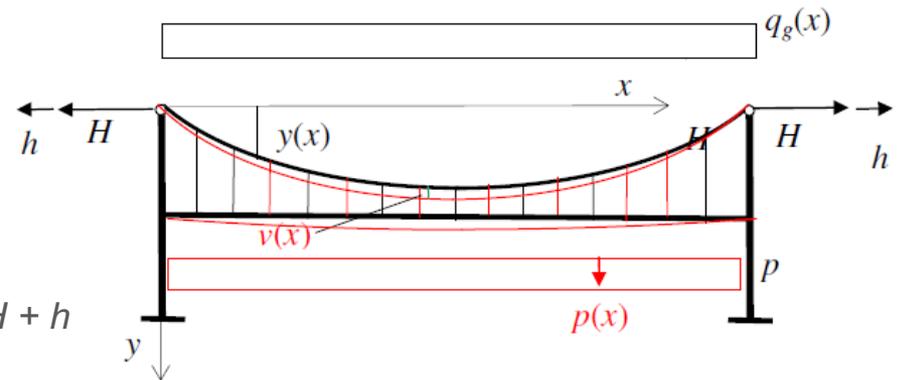
Contributo offerto dalle funi al sostegno del carico $p(x)$ sulla travata: *tenso-flessione irrigidente dovuta al tiro $H + h$ e controcarico $-gh/H$*



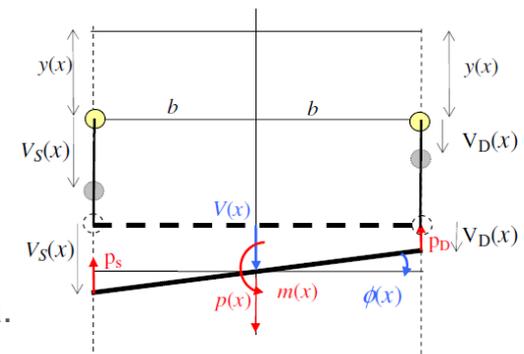
$$\frac{h}{EA} \int_0^L (1 + y'^2) dx = \frac{g}{H} \int_0^L v(x) dx$$

$$\rightarrow \int_0^L v(x) dx = 0$$

Eguaglianza tra l'allungamento estensionale e quello dovuto a $v(x)$
 Conseguenze: Non è richiesta elevata rigidezza flessionale della travata.
 Estensione della teoria alla flessio-torsione del ponte (Moissef, 1938)



Semplificazione: Cavo inestensibile



I primi ponti progettati con la teoria esatta di Melan



Ponte di Manhattam sull'East River (1901-1902)

$L = 484$ m altezza travata $h = 7.5$ m, $h/L = 1/65$

2 livelli: superiore 4 corsie stradali; inferiore 3 corsie stradali + 2 linee metro
Ciononostante permane la prudente concezione di Rankine di non snellire la travata

I primi ponti progettati con la teoria esatta di Melan



*George Washington Bridge sull'Hudson (1931)
Collega Manhattan con il New Jersey
 $L_c = 1066$ m.*

Due vie di traffico stradale: una superiore (8 corsie) ed una inferiore (6 corsie) $B = 36$ m
Travata reticolare in acciaio a sezione chiusa: $h = 18,5$ m; $h/L = 1/58$

I ponti progettati con la teoria esatta di Melan



Whitestone bridge sull'East River (1939)

Collega i Bronx con i Queens.

$L = 700$ m; $h/L = 1/120$.

Sei corsie di traffico

E' un ponte molto snello, progettato applicando pienamente la teoria di Melan.

La non esigenza di avere la travata flessionalmente rigida comportò la costruzione di ponti a travata sempre più snella ed elegante.

Il ponte di Tacoma



Primo ponte di Tacoma, sul Tacoma Narrows
(1940)

Moisseff

$L = 853 \text{ m}$, $h = 2,40 \text{ m}$

Larghezza pari a 12 m

Impalcato in acciaio a travi metalliche
longitudinali.

Travata molto snella e poco rigida a torsione

$h/L = 1/350$

I lavori di costruzione iniziarono il 23 novembre 1938 e la struttura fu aperta
al traffico il 1° luglio 1940.

