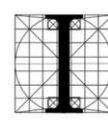




# 10° CONVEGNO NAZIONALE di STORIA DELL'INGEGNERIA 6<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE

Napoli, 13-14 giugno 2024  
Università degli Studi Federico II

Sessione sul progetto del Ponte sullo Stretto



ORDINE DEGLI  
INGEGNERI  
DELLA PROVINCIA  
DI SALERNO



## *Introduzione*

Il programma del 10° Convegno di Storia dell'Ingegneria - VI International Conference on History of Engineering, tenuto a Napoli il 13 e 14 giugno scorsi, ha previsto una sessione dedicata al progetto del ponte sullo Stretto di Messina, un episodio importante della storia dell'ingegneria nel nostro Paese.

Durante la sessione sono state brevemente illustrate le motivazioni di tipo socio-economico a supporto della costruzione del ponte e le tre ipotesi realizzative risalenti al 1986, per poi analizzare alcuni aspetti tecnici di quella scelta.

Qui di seguito sono raccolte le relazioni della sessione, che hanno raccontato una parte della storia, seguite dall'intervento del prof. Mario Como, che ha presentato alcuni "Spunti di riflessione per la discussione".

*Francesca Romana d'Ambrosio*  
Presidente di AISI

PIETRO LUNARDI

*L'evoluzione storica del progetto del Ponte sullo Stretto di Messina,  
dalle idee primordiali al quinquennio decisivo, 2001-2006*

*The historical evolution of the Strait of Messina Bridge project,  
from the primordial ideas to the decisive quinquennium 2001-2006*

*Sommario*

L'articolo vuole presentare l'evoluzione storica del progetto del Ponte sullo stretto di Messina, dalle idee primordiali sino alle azioni di Governo del quinquennio 2001-2006 diventato "decisivo" grazie al concorso di "due eventi straordinari" che hanno dato vita al vero e proprio iter attuativo dell'opera.

*Abstract*

The paper presents the historical evolution of the project of the Strait of Messina Bridge, from the primordial ideas up to the Government actions of the quinquennium 2001-2006 which became "decisive" thanks to the combination of "two extraordinary events" that gave rise to the actual achievement.

*Introduzione*

La storia della continuità territoriale tra Sicilia e Calabria è lunga almeno 2.300 anni. Una storia fatta di sogni, idee, tentativi, studi, dibattiti e progetti di ogni natura.

Per capire e avere un'idea di come questa lunga avventura si è articolata negli anni, è sufficiente richiamare, a grandi linee, le date e i contenuti dei momenti più importanti e significativi nella storia di ieri e di oggi del Ponte sullo Stretto che ora però, ci permettono di parlare di progetto definitivo, di progetto esecutivo e di apertura dei cantieri per la costruzione del collegamento stabile nello Stretto entro il 2024.

Volendo fare una sintesi, possiamo dire che dal 251 a.C. al 1981 ci sono state 150 proposte e dal 1981 al 2001 sono state definite le possibili soluzioni, ma è stata la legislatura dal 2001 al 2006 che ha fatto decollare il Progetto preliminare. Nel 2006, con l'entrata in carica di un Governo contrario alla realizzazione del Ponte, il progetto si ferma e resta fermo fino al 2008, anno in cui un nuovo Governo non solo lo fa ripartire, ma nel 2011 vara il Progetto definitivo. Gli anni a seguire vedono un ostruzionismo dilagante nei confronti dell'opera, ma il tentativo di messa in liquida-

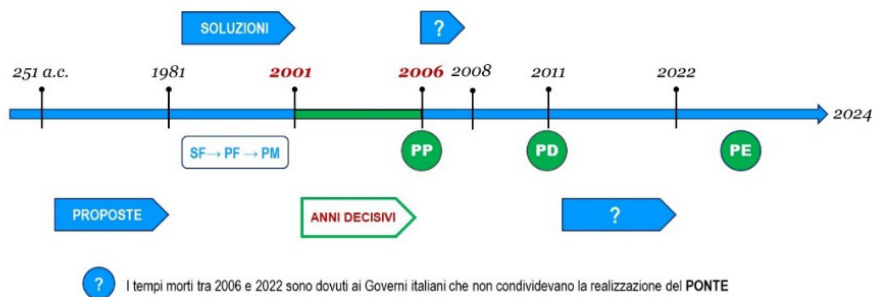


Fig. 1 - I duemilatrecento anni di continuità territoriale tra Calabria e Sicilia. SF: Studio di Fattibilità; PF: Progetto di Fattibilità; PM: Progetto di Massima.

zione della Società Stretto di Messina risulta vano e nel 2022 è possibile la ripresa del progetto. In Figura 1 è riportata la linea del tempo.

È poi indispensabile dettagliare come il quinquennio di Governo 2001-2006 diventi “decisivo” grazie al concorso di “due eventi straordinari” che hanno dato vita al vero e proprio iter realizzativo dell’opera.

### La Storia

Le testimonianze più antiche sullo Stretto di Messina e sui problemi del suo attraversamento sono state tramandate da Strabone e da Plinio il Vecchio, che ci hanno raccontato di Lucio Cecilio Metello che, nel 251 a.C., al ritorno dalla vittoria durante la prima guerra Punica, fece costruire dall’esercito una sorta di ponte galleggiante, costituito da zattere fatte di barche e botti per trasportare il bottino di guerra, 140 elefanti. Carlo Magno nell’800 circa, Ruggero II nel 1130, Ferdinando II di Borbone nel 1840, si posero il problema della continuità territoriale tra Calabria e Sicilia. Nel 1870 l’ing. Carlo Navone propose un progetto di galleria ferroviaria per l’attraversamento dello Stretto, una specie di tubo di acciaio appoggiato sul fondo marino. Tra il 1900 e il 1950, furono fatte diverse proposte, ma ci fu scarso interesse per la continuità territoriale, anche per la mancanza di materiali idonei e tecniche costruttive adeguate.

Altra testimonianza degna di nota riguarda un’incisione francese del 1784 che riproduce il crollo del Faro di Messina, avvenuto in occasione di una drammatica bufera sullo Stretto, in Figura 2. L’incisione conferma, che, fin da allora, lo Stretto veniva rappresentato come un braccio di mare battuto da forti venti e da costanti correnti sottomarine che oggi misurano ancora 5-6 m/s, a fronte di un fondale di 140 m.



Fig. 2 - Crollo del Faro di Messina, incisione francese del 1784.

L'evoluzione storica del progetto del Ponte sullo Stretto di Messina, dalle idee primordiali al quinquennio decisivo, 2001-2006

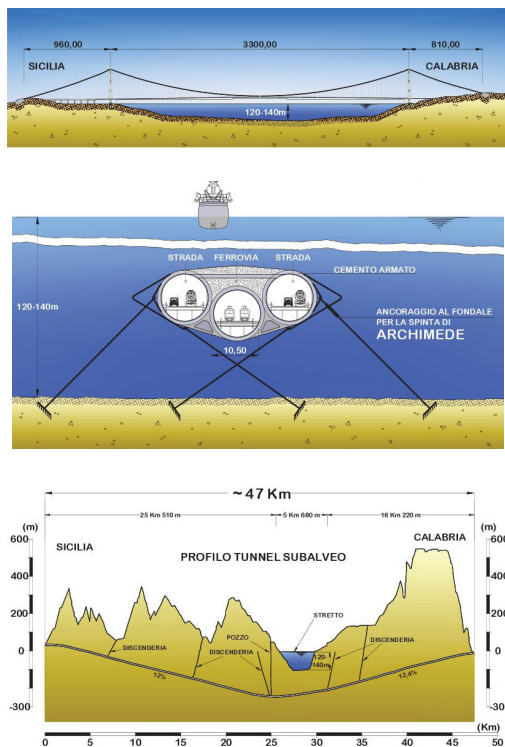


Fig. 3 - Studio di fattibilità: a partire dall'alto, soluzione aerea, soluzione subacquea e soluzione subalvea.

Nel 1981 nasce la Società Stretto di Messina S.p.A. - S.D.M., che sarà la grande protagonista del futuro, come Società Concessionaria di Stato partecipata, ancora oggi, da Anas, Ferrovie, Regione Sicilia e Regione Calabria.

Nel 1986 la Società presenta uno studio di fattibilità con tre soluzioni, riportate in Figura 3:

- 1) soluzione aerea: un ponte sospeso con una sola campata di 3.300 metri;
- 2) soluzione subacquea: un tunnel sommerso, flottante o ponte di Archimede, aganciato al fondo del mare;
- 3) soluzione subalvea: un attraversamento in galleria in subalveo, 47 km per 3.

Nel 1988 la S.D.M. tra le tre soluzioni sceglie quella del ponte a campata unica da 3.300 m, che costituisce la base per lo sviluppo di un primo Progetto di fattibilità, sul quale, nel 1992, S.D.M. produce un Progetto di massima, a cui farà seguito l'approvazione di tutti gli enti preposti.

Nel biennio 2001-2002, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, con il nuovo Governo, acquisisce il Progetto di massima del Ponte a campata unica nel proprio programma per le infrastrutture strategiche del Paese, inserendolo nella Legge Obiettivo, la 443 del 2001.

### Il Progetto preliminare

Nel primo semestre 2003 la S.D.M. perfeziona il Progetto di massima predisponendo un Progetto preliminare, adeguato per essere messo alla base di una gara internazionale.

In Figura 4 è riportata la planimetria generale dello Stretto con la traccia del Ponte e l'indicazione degli accessi stradali e di quelli ferroviari.



Fig. 4 - Progetto preliminare 2003: planimetria generale dello Stretto; in grigio la traccia del Ponte.

Il Progetto Preliminare del 2003 prevede una struttura sospesa a campata unica da 3.300 m, in Figura 5.

Si tratta di un'opera strutturalmente semplice a tre componenti:

- 2 torri, di 400 m di altezza, con le loro fondazioni;
- 4 cavi portanti, di lunghezza pari a 5.400 m, con i propri blocchi di ancoraggio;
- l'impalcato, di larghezza, pari a 62 m, con campata unica di 3.300 m.

Le 2 torri di acciaio in Figura 6, a sostegno dei cavi portanti in Figura 7, poggiano su due plinti in calcestruzzo armato che insistono su fondazioni a pozzo, circolari, di terreno consolidato con trattamenti in *jet-grouting* a 400 atm, cinturate da un anello di terreno consolidato con maglie cellulari sempre di *jet-grouting*. I pozzi hanno una profondità di 60 m e un diametro di 51 m.

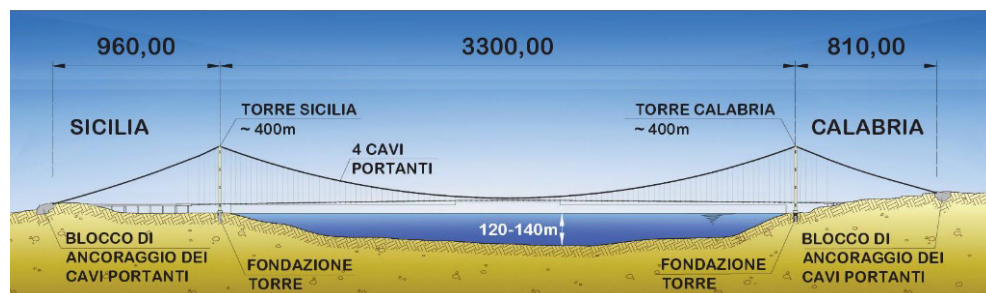


Fig. 5 - Progetto preliminare del 2003: ponte a campata unica.

L'evoluzione storica del progetto del Ponte sullo Stretto di Messina, dalle idee primordiali al quinquennio decisivo, 2001-2006

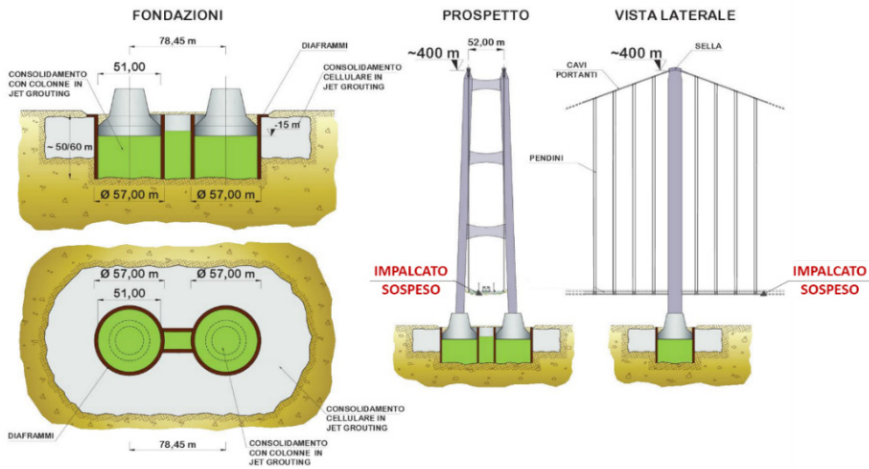


Fig. 6 - Le torri.

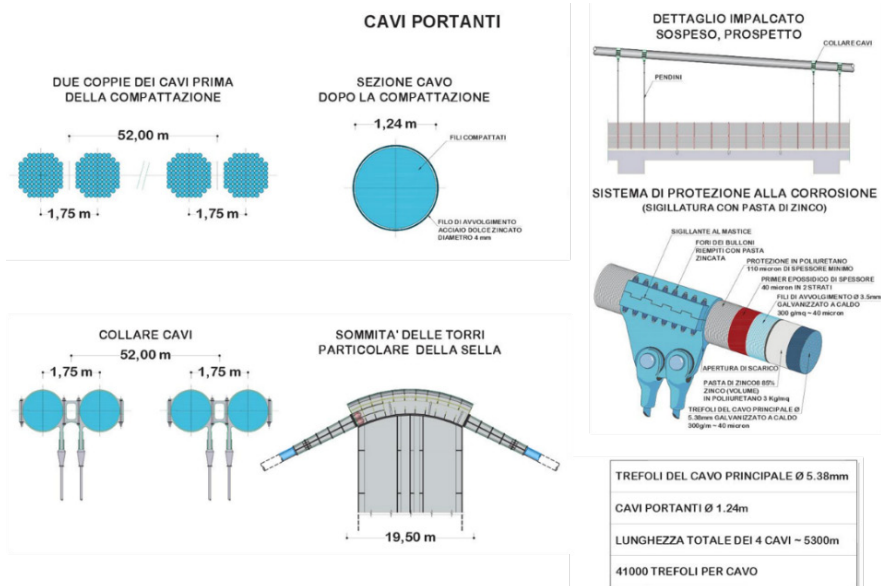


Fig. 7 - I cavi portanti.

Ognuno dei 4 cavi portanti ha un diametro di 1,24 m, contiene 41.000 trefoli da 5,38 mm di diametro ed è lungo 5.300 m. Ciascun cavo è dotato di un sistema di protezione alla corrosione che prevede una sigillatura a base di pasta di zinco, costituita da 4 diversi strati di materiale, nelle Figure 7 e 8.

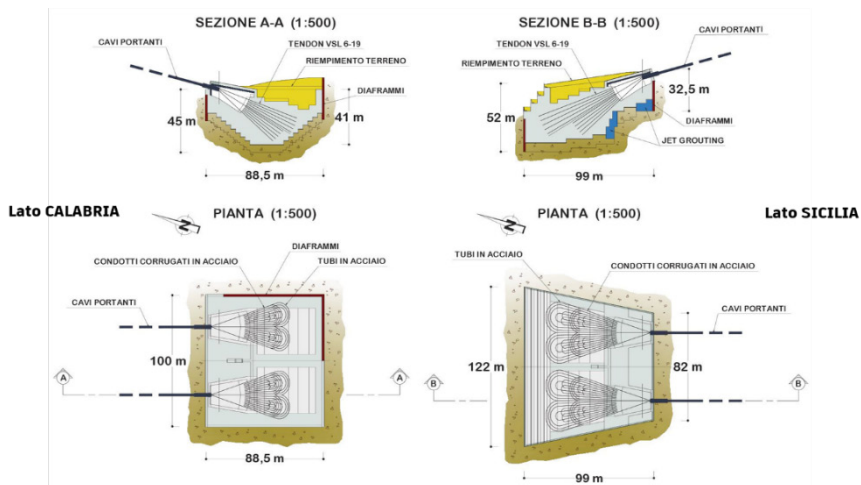


Fig. 8 - I blocchi di ancoraggio dei cavi portanti



Fig. 9 - Il modulo dell'impalcato.

Il modulo dell'impalcato, che ha una larghezza di 62 m, ospita una linea ferroviaria a doppio binario, tre + tre corsie autostradali e due corsie di servizio laterali.

L'impalcato, in Figura 9, sospeso ai quattro cavi portanti, è caratterizzato da una sagoma aerodinamica testata nella galleria del vento al Politecnico di Milano.



### *Gli sviluppi in Europa e la gara internazionale*

Nel primo semestre 2003 la S.D.M. perfeziona il progetto preliminare; nel secondo semestre dello stesso anno, che vede la Presidenza italiana dell'Unione Europea, si discute tra gli altri il tema dei Corridoi stradali e ferroviari e il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - M.I.T. ottiene l'approvazione sia della Commissione sia del Parlamento Europeo per l'inserimento del Ponte sullo Stretto come opera strategica del Corridoio C1 Berlino-Palermo.

Nel 2004 viene bandita la gara internazionale sulla base del Progetto preliminare del 2003, che viene aggiudicata l'anno successivo al Consorzio Eurolink, cui segue la gestione dell'opera da parte di:

- M.I.T.: Concedente;
- S.D.M.: Concessionaria;
- Eurolink: Contraente generale;
- Parson: Project manager consulting.

Il Governo Prodi (XV Legislatura), contrario alla realizzazione del Ponte, nel 2006 sospende il progetto, ma nel 2008 il nuovo Governo (I della XVI Legislatura) riprende il progetto e il Consorzio Eurolink realizza il Progetto definitivo.