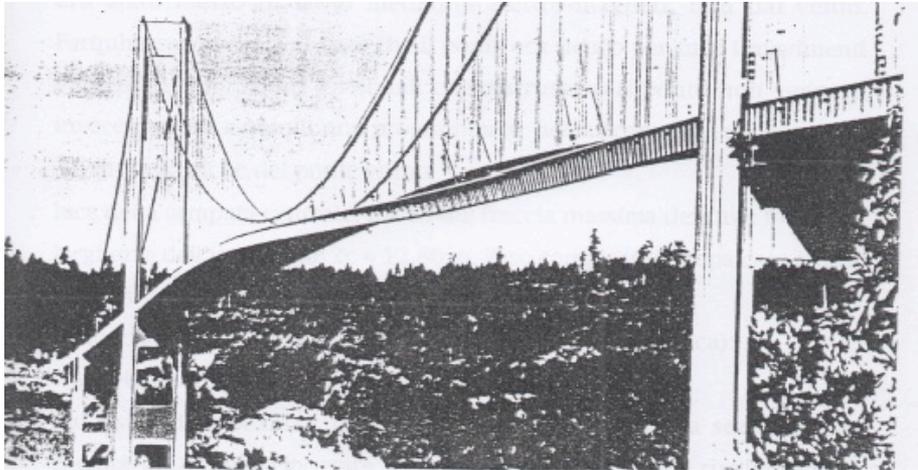
Il crollo del ponte di Tacoma



Il disastro del ponte di Tacoma del 7 novembre 1940

Velocità del vento: costante, circa 60 km/h

Cause del crollo del ponte di Tacoma



Flutter torsionale o flesso-torsionale

Il ponte di Tacoma aveva la richiesta resistenza per sostenere tutti i carichi agenti compresi quelli torsionali e quelli laterali, rappresentativi, con gli standard dell'epoca, anche dell'azione del vento. Il ponte non aveva la necessaria rigidità per contrastare l'instabilità aerodinamica dovuta al vento (Steinmann, 1945, Krall, 1955).

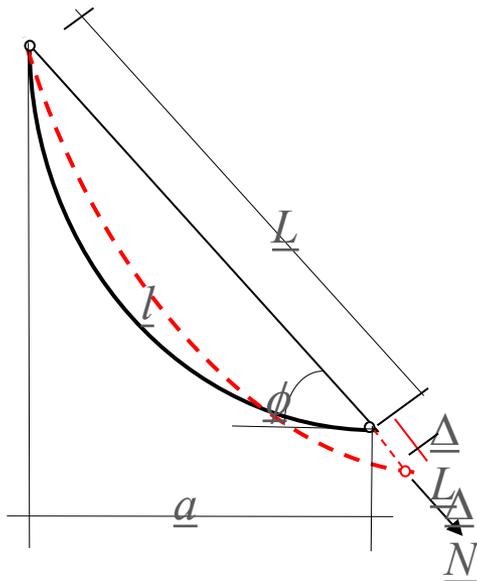
A causa dello scoppio della seconda guerra mondiale gli studi sulla costruzione dei grandi ponti si arrestano

La ripresa della costruzione dei ponti strallati

Dopo la seconda guerra mondiale i ponti della Germania dovevano essere ricostruiti. Le luci degli attraversamenti consigliavano la realizzazione di ponte a travata irrigidita da stralli. Il problema della valutazione della capacità di sostegno dello strallo, dopo l'arresto della costruzione dei ponti strallati avvenuto nel secolo precedente, era d'altra parte rimasto ancora insoluto.

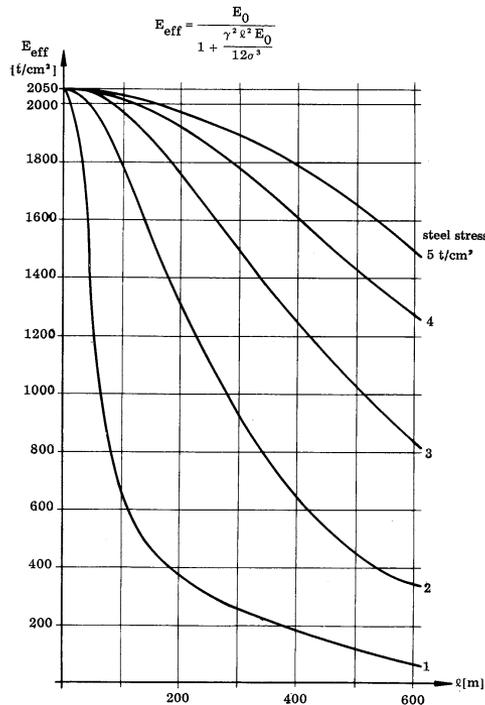
La rigidità dello strallo non poteva essere quella puramente estensionale del pendolo rettilineo inclinato, come veniva schematizzato lo strallo all'epoca della costruzione dei primi ponti strallati, agli albori della scienza delle costruzioni.