Nel 2013 il Governo Monti (II della XVI Legislatura) ferma tutte le attività relative al Ponte e mette in liquidazione la S.D.M. Fortunatamente la liquidazione della Società fino al 2022 non è andata in porto, per cui è stato possibile riattivare la Concessionaria di Stato recuperando sia il Progetto definitivo del 2011, che sarà perfezionato per renderlo esecutivo, sia il Consorzio Eurolink come Contraente generale.

Nel 2023 il Governo Meloni (XIX Legislatura) riattiva la S.D.M. e di conseguenza il Consorzio Eurolink riprende il Progetto definitivo, per poi realizzare il Progetto esecutivo prevedendo per il 2024 l'apertura dei cantieri.

### *2001-2006: il quinquennio decisivo nella Storia del Ponte*

Dopo aver ricordato le date e la cronologia degli eventi più significativi che hanno caratterizzato la storia del collegamento stabile tra Calabria e Sicilia, è opportuno fare una doverosa parentesi per evidenziare come i 5 anni dal 2001 al 2006 siano stati decisivi nella storia del Ponte. Decisivi, perché testimoni di due eventi determinanti che hanno visto il progetto del Ponte per la prima volta fortunato protagonista di un programma Comune di Opere strategiche per l'Italia e per l'Europa, grazie all'azione incisiva del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Il segreto di questa specie di miracolo sono stati due eventi e la loro concomitanza:

- 1) l'emanazione e l'approvazione della Legge Obiettivo nel 2001 e la sua applicazione al caso del Ponte sullo Stretto;
- 2) la gestione accurata da parte del M.I.T. della Presidenza Italiana della Comunità Europea nel secondo semestre del 2003.

I due eventi sopra citati sono stati determinanti e caratterizzati da un unico denominatore comune: la mobilità di persone e di merci garantita per legge, come diritto primario di ogni cittadino, quella mobilità che, dove manca, produce il ristagno dell'economia, la povertà e la corruzione. Due eventi per garantire e riorganizzare la mobilità in Europa e che, di conseguenza, hanno poi permesso di riorganizzarla in Italia e nel bacino del Mediterraneo. Due eventi che hanno indiscutibilmente creato i presupposti per la stesura del Progetto definitivo del 2011 e che permetteranno la redazione del Progetto Esecutivo nel 2023-2024.

### Primo Evento

Nei primi cento giorni della legislatura 2001-2002, venne ideata ed emanata la Legge Obiettivo, caratterizzata da un impianto legislativo che consentisse tempi certi degli adempimenti burocratici e tecnici necessari ad accompagnare concretamente un'opera pubblica, dalla concezione alla cantierizzazione e quindi all'esercizio. In altre parole, come mostrato in Figura 10, fatto 100 il tempo per passare dalla concezione all'esercizio di un'opera pubblica, normalmente in Italia accade che si impiega un tempo che varia dal 60 al 70% per passare dalla concezione alla cantierizzazione e solo il 30-40% per la fase successiva.

Inoltre, solo riducendo i tempi è dimostrato nei fatti che si riesce a disarmare la corruzione e la malavita. Ricordiamo che l'eccessiva burocrazia e l'eccessiva lentezza decisionale, dovuta anche alle decine di adempimenti da soddisfare, sono infatti il miglior carburante per la corruzione.

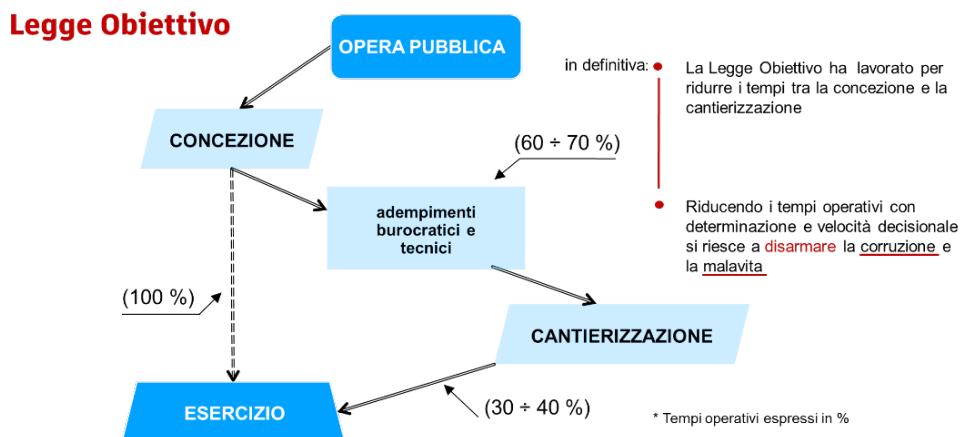


Fig. 10 - La Legge Obiettivo.

In altre parole, grazie alla cultura della mobilità, la Legge Obiettivo permise in soli tre anni, dal 2003 al 2005, di perfezionare il Progetto di massima del Ponte, di predisporre, istruire e finanziare il preliminare, di ottenere l'approvazione della Comunità europea, di metterlo in gara internazionale, di assegnarlo al Consorzio di imprese Eurolink e di avviare la variante ferroviaria di Cannitello, che avrebbe permesso di lasciare lo spazio per i blocchi d'ancoraggio dei cavi portanti dal lato della Calabria.

### *Secondo Evento*

Nel secondo semestre del 2003 infatti, al Governo italiano, con il suo Ministro dei Trasporti, autore di questo contributo, toccò l'importante ma arduo compito di presiedere il Consiglio dei 26 Ministri dei Trasporti Europei, oltre al privilegio di fissare l'argomento da discutere e sviluppare durante il semestre. In tale occasione, proposi la completa revisione della intera rete europea dei corridoi ferroviari e autostradali transeuropei. La proposta fu accettata e, dopo un incessante lavoro all'interno del Consiglio dei 26 Paesi, venne approvata, in sei mesi e all'unanimità, una nuova configurazione della Rete TEN e delle Autostrade del Mare, che premiava l'Italia, con un risultato che può essere definito storico per il nostro Paese.

Per una gestione accurata del semestre italiano, ovviamente, vista l'occasione straordinaria, fu indispensabile porsi dei precisi obiettivi da raggiungere.

Il primo obiettivo, fu quello di agganciare l'Italia del Nord all'Europa, rendendo permeabile al traffico la barriera fisica delle Alpi e legando l'Italia al cuore dell'Europa attraverso i nuovi corridoi transeuropei con i nuovi trafori alpini, in Figura 11.

Il secondo obiettivo fu fornire alla nostra Penisola, con particolare riguardo al Sud, la possibilità di diventare protagonista all'interno della piastra logistica del Mediterraneo, come punta avanzata dell'Europa all'interno dei grandi traffici intercontinentali di uomini e merci, tra Suez e Gibilterra.

Il terzo obiettivo fu restituire all'Italia, con i suoi oltre ottomila chilometri di coste, la sua vocazione originaria di armonizzare, attraverso le autostrade del mare, i traffici di persone e merci, coniugando la funzione dei porti e dei retro-porti, come nodi intermodali, con il sistema arterioso e venoso di autostrade e ferrovie.



Fig. 11 - Opere transfrontaliere strategiche.

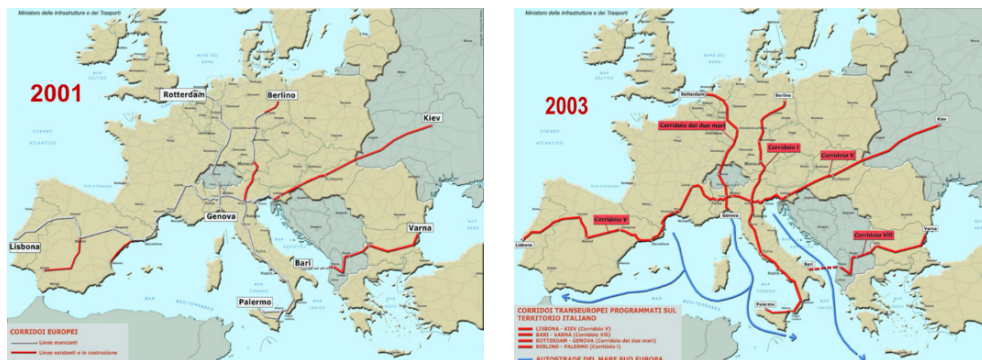


Fig. 12 - Le reti TEN: prima del 2001, a sinistra, e dopo il 2003, a destra.

Il quarto obiettivo fu quello di sbloccare, anche sotto il profilo dei finanziamenti europei, il riconoscimento delle delicate opere transfrontaliere strategiche, che avrebbero goduto dei contributi UE del 20% del loro valore:

- il Traforo ferroviario del Frejus sulla Torino-Lione, chiamato TAV, all'interno del Corridoio 5, Lisbona-Kiev;
- il Traforo ferroviario del Brennero sulla Verona-Monaco, all'interno del Corridoio 1, Berlino-Palermo;
- il Ponte sullo Stretto di Messina, all'interno del Corridoio 1, Berlino-Palermo.