Il lungo strallo, incurvato dal proprio peso, sollecitato ad abbassarsi alla sua estremità per effetto della deformazione della travata, subiva, oltre che un allungamento estensionale, anche una rilevante modifica della sua configurazione curva ed esercitava quindi un contrasto molto più ridotto rispetto a quello che avrebbe potuto esplicare se fosse stato rettilineo



Modulo tangente di Dischinger

$$E_t^* = \frac{E}{1 + \frac{E\gamma^2 a^2}{12\sigma_1^3}}$$



Il primo ponte strallato moderno, con stralli in acciaio di forte resistenza, è lo Strömsund Bringe (Svezia) di 183 m, realizzato da Dischinger nel 1955.

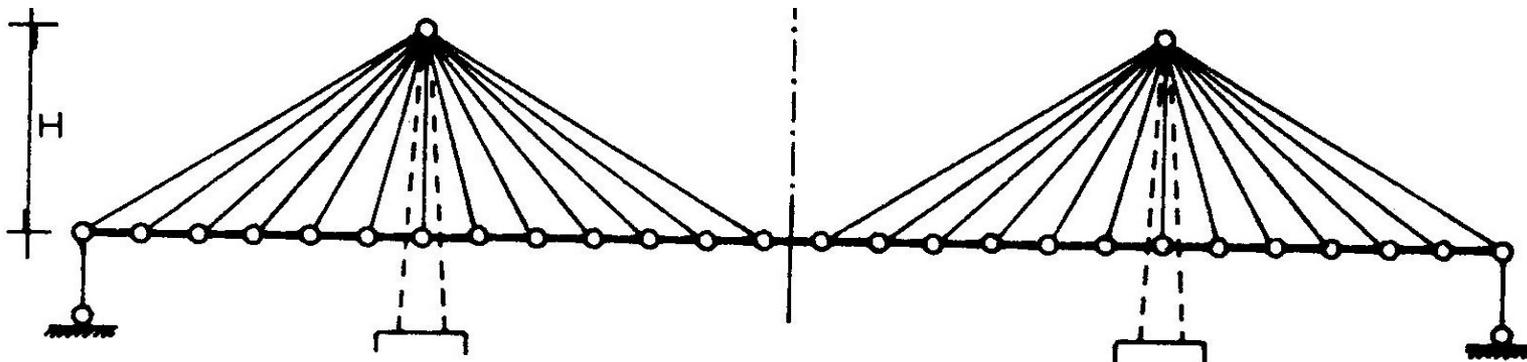
Le guaine di protezione utilizzate per la protezione dalla corrosione dell'acciaio degli stralli amplificano il peso degli stralli.
Il grande sviluppo nella Tecnologia dell'acciaio ad alta resistenza consente comunque ad oggi l'uso di stralli di grande lunghezza in grado di ridurre notevolmente l'effetto Bauschinger

Sviluppo della costruzione dei ponti strallati dalla metà del Novecento ad oggi

Il ponte strallato di grande luce, a ventaglio, è costituito da una grande struttura reticolare isostatica con travata sospesa alla testa delle grandi antenne e passante, senza appoggiarsi, attraverso queste ultime.

La travata, sotto carico permanente, è soggetta a sforzi di compressione variabile lungo la sua lunghezza e dovuti alle azioni di sostegno esplicate dagli stralli inclinati e scarica alle sue estremità lo sforzo di compressione terminale sia sullo strato di ormeggio che, con una forza di trazione, sulle pile di estremità.

I carichi accidentali sono assorbiti, come azione locale, dalla flessione della travata.



Recenti ponti strallati



Ponte Yangpu (1993)
Shangai
L = 602 m (1993)

Recenti ponti strallati



*Ponte strallato di Normandie
sulla Senna
L = 856 m (1995)*

Recenti ponti strallati



Tatara Bridge
mare interno di Seto, Giappone
L = 890 m (1999)

Recenti ponti strallati



Russkij, Vladivostock
L = 1104 m (2012)

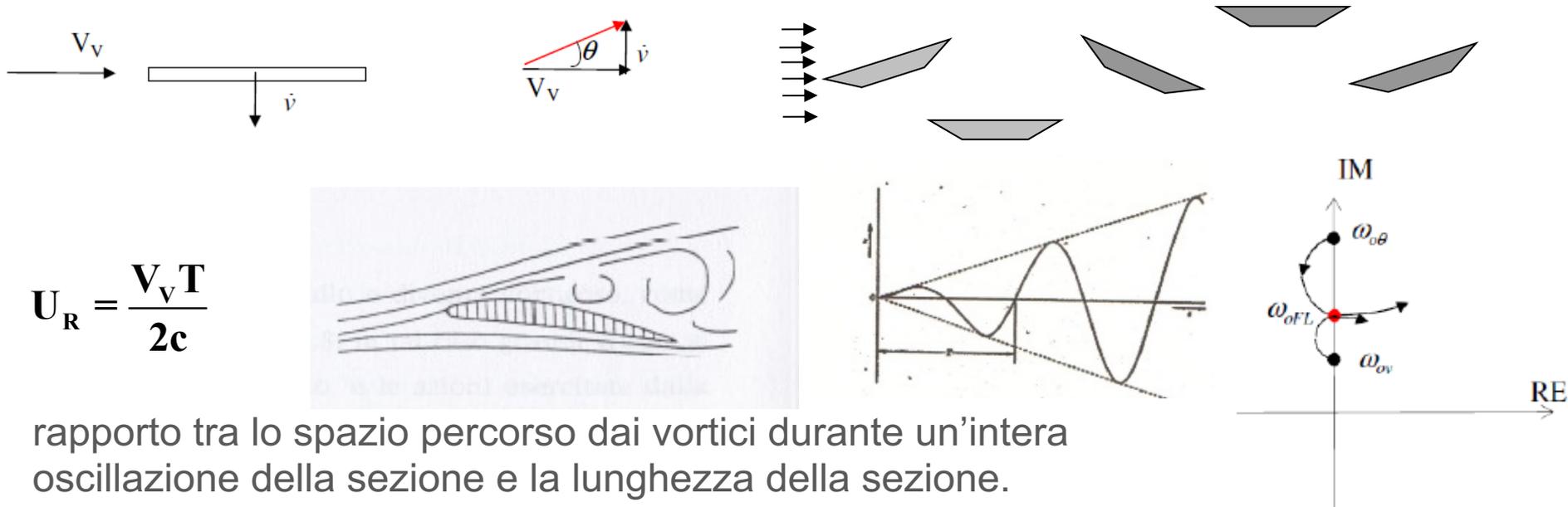
E' il ponte strallato attualmente di massima luce

La ripresa della costruzione dei ponti sospesi

Il crollo del ponte di Tacoma richiese uno studio del tutto nuovo sul comportamento aerodinamico dei ponti di grande luce

Il flutter combinato verticale - torsionale

Il flutter consiste nel verificarsi di una condizione di risonanza tra le forze del vento prodotte contemporaneamente dal vento e dallo stesso movimento della struttura.



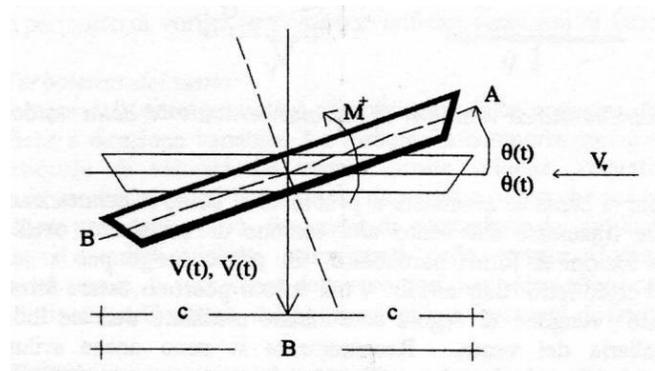
$$U_R = \frac{V_v T}{2c}$$

rapporto tra lo spazio percorso dai vortici durante un'intera oscillazione della sezione e la lunghezza della sezione.