I risultati che riuscimmo a portare a casa dalla Presidenza europea, nel seguito dettagliati, furono straordinari e sicuramente storici. Straordinari per aver dato vita allo scheletro portante del sistema trasportistico europeo, che ancora non esisteva. Storici, per avere regolato in termini definitivi, quindi intoccabili per il futuro, il flusso trasportistico di autostrade e di ferrovie, senza dimenticare il contributo indispensabile delle autostrade del mare, nate in quella occasione con i loro nodi intermodali. Questi risultati sono ben evidenziati nelle Figure 12 e 13. In particolare, la Figura 12 evidenzia il confronto tra la situazione delle Reti TEN Transeuropee prima del 2001, quindi prima della Presidenza Italiana del Consiglio dei Ministri dei trasporti dei 26 Paesi dell'UE, e quella dopo il 2003.

Il primo risultato vede il riconoscimento all'Italia di quattro corridoi transeuropei nell'ambito delle Reti transeuropee dei trasporti-TEN, che legheranno la nostra Penisola al resto dell'Europa: C1 Berlino-Palermo, C5 Lisbona-Kiev, C24 Genova-Rotterdam, C8 Bari-Varna, e le Autostrade del mare, in Figura 13.

Il secondo risultato testimonia come con la Presidenza Italiana della Unione Europea si ottenne lo spostamento del Corridoio 5 Lisbona-Kiev al di sotto delle Alpi, in corrispondenza della tratta Lione-Torino-Pianura Padana-Trieste, contrariamente

L'evoluzione storica del progetto del Ponte sullo Stretto di Messina, dalle idee primordiali al quinquennio decisivo, 2001-2006

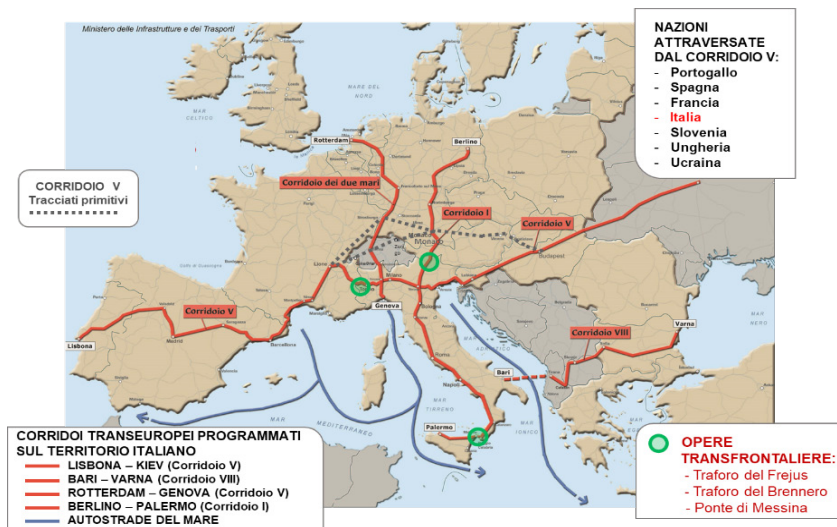


Fig. 13 - Rappresentazione grafica dei risultati raggiunti dalla Presidenza italiana dell'Unione Europea nel secondo semestre del 2003.

a quanto deciso dall'UE prima del 2003, che prevedeva il passaggio dello stesso Corridoio 5 a nord delle Alpi, come mostrato in Figura 13.

Come terzo risultato è stato ottenuto il riconoscimento dei due importanti trafori ferroviari Alpini del Frejus e del Brennero come “opere transfrontaliere”, oggi in fase di avanzata costruzione, circa il 70%, dopo inutili e dannosi ritardi, sempre in Figura 13.

Come quarto risultato è stato ottenuto il riconoscimento di “opera transfrontaliere” anche al Ponte di Messina per dare la continuità indispensabile al Corridoio 1 Berlino-Palermo, ancora in Figura 13.

Il Ponte sullo Stretto, in Figura 14, sarà un'opera unica che, senza profanare il braccio di mare dello Stretto, ne conserverà la bellezza. Il mondo corre e non ci aspetta: esempio evidente è il ponte dei Dardanelli in Turchia, in Figura 14, inaugurato il 18 marzo 2022, che attualmente ha la campata più lunga al mondo, 2.023 m.

### Conclusioni

L'area mediterranea è il vero baricentro dell'Europa, grazie al fatto che circa il 30% del traffico mondiale transita tra il Canale di Suez, recentemente raddoppiato, e lo Stretto di Gibilterra. Il Sud Italia, attivato il potenziamento portuale, trasportistico, stradale e ferroviario, rappresenterà la Porta di ingresso dell'Europa nel Mediterraneo, che avrà come grande calamita il Ponte sullo Stretto.



Fig. 14 - Rendering del Ponte sullo stretto di Messina, a sinistra, e del Ponte dei Dardanelli, in Turchia, a destra.

Oggi il Ponte è indispensabile all'Italia e alla Comunità Europea in quanto:

- la revisione delle Reti TEN-T, lo ha legato al Corridoio 1 Berlino-Palermo, che lega l'Italia all'Europa garantendo la continuità dei trasporti internazionali;
- contribuirà allo sviluppo socio-economico e turistico del Sud Italia diventando un collegamento stabile per 6.000.000 di persone;
- a oggi le Ferrovie hanno pianificato, finanziato e già affidato lavori per l'alta velocità ferroviaria, sia in Calabria sia in Sicilia, per un valore superiore ai 20 miliardi di euro;
- il completamento della rete trasportistica interna di Sicilia e Calabria permetterà il potenziamento strategico del sistema portuale al centro del Mediterraneo;
- a livello planetario, bloccherà la fuga dei trasporti mondiali dalla Rotta Gibilterra-Suez in favore della Rotta Baltica;
- libererà la Sicilia dall'insularità, il cui costo è stato quantificato in 6,5 miliardi di Euro all'anno e con due anni di Ponte in esercizio si potrà finanziare l'intera "Opera di Continuità Territoriale sullo Stretto".

Attualmente nel tempo medio che si impiega per attraversare lo stretto di Messina con qualsiasi mezzo, in autostrada si percorrerebbero almeno circa 290 km.

#### *Bibliografia di riferimento*

Legge 21 dicembre 2001, n. 443. Delega al Governo in materia di infrastrutture ed insediamenti produttivi strategici ed altri interventi per il rilancio delle attività produttive. Gazzetta Ufficiale n. 299 del 27 dicembre 2001, S.O. 279.

Decreto Legislativo 20 agosto 2002, n. 190. Attuazione della legge 21 dicembre 2001, n. 443, per la realizzazione delle infrastrutture e degli insediamenti produttivi strategici e di interesse nazionale. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.199 del 26 agosto 2002, S.O. n. 174.

European Commission, Innovation and Networks Executive Agency. 2000-2006 project list.

*L'area dello Stretto di Messina:  
analisi dei rischi geologici dopo il terremoto 1908*

*The Messina Straits area:  
an overview of geological risks following the 1908 earthquake*

*Sommario*

Lo Stretto di Messina non è un luogo qualunque; basti pensare alla sua collocazione al centro del Mediterraneo. Oggi sappiamo che i fenomeni geodinamici attivi nello Stretto sono coerenti con quanto accade intorno a esso:

- a) la subduzione, il processo attraverso il quale la placca litosferica africana scorre sotto a quella europea;
- b) il vulcanismo attivo dell'arco delle isole Eolie, effetto della subduzione;
- c) il veloce sollevamento a cui è sottoposto tutto l'Arco Calabro;
- d) l'estensione della crosta superiore, resa possibile da grandi faglie come quelle che hanno generato i grandi terremoti del 28 dicembre 1908 e del 5 febbraio 1783.

Oltre all'attività sismica, i fenomeni geodinamici a lenta evoluzione producono importanti effetti geomorfologici, come quelli presenti nell'area vasta dello Stretto; noti come "eventi idrogeologici", sono connessi all'azione della gravità e delle acque correnti superficiali e sono responsabili di movimenti franosi e diffusa erosione. In particolare sono diffuse le "colate rapide di fango" o "di detrito", note anche come *Mud Flows* e *Debris Flows*, le "valanghe di roccia", o *Rock Avalanches*, e le esondazioni di corsi d'acqua, fenomeni spesso innescati dai forti terremoti. Il rischio associato a questi eventi è ancora oggi elevato, a causa della scarsa applicazione dei principi della prevenzione. Viceversa, le continue devastazioni causate dai terremoti, con migliaia di morti ed estese distruzioni, hanno spinto la conoscenza e le normative antisismiche, creando maggiore attenzione sia alle attività di pianificazione che a quelle di edificazione. Allo stato delle conoscenze, l'evento scelto come riferimento per il Progetto Definitivo del Ponte sullo Stretto, approvato nel 2011, è il terremoto del 1908 (Fiammenghi et al., 2009). Per questo evento e per quello del 1783 i numerosi studi effettuati stimano una ricorrenza anche superiore al millennio. Per gli altri eventi, l'analisi del rischio dovrebbe garantire la necessaria sicurezza, attraverso lo strumento della prevenzione. Saranno discussi casi storici reali, ampiamente noti e discussi nella letteratura scientifica.