Altri casi di flutter: solo torsionale e solo verticale

Ricerca dei carichi aerodinamici sul ponte sospeso

Scanlan (1971) La caratterizzazione delle azioni aerodinamiche, Funzioni della velocità ridotta UR agenti sulla sezione oscillante



Prove in galleria del vento sulla sezione da ponte per la determinazione dei carichi aerodinamici

$A^*i(UR)$; $H^*i(UR)$ funzioni di rigidezze e di smorzamento aerodinamico

Ricerca della velocità di flutter mediante analisi delle oscillazioni flesso-torsionali del ponte sotto azione del vento. Implementazione numerica delle relative equazioni

Resistenza al flutter del ponte sospeso

Parametro fondamentale per la sicurezza al flutter

$$\Phi = T_{oV} / T_{o\theta}$$

Di regola: Rapporto Φ maggiore di 2.

Primo Ponte di Tacoma: $\Phi = 1,32$

Ponti sospesi: bassa rigidezza torsionale sotto oscillazioni emi-simmetriche.

Aggravamento del problema al crescere della luce per il ridursi di F per il crescere del peso dei cavi rispetto a quello della travata.

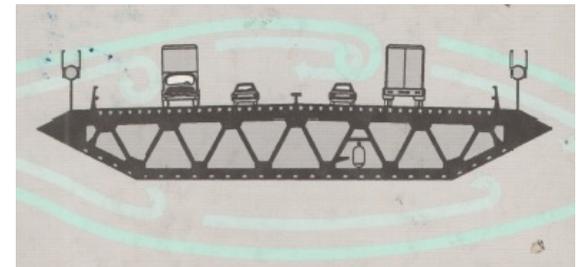
Richiesta di ricerche aerodinamiche accurate in galleria del vento per ottimizzare la geometria della sezione della travata.

Completa revisione e controllo della resistenza al flutter di tutti i ponti già realizzati

Nuovi ponti sospesi e strallati progettati con la teoria tridimensionale di Melan, sotto azione aerodinamica analizzata in galleria del vento implementata in programmi numerici



Great Belt East Bridge (1998)
 $L_c = 1624$ m $B = 27.0$ m; $h_s = 4,4$
Costruzione Italsider



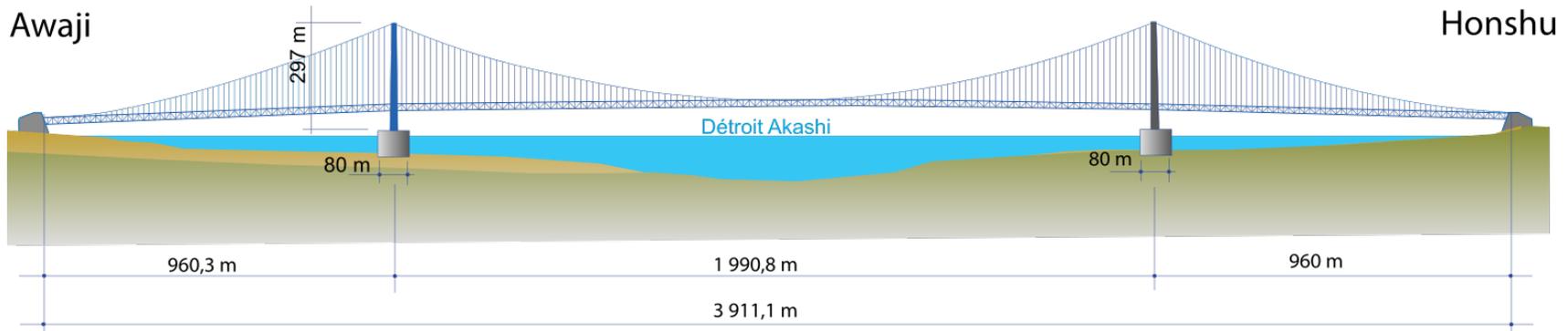
Rapporto $\Phi = 2,78$

$h/L = 1/406$

L'Akashi bridge: il ponte sospeso attualmente di luce massima



L'Akashi bridge: il ponte sospeso attualmente di luce massima



$$h/L = 1/142$$

$$\text{Rapporto } \Phi = 2,34$$

La lunghezza della campata centrale è di 1991 m e quella delle campate laterali è di 960 m.

Sezione della travata: reticolare chiusa. Le fondazioni raggiungono la profondità di oltre 80 m.

Una speciale galleria del vento consentì di studiare il comportamento aeroelastico del ponte su di un modello di sezione in scala 1:1. La costruzione iniziò nel 1988 e terminò nel 1998. Il ponte venne investito nel 1995 da un terremoto di 6.8 gradi della scala Richter senza riportare danni.

Il ponte era stato inizialmente progettato sia per traffico stradale che ferroviario. Venne poi destinato al solo traffico stradale.

Problematiche dei ponti ferroviari di grande luce: richiesta di deformazioni ridotte del ponte sotto azioni statiche ed aerodinamiche



*Ponte 25 Aprile sul Tago, Lisbona
(1966)*

$L_c = 1016 \text{ m}$

3 corsie stradali superiori. e 2 linee ferroviarie inferiori



*Ponte Tsing Ma,
Hong Kong (1997)*

Lc = 1377 m;

L'attuale più lungo ponte sospeso stradale e ferroviario: 6 corsie stradali e 2 ferroviarie all'interno della travata.

Conclusioni per il futuro

#Ricerca, #Confronti, #Prudenza

Bibliografia

- Abdel Ghaffar, A.M. (1980) Free Torsional and Free vertical vibrations of Suspension Bridges, *Journ. Struct. Div. ASCE*, 105, ST4 and 106, ST10
- Bleich, F. (1948), Dynamic Instability of Truss Stiffened suspension bridges under wind action, *Proc. ASCE*, 74, 8.
- Bruno, D., Como, M., Grimaldi, A., Leonardi A. (2001), Deformability and Aerodynamic Stability as Limits in Long Span Bridges, *IABSE Conf. Cable supported Bridges: Challenging Technical Limits*, Seoul.
- Bruno, D., Maceri, F. (1983), Non linear models for cable stayed bridges analysis. First European Simulation Congress ESC83. Aachen, September
- Como, M. (1998), Stabilità Aerodinamica dei Ponti di grande luce, in: *Introduzione all'Ingegneria Strutturale* di E. Giangreco, UTET, Torino
- Como, M., Del Ferraro, S., Grimaldi A. (2005), A parametric Analysis of the flutter Instability for Long Span Suspension Bridges, *Wind & Structures*, 8.1.
- Como, M., Grimaldi, A., Maceri, F. (1985), Statical behaviour of long-span cable stayed bridges, *Int. J. Solids Structures* Vol. 21/8,.
- De Miranda, F. (1980), *I ponti strallati di grande luce*. Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma.

Bibliografia

- De Miranda, F., Grimaldi, A., Maceri, F., Como, M. (1979), M., Basic problems in long-span cable stayed bridges, Dep. Of Structures, Univ. of Calabria, Rept. 25.
- Dell'Amore Fachinetti, S., Vairo, G. (2005), Quasi-secant behaviour of elastic cables for cable-stayed structures, Atti del XXXIV Convegno Nazionale AIAS, 14-17 Settembre, Politecnico di Milano.
- Dischinger, F. (1949) Hangebrücken für schwerste Verkehrslasten. Bauingenieur, 2(3, 4), 65–67, 107–113.
- Ernst, H.J. (1965), Der E-modul von Seilen unter Berücksichtigung des Durchhanges. Der Bauingenieur, 40(2), 52–55.
- Gimsing, N.J. (1997), *Cable supported bridges, Concepts and Design*, “Second Ed. John Wiley Ed.
- Irvine, H.M. (1981). *Cable Structures*. Dover Publications, Inc., New York.
- Irvine, H.M. (1992), *Cable structures*. Dover Publications, New York,
- Karman (von), T. (1963), *Aerodynamics*, Mc. Graw Hill Book Comp., New York, 1963
- Krall G. (1955), Stabilità Aerodinamica del Ponte Sospeso, *Giornale del Genio Civile*
- Melan, J. (1888) *Theorie der eisernen Bogenbrücken und der Hangebrücken, Handbuch der Ingenieurwissenschaften*, Leipzig, 2nd Ed., 1888, 3rd ed. 1906.

Bibliografia

- Moisseif L.S., Lienhard F. (1932) Suspension bridges under the action of lateral forces, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*,
- Rankine, W.,J., M. (1858), *A Manual of Applied Mechanics*, 1^{st.}, Ed.
- Scanlan, R.H. (1974), Airfoil and Bridge Deck Derivatives, *J. Eng. Mech.*, Div.Proc. of the Am. Soc. of Civil Engs.
- Steinman D.B. (1929), *A Practical Treatise on Suspension Bridges*, 2nd Ed. John Wiley, 1929
- Troitsky, M.S. (1977), *Cable stayed bridges*, Crosby Lockwood Staples, London
- Walther, R., Houriet, B., Isler, W., Moia, P., Klein, J.F. (1999), *Cable stayed bridges*. Thomas Telford