### *Abstract*

The Straits of Messina are not just any place; just think of its location in the center of the Mediterranean. Today we know that the geodynamic phenomena affecting the Straits are coherent with what happens around it:

- a) subduction, the process through which the African lithospheric plate slides beneath the European plate;
- b) the active volcanism of the Aeolian Islands arc, an effect of the subduction;
- c) the rapid uplift of the entire Calabrian Arc;
- d) the extension of the Calabrian upper crust, accommodated by large faults such as those that generated the 28 December 1908 and 5 February 1783 earthquakes.

In addition to earthquake activity, slowly evolving geodynamic phenomena cause very evident geomorphological effects, such as those seen in the Straits and surrounding areas. They are known as “hydrogeological events”, are largely gravitational, involve the action of surface running waters and are responsible for landslides and widespread erosion. In the Straits area they include mud flows, rapid debris flows, and rock avalanches, often triggered by strong earthquake shaking. The risk associated with these hydrogeological events is still rather high, due to the lack of effective prevention measures. Conversely, the recurrent devastation of buildings and infrastructures caused by earthquakes, along with thousands of casualties, have promoted earthquake studies and anti-seismic regulations, fostering greater attention to both planning and construction activities. Based on the current state of knowledge, the typical recurrence interval of a 1908-type earthquake, assumed as the design earthquake of the Calabria-Sicily stable connection, exceeds a millennium; the same goes for 1783-type earthquakes. For other events, the prevention systems are managed by consolidated knowledge supported by scientific literature. We will discuss some real cases, all well-known and discussed in the scientific literature, which allow us to outline the current level of the associated risk.

### *Introduzione*

A partire dalla fine del 1800, l'accelerazione dello sviluppo delle attività promosse dall'uomo e rese possibili dalla sempre crescente disponibilità di energia ha portato in primo piano il crescente conflitto tra la presenza antropica, con le sue opere e le sue attività economiche, e la naturale dinamica morfo evolutiva del territorio, legata da sempre al “patrimonio genetico” del nostro pianeta. In passato, fatta eccezione per una *élite* di uomini di cultura, quali Eratostene da Cirene, Plinio e Humboldt, il limitato livello delle conoscenze scientifiche cercava di risolvere tale conflitto con una sorta di teoria fatalista, causa di fenomeni scatenati da forze oscure e spesso promosse dalla malvagità degli uomini. Ma solo a partire dagli anni Settanta del secolo scorso i livelli di conoscenza raggiunti hanno consentito all'*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-UNESCO* e, in particolare,



all'*Office of the United Nations Disaster Relief co-Ordinator-UNDRO*, di definire un percorso analitico che, finalmente, entra nel cuore del problema attraverso la netta separazione tra la presenza dell'Uomo, con le sue attività, e gli eventi e i processi naturali, come frane, alluvioni, terremoti, maremoti e attività vulcaniche. L'UNDRO-UNESCO propone un'analisi semplice, ma molto efficace, perché consente di definire e quantificare in via preventiva i danni economici dovuti alle probabili perdite del sistema antropico innescate dagli eventi naturali. Questo nuovo paradigma porta alla consapevolezza che le conseguenze economiche sono da circoscrivere al fattore antropico, rappresentato dall'Uomo, dai suoi beni e dalla vulnerabilità delle sue opere, mentre gli eventi sono da attribuire alla dinamica naturale del pianeta Terra.

In Italia, un paese geologicamente giovane dove accadono frane, alluvioni, terremoti, maremoti ed eruzioni vulcaniche, tutti eventi causati da processi naturali, la riduzione del rischio naturale, così come proposto dall'UNDRO-UNESCO, avviene attraverso attività di prevenzione e rappresenta lo strumento fondamentale per garantire la sicurezza, riducendo i danni e la Perdita di vite umane.

È in questo ambito che si inquadrano i rischi geologici che pesano sull'area dello Stretto di Messina: tutti, direttamente o indirettamente, legati all'evoluzione geologica di quest'area, che rappresenta un punto focale per la geodinamica presente e passata del bacino mediterraneo. È su questa importante porzione di territorio, del resto, che si è concentrata l'attenzione di naturalisti e geologi fin dalla fine dell'800 e, per alcuni aspetti eclatanti, anche da epoche più antiche. In effetti lo Stretto di Messina da sempre evoca scenari leggendari e soprannaturali; dal mito di Ulisse, insidiato da Scilla e Cariddi mentre tenta di attraversare lo Stretto per tornare a Itaca, al cataclisma che, secondo gli antichi, avrebbe trasformato la Sicilia in un'isola staccandola in modo violento dalla penisola: «*Zancle quoque juncta fuisse dicitur Italiae, donec confinia pontus abstulit et media tellurem reppulit unda*», che si traduce «Si dice che anche Zancle [l'odierna Messina] fosse unita all'Italia, fino a quando il mare ruppe i confini e le onde respinsero la terra in mezzo» (Ovidio, *Metamorfosi*, 15). Dopo due millenni di relativa tranquillità, durante i quali lo Stretto è apparso al massimo come un posto molto pericoloso per i naviganti, in epoca moderna la leggenda negativa è stata alimentata dal catastrofico terremoto di Reggio e Messina del 1908, visto da molti come una autentica dannazione biblica piuttosto che come un fenomeno naturale, ancorché raro.

Lo Stretto di Messina è dunque un luogo maledetto, come suggerisce ad esempio la Figura 1?

Proveremo a capirlo con una sintesi dei fenomeni geodinamici in atto nello Stretto, essenzialmente la tettonica attiva e la sismicità: le due cause, dirette o indirette, di tutte le criticità geologiche dello Stretto. Inizieremo dalla tettonica attiva, che a sua volta si declina in lungo due direttrici distinte.



Fig. 1 - Lo Stretto di Messina in una rappresentazione del francese Jean-Pierre Houel, celebre pittore e architetto francese oltre che uno dei più famosi viaggiatori del Grand Tour. Si noti l'enfasi che viene data alle correnti che attraversano lo Stretto, tanto poderose e importanti da essere entrate nel mito.

### *Criticità geologiche dello Stretto di Messina: il sollevamento e le sue conseguenze*

La prima direttrice è il lento sollevamento regionale cui è sottoposto tutto l'Arco Calabro-Peloritano, insieme al settore assiale dell'Appennino verso nord e alla porzione settentrionale della Sicilia verso sud-ovest e ovest; si noti che l'Arco Calabro include anche il settore dei Monti Peloritani, alle spalle dello Stretto. Questo sollevamento è uno degli effetti della subduzione, quel processo che attraverso molti milioni di anni sta portando la litosfera dell'area ionica a scorrere al di sotto di quella tirrenica e che ha come uno dei suoi caratteri ricorrenti la creazione di archi vulcanici insulari, come quello delle Eolie. Il sollevamento è iniziato circa un milione di anni e procede a una velocità dell'ordine di 1÷2 metri per millennio: basta da solo a giustificare la produzione di circa 2.000 m di topografia, che, forse non casualmente, è la massima quota dei rilievi aspromontani.

Il sollevamento ha fatto emergere, e poi portato a quote collinari, rocce e forme tipiche dell'ambiente marino, appoggiate a corona sul nucleo granitico-metamorfico dei rilievi principali; ma il suo effetto principale, soprattutto ai fini della descrizione dei rischi naturali, è la dinamica geomorfologica superficiale. Un sollevamento così veloce, quantomeno alla scala geologica, determina una altrettanto vigorosa risposta morfologica, resa ancora più evidente dal fatto che le rocce marine, di età post creta-

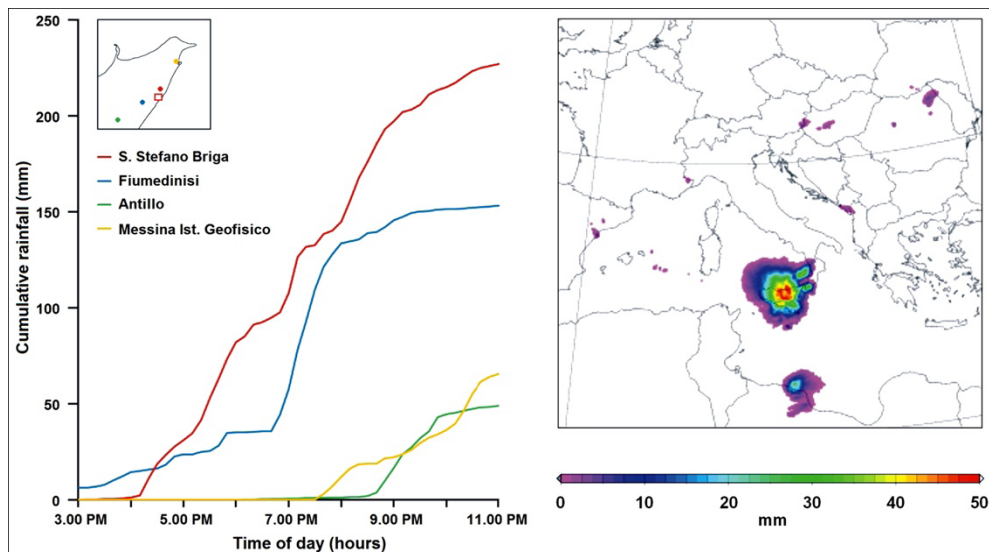


Fig. 2 - Pioggia cumulata tratta da dati radar, satellitari, a sinistra, e immagine radar satellitare registrata in occasione dell'evento dell'1-2 febbraio 2009, a destra: si nota chiaramente la formazione del cumulonembo (Schilirò et al. 2015).

cica, caratterizzate da alternanze di differenti litologie, spinte velocemente verso la superficie e disarticolate assumono, attraverso l'interazione con gli eventi meteorologici, una condizione di "scadente stabilità".

Ed è sempre il veloce sollevamento, sempre se visto alla scala dei fenomeni geologici, insieme alle particolari condizioni meteorologiche mediterranee, a spiegare la creazione di aste fluviali caratteristiche, note con il nome di "fiumare": corsi d'acqua con ampio letto, con scarsa o nulla portata nei periodi estivi, importante spessore dei depositi alluvionali del subalveo, caratterizzati da una grande variazione delle loro portate. Accanto alle fiumare è presente un reticolo idrografico costituito da fossi poco evoluti, a elevata acclività. La presenza di una coltre detritica significativa, gli alti valori di piovosità locale, l'elevata "energia di rilievo", che determina una forte acclività dei versanti, e il disordinato sviluppo urbano, concentrato lungo la stretta fascia costiera, sono tutti elementi che generano livelli elevati di rischio. Se a queste condizioni si aggiunge la presenza di infrastrutture stradali e ferroviarie quali ponti e sottopassi, progettate e realizzate agli inizi del secolo scorso con inadeguate sezioni idrauliche, si intuisce perché eventi piovosi di una certa intensità inneschino spesso fenomeni di flussi detritici e di fango.

Come mostra la Figura 2, tra l'area costiera a sud di Messina e Favazzina (RC), poco a nord dell'estremità settentrionale dello Stretto, si registrano eventi piovosi

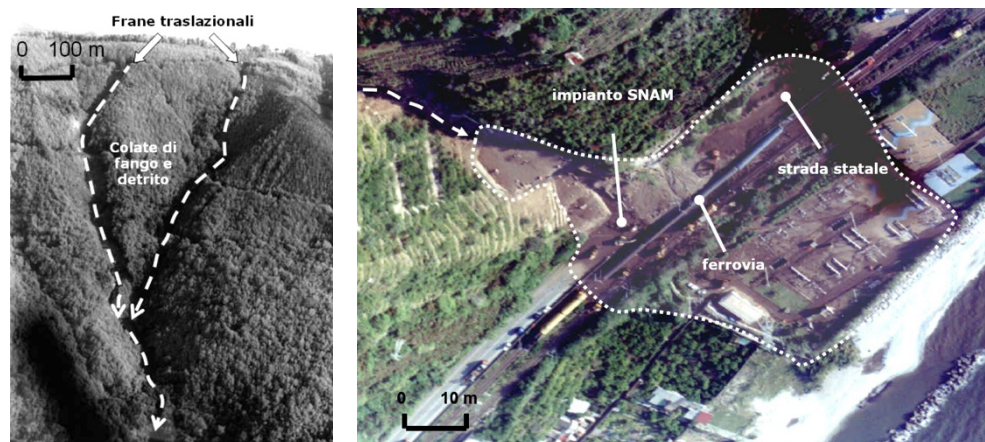


Fig. 3 - Favazzina (RC): colata di fango del 2001 del Vallone Favagrega, ripetuta con identico meccanismo e intensità nel 2005, a sinistra, e il flusso di fango, ostacolato dalle insufficienti sezioni idrauliche della Statale 18 e della linea ferroviaria, che ricopre l'impianto SNAM del gasdotto Mazara del Vallo-Nord Italia, a destra (Bonavina et al. 2005).

che periodicamente innescano flussi di fango e/o detriti molto intensi e dotati di elevata energia cinetica. Eventi di questo tipo, che si ripetono con cadenza decennale e con picchi di piovosità sempre simili a sé stessi, sono correlati alla formazione di un cumulonembo che, seppur circoscritto, può causare nubifragi che a loro volta generano gravi effetti locali, sia nei disordinati centri abitati costieri, sia in corrispondenza di infrastrutture, soprattutto nell'area calabrese, dove la ridotta sezione idraulica dei ponti stradali e ferroviari ostacola il flusso di fango attivato lungo i fossi poco evoluti presenti sui retrostanti versanti. Le Figure 3 e 4 mostrano esempi di letteratura di due eventi che hanno colpito l'area di Favazzina (RC) nel 2001 e 2005, e l'area di Messina-Giampileri nel 2009.

Il livello di rischio associato a questi "eventi idrogeologici" è ancora oggi elevato a causa della scarsa applicazione dei principi della prevenzione. Lo sviluppo della conoscenza, a partire dalla Commissione Interministeriale De Marchi del 1967, che ha stimolato la Legge sulla Difesa del Suolo n. 183/89, nonché l'istituzione delle Autorità di Bacino, aveva creato le condizioni per un drastico abbattimento del rischio idrogeologico attraverso la pianificazione territoriale. Nonostante l'accelerazione creata dall'emanazione del D.L. Sarno n. 180/98, nell'ultimo decennio la virtuosa attività delle Autorità di Distretto è sembrata volgere lo sguardo verso iniziative che allontanano la via della prevenzione.

Un'importante conseguenza dei descritti caratteri geologico-evolutivi dell'area dello Stretto è l'ingente produzione di sedimenti strappati all'Aspromonte, che includono grandi ciottoli di rocce granitiche e metamorfiche, ma anche provenien-



*Fig. 4 - Gravi danni registrati in occasione degli eventi dell'1-2 febbraio 2009 lungo la costa a sud di Messina. In alto, immagine aerea della genesi dei flussi di detrito e fango che non sono stati ostacolati dalla presenza della infrastruttura autostradale, di progettazione moderna e con sezioni idrauliche adeguate; in basso, immagini di edifici interessati dagli eventi (Schilirò et al. 2015).*

ti dalle serie terrigene mioceniche. Questi depositi, noti come “ghiaie di Messina” e “conglomerato di Pezzo, sono diffusamente presenti sia sul lato messinese dello Stretto, sia nell’area di Villa S. Giovanni, dove sono ubicate le fondazioni delle torri e delle zone di ancoraggio dei cavi del Ponte.

#### *Criticità geologiche dello Stretto di Messina: estensione crostale e sismogenesi*

Nella sezione precedente si è parlato di movimenti tettonici lenti ed essenzialmente verticali. Ma tutta la catena appenninica, e lo Stretto con essa come sua estremità peninsulare, è sottoposta anche a una estensione trasversale alla catena stessa, un

processo che viaggia a una velocità variabile tra 1 e 2 metri per millennio. Se il sollevamento può essere distribuito con relativa facilità da una curvatura con raggio più o meno ampio della superficie terrestre, per estendere la porzione di crosta “bisogna romperla”; questo è ciò che avviene in corrispondenza delle faglie, grandi piani di frattura che interessano i primi 10÷20 km della crosta terrestre e che, a seconda dei casi, possono estendersi fino a centinaia di km di lunghezza.

Una faglia soddisfa quindi una richiesta di deformazione di un blocco continentale, ma non lo fa in modo continuo, in virtù dell’attrito che esiste tra le due masse rocciose poste sui due lati della faglia stessa. È solo quando lo sforzo accumulato è estremo che la resistenza allo scorrimento viene superata; si crea una frattura iniziale che via via si propaga per tutta l’estensione della faglia stessa, producendo scuotimento: il terremoto. L’area di faglia messa in movimento è proporzionale alle dimensioni del terremoto: quello che ha colpito Amatrice il 24 agosto 2016, di magnitudo 6.0, è stato causato da una faglia lunga 10÷15 km, mentre il terremoto del 1908, di magnitudo 7.1, è stato generato dal movimento di una faglia lunga circa 40 km, i cui due lembi si sono mossi in modo relativo in media per circa 2 metri: la Faglia dello Stretto di Messina. Si tratta di una faglia orientata circa nord-sud e pendente verso est; si tratta di una importante discontinuità nella struttura crostale dell’Arco Calabro, elemento più meridionale di un sistema di faglie che ha determinato terremoti italiani, grandi e piccoli.

Questa grande faglia estende lo Stretto in senso est-ovest, aumentando progressivamente la distanza netta tra la cresta dei Peloritani e quella dell’Aspromonte e producendo uno sprofondamento nella sua zona assiale. Dal punto di vista degli effetti la faglia produce anche terremoti disastrosi, come quello del 1908, ma, paradossalmente, lo scuotimento sismico produce minori effetti, passando inosservato alla scala del tempo geologico; quello che fa evolvere la geomorfologia, ovvero il paesaggio, è il movimento di estensione lungo la faglia, non lo scuotimento in sé.

Da questo punto di vista, il terremoto del 1908 ebbe alcuni effetti tangibili anche alla scala umana. Un tempestivo rilievo condotto nel 1909 dal glorioso Istituto Geografico Militare mostrò che il terremoto aveva prodotto sprofondamenti, fino a 70 cm tra Messina e Ganzirri, 50 cm a Reggio Lido e 25 cm nella zona di Villa San Giovanni, ma anche che l’entità della dislocazione si riduceva verso nord e verso sud fino ad azzerarsi a Scilla e a Lazzaro. Queste deformazioni erano state *in nuce* durante tutto il periodo di preparazione del terremoto, il quale non è altro che una improvvisa accelerazione della tettonica, che restituisce in un attimo lo sforzo accumulato sulla faglia dal giorno successivo al terremoto precedente. Visto alla scala geologica, quindi, il singolo terremoto scompare, ma resta evidente l’accumulo delle deformazioni prodotte da ogni singolo evento sismico.

Il movimento di una faglia estensionale come quella dello Stretto di Messina induce sprofondamento in superficie lungo una zona allungata nella direzione della faglia stessa, in questo caso lungo l’asse dello Stretto, con una entità massima pari

a circa un terzo dell'estensione tettonica che "carica" la faglia. L'entità dello sprofondamento si riduce allontanandosi perpendicolarmente alla faglia stessa, fino ad azzerarsi a 15-20 km da essa.

Come mostra sinteticamente la Figura 5, nello Stretto si sovrappongono quindi due segnali tettonici confrontabili dal punto di vista della velocità di deformazione, ma di segno opposto e diversissimi per origine: lo sprofondamento indotto dalla Faglia dello Stretto, e il sollevamento a grande scala che opera nella regione. Lo Stretto di Messina è anzi uno dei pochi posti al mondo dove è possibile separare così efficacemente segnali tettonici così diversi. La loro separazione e quantificazione consente anche di proiettare il passato e il presente nel futuro, per anticiparne i tratti essenziali. Trascurando i dettagli, è facile ad esempio prevedere che, se l'attuale andamento degli sforzi tettonici continuerà uguale a se stesso per almeno 200.000 anni, come ci aspettiamo che avvenga, il fondo dello Stretto dovrebbe emergere definitivamente, separando così per sempre lo Ionio dal Tirreno.



*Fig. 5 - Modello evolutivo complessivo dell'area dello Stretto. Al sollevamento complessivo della catena (freccie rosse), con velocità stimate fino a 2,0 mm/anno, si contrappone localmente lo sprofondamento causato dall'attività della Faglia dello Stretto, a destra, e della Faglia della Piana di Gioia Tauro, a sinistra. È mostrata schematicamente anche l'evoluzione del reticolo idrografico, attraverso la progressiva rotazione di tre fiumare che originano in punti vicini tra loro sul fianco NW dell'Aspromonte, ma sfociano in punti molto diversi della costa, rispondendo al richiamo prodotto dal progressivo approfondirsi di due grandi bacini attivi, lo Stretto e la Piana di Gioia Tauro, a loro volta controllati dalle due principali faglie attive della zona (Valensise, 2021).*

*Criticità geologiche dello Stretto di Messina: le faglie attive di superficie*

La presenza di numerose faglie attive sul fondale dello Stretto e sulle sue sponde è uno dei temi più ricorrenti nel dibattito sulla fattibilità del Ponte. In questo dibattito si sono fronteggiate due visioni molto differenti della Geologia, che non è una scienza esatta ma una disciplina che utilizza la Terra come laboratorio, ed è quindi soggetta alla inaccessibilità tipica delle manifestazioni della vita del pianeta e alla variabilità delle loro scale cronologiche. La Geologia, quindi, è disciplina che apparentemente avanza con lentezza, ma in effetti lo fa a grandi balzi, seguendo le grandi acquisizioni scientifiche come quella della Tettonica delle Placche o indagando i grandi fenomeni naturali avversi come le frane e le alluvioni, i terremoti e le eruzioni, man mano che essi accadono.

Il concetto di “faglia” e il meccanismo di generazione dei terremoti sono esattamente due aspetti del pianeta difficili da indagare. Le faglie si osservano comunemente in natura come discontinuità che hanno permesso il moto relativo di due masse rocciose adiacenti. Ma le faglie che vediamo in superficie sono spesso antiche e dunque inattive, ovvero incapaci di generare terremoti, mentre quelle attive si trovano immerse nella crosta terrestre, a una profondità che le rende quasi del tutto inaccessibili direttamente. Se una faglia attiva è rappresentata da un’ampia superficie ci sono buone possibilità che arrivi a interessare anche la superficie terrestre, così da farsi osservare da chi “legge il territorio”, il geologo: al quale però resterà spesso il dubbio di quale sia la geometria profonda di quella faglia e la sua reale dimensione.

Sappiamo che nelle aree vulcaniche esistono faglie molto superficiali, anche a solo un kilometro di profondità, che possono dar luogo a terremoti distruttivi, anche se i loro effetti sono molto localizzati. Ma, come si è già detto, nelle altre aree i forti terremoti sono necessariamente generati da faglie profonde e lunghe da un kilometro ad alcune decine di kilometri. I sistemi di faglia attive sono fortemente gerarchizzati, per cui una grande faglia profonda in grado di generare un terremoto distruttivo è sempre accompagnata da altre faglie minori, in genere più superficiali, generate nel suo stesso sistema di sforzi tettonici, come l’estensione est-ovest che domina nello Stretto. A questo va aggiunto il fenomeno per cui il movimento improvviso di una grande faglia sismogenetica può generare spostamenti relativi delle faglie minori che attraversano il volume di roccia in cui si trova, incluse quelle ormai inattive: un fenomeno da considerare con grande attenzione, per gli effetti che producono, se queste arrivano a interessare la superficie topografica.

La dimensione e la profondità delle grandi faglie sismogenetiche, la loro gerarchizzazione, la possibilità che arrivino a interessare la superficie topografica, la loro capacità di interagire con altre faglie non sismogenetiche e non attive: questi importanti aspetti della sismogenesi sono acquisizioni recenti della ricerca mondiale, e si collocano nell’alveo della sismotettonica, la disciplina che studia i rapporti tra



tettonica e sismicità. In Italia queste acquisizioni sono state favorite dalle indagini sul terremoto dell'Appennino meridionale del 23 novembre 1980 e dagli altri, fortunatamente pochi, forti terremoti che lo hanno seguito: si tratta, quindi, di conoscenze recenti del vasto campo disciplinare della sismologia.

Tornando allo Stretto, la grande faglia che ha generato il terremoto del 1908 è ormai riconosciuta come una faglia "cieca", ovvero una faglia che non arriva a interessare la superficie topografica se non attraverso gli effetti deformativi secondari, che peraltro non furono descritti dai numerosi osservatori dell'evento catastrofico: qualcosa si sarebbe forse potuto rilevare sui fondali dello Stretto, se la tecnologia di allora lo avesse permesso. Non è certamente l'unica faglia attiva della zona, ma è certamente la più grande. Studi di dettaglio delle due sponde dello Stretto e dei suoi fondali mostrano anche che questa faglia è coerente e in grado di giustificare buona parte della geologia recente e della geomorfologia dell'area. In altre parole, lo Stretto di oggi è il risultato del lavoro progressivo e combinato del sollevamento cui tutta la regione è sottoposta, da un lato, e della ripetuta attivazione della faglia che ha generato il terremoto del 1908, dall'altro. Ne consegue che eventuali altre faglie sismogenetiche presenti nello Stretto devono essere di un ordine di grandezza più piccole della faglia principale e quindi capaci solo di terremoti di dimensioni limitate, probabilmente entro un valore di magnitudo massima intorno a 5.5: una conclusione coerente con la storia sismica dell'area, che certamente avrebbe registrato eventuali terremoti più forti almeno durante gli ultimi cinque secoli.

### *Conclusioni*

Lo Stretto di Messina è certamente un luogo unico, sotto il profilo geografico, storico, geologico e geomorfologico. Ma i fenomeni che lo interessano sono sostanzialmente ben compresi e non molto diversi da quelli che si osservano in altre aree attive del Mediterraneo centrale. Va poi rilevato che l'area dello Stretto, come tutta l'Italia, non brilla dal punto di vista della prevenzione degli effetti dei fenomeni naturali avversi. In altre parole, alcuni dei recenti fenomeni estremi, inclusi veri e propri disastri come l'alluvione e la frana di Giampilieri dell'ottobre 2009, sono stati in buona misura causati da una gestione non sempre accorta del territorio, più che dalla severità o imprevedibilità degli eventi stessi.

Per quello che riguarda l'aspetto più temuto, quello della tettonica attiva e della sismicità, si può oggi affermare che il terremoto del 1908 è ormai noto ben al di là di quello che sarebbe immaginabile per un evento di 116 anni fa, sia per quanto riguarda i suoi effetti sul costruito e sull'ambiente, sia con riferimento alle sue cause. In particolare, è ormai acquisito che quel terremoto diede luogo a numerosi fenomeni essenzialmente gravitativi di limitate dimensioni, ma non al temuto fenomeno della "fagliazione superficiale", ovvero alla creazione di una dislocazione della superficie topografica che, a seconda dei casi, può raggiungere e superare anche un metro di

altezza. Difendersi dallo scuotimento è sempre possibile, ma salvaguardare una infrastruttura critica dalla fagliazione superficiale è decisamente più arduo.

Quello che vale per la faglia che ha causato il grande terremoto del 1908 vale ovviamente per tutte le faglie minori che si osservano sulle sponde e sui fondali dello Stretto: anche in caso di ripetizione di quel terremoto, queste faglie potrebbero dar luogo solo a modeste riattivazioni di portata centimetrica, come mostrano i rilievi effettuati con il metodo del radiocarbonio su campioni prelevati attraverso sondaggi a differente profondità sulle due sponde dello stretto.

Quanto alla sismicità nel suo complesso, è ormai acquisito, anche attraverso lo studio dei terrazzi marini, che il terremoto del 1908 è decisamente il *big player* nell'area dello Stretto, ma anche che si tratta di un terremoto che ha ricorrenza millenaria. Nel frattempo nello Stretto possono certamente accadere terremoti abbastanza forti, ma di dimensioni tali da non impensierire particolarmente il costruito residenziale e infrastrutturale; ovviamente a patto che questo sia realizzato in accordo con le norme antisismiche vigenti.

### *Bibliografia*

- Bonavina M., Bozzano F., Martino S., Pellegrino A., *et al.* 2005. Le colate di fango e detrito lungo il versante costiero tra Bagnara Calabria e Scilla (Reggio Calabria): valutazioni di suscettibilità. *Giornale di Geologia Applicata*.
- Bozzano F., Martino S., Montagna A., Prestininzi A. 2012. Back analysis of a rock landslide to infer rheological parameters. *Engineering Geology*, 131-132, 45-56.
- Fiammenghi G., Vullo E., Brancaleoni F., Diana G., *et al.* 2009. *Messina Strait Bridge - The Challenge and the Dream*. Milton Park: Taylor & Francis.
- Schilirò L., De Blasio F.V., Esposito C., Scarascia-Mugnozza G. 2015. Reconstruction of a destructive debris-flow via numerical modeling: the role of valley geometry dynamics. *Earth surface Processes and Landforms*, 40(14), 1847-1861.
- Valensise G. 2021. Navigando tra Geologia, Storia, Sismologia e Archeologia: i terremoti del 1783 e 1908 come chiavi di lettura dell'evoluzione recente dello Stretto di Messina. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 108, 395-410.

GIOVANNI MOLLIKA

*Analisi storica della mancata realizzazione  
del Ponte sullo Stretto*

*Historical analysis of the failure to construction  
of the Messina Strait Bridge*

*Sommario*

Negli ultimi decenni l'Italia ha perso terreno in Europa. A soffrire maggiormente è stato l'estremo Sud e l'emarginazione è stata sicuramente tra le ragioni più importanti di questa crisi, che è non solo economica ma anche sociale e culturale. Prometeia stima in 6,5 miliardi il costo che la sola Sicilia paga ogni anno per la mancanza di collegamenti efficienti con il resto del Paese e con la stessa Europa. In ogni epoca, e ancor più nell'era della globalizzazione che ancora condiziona pesantemente la distribuzione della ricchezza nel mondo, l'assenza di connessioni materiali e immateriali rallenta la crescita e mette in crisi il sistema sociale. Il Ponte sullo Stretto non svolgerà solo una fondamentale funzione di trasporto locale ma sarà anche un investimento sociale che innalzerà il livello di competenze del territorio, rallentando e invertendo un esodo di popolazione cresciuto a dismisura.

*Abstract*

In the last decades, Italy has lost ground in Europe. Mainly has been the extreme South who suffered and the marginalization has certainly been among the most important reason of these crisis, which is not only economic but also social and cultural. Prometeia estimated in 6.5 billion the cost that Sicily alone pays every year due to the lack of efficient connections with the rest of the country and Europe itself. In every era, and more in the age of globalization which still heavily influences the wealth distribution in the world, the absence of material and immaterial connections slows down growth and put the social system in crisis. The Strait Bridge will not only perform a fundamental local transport function but will also be a social investment that will raise up the level of skills in the area, slowing down and reversing an exodus of the population which has grown dramatically.

### *Introduzione*

Un tempo la seta proveniente dal Catai era privilegio di pochissimi ricchi; oggi non c'è famiglia del mondo occidentale che non abbia un cellulare o un televisore a colori fabbricato in Estremo Oriente. È un modo un po' semplicistico ma anche significativo per descrivere una delle conseguenze della globalizzazione.

La data di nascita del termine non è nota, qualcuno sostiene sia nato poco prima della Seconda Guerra Mondiale, altri lo fanno risalire addirittura alla colonizzazione dell'America, ma acquista un significato preciso solo nei primi anni '80, quando la gente scopre che beni prodotti a migliaia di km di distanza sono facilmente disponibili a prezzi molto contenuti.

L'aspetto commerciale è, però, solo il più esteriore di una serie di trasformazioni che hanno inciso profondamente sugli assetti sociali del pianeta e continuano a evolversi in conseguenza di eventi geopolitici che si susseguono quasi senza interruzione. Agli effetti sociali, come l'accelerazione di un'urbanizzazione incontrollabile, centinaia di milioni di cinesi sono emigrati dalle campagne alle città, formando megalopoli pressoché ingestibili, si è aggiunto un radicale rinnovamento del trasporto a medio e lungo raggio, in particolare di quello via mare, dove la rapida diffusione dell'uso del container e il varo di navi sempre più grandi ha ridotto drasticamente i costi di spedizione per unità di prodotto.

### *Gli effetti*

I governi più lungimiranti hanno compreso prima di altri come le nuove dinamiche avrebbero generato ricchezza e occupazione, grazie a una diversa e più raffinata concezione della logistica sulla base di nuovi modelli organizzativi e all'uso delle nuove tecnologie.

La constatazione che oltre il 75% dei trasferimenti di merci avviene via mare, prevalentemente tra l'Estremo Oriente, l'Europa e l'America, ha rivoluzionato la portualità e moltiplicato le attività che si svolgono nei retroporti, le cui dimensioni si sono ampliate a dismisura per gestire volumi sempre maggiori di merci in tempi sempre più ridotti. I binari ferroviari arrivano in banchina, così da consentire a gru sempre più grandi di caricare e scaricare le navi più rapidamente possibile.

Lo stesso accade col gommato mentre la vicinanza a un aeroporto è un fattore di preferenza per l'armatore.

Insieme alle "semplici" e tradizionali funzioni di scarico e scarico – ma movimentare migliaia di container lunghi una dozzina di metri e pesanti fino a 30 t. non è poi così facile – bisogna suddividere le merci, individuare la modalità di trasporto più conveniente e consegnarle al destinatario più rapidamente possibile e senza errori. Parametro fondamentale per giudicare l'efficienza di un sistema portuale è il *Transit time*, cioè il tempo che intercorre dal caricare le merci sul mezzo in partenza – qualunque esso sia – fino alla consegna all'utente finale. Un tempo che si somma a

quello del viaggio compiuto dal luogo di produzione e orienta le scelte degli armatori e degli agenti marittimi, determinando la fortuna di alcuni porti a danno di altri.

Se nel 2010 si calcolava in 10 giorni il tempo necessario per consegnare un carico sbarcato a Genova in una qualsiasi zona industriale del Nord Italia e in 12/13 giorni il *Transit time* verso la Svizzera o verso la Germania, è innegabile che l'efficienza dei porti liguri sia notevolmente migliorata [1] pur se è altrettanto vero che il sistema trasportistico legato agli scali del *Northern range*, l'arco portuale marittimo che parte da Le Havre, alla foce della Senna, e arriva ad Amburgo, alla foce dell'Elba, non ha tardato ad adottare contromisure [2]. Ebbene, lo stesso carico impiega sì 4/5 giorni in più per arrivare a Rotterdam<sup>[1]</sup>, ma il porto olandese recupera ampiamente questo ritardo per portare le merci alla destinazione finale. Il vantaggio geografico derivante dalla relativa vicinanza del porto ligure a Suez si perde a causa della maggiore efficienza di quello sorto sul Rotte.

Il tempo diviene un fattore di costo [3], ne deriva che il trasporto via mare, certamente il più economico, sconta la maggiore lentezza rispetto al treno, al gommato e, ovviamente, al mezzo aereo. A complicare ulteriormente le scelte, interviene sempre più pesantemente la necessità di ridurre l'inquinamento che inverte i criteri di scelta in quanto la modalità più veloce, l'aereo, è anche la più inquinante. Analogamente, il gommato, indispensabile per l'ultimo miglio, produce una quantità maggiore di emissioni nocive rispetto al treno.

Gli scali che sono cresciuti di più e hanno prodotto maggiore ricchezza sono quelli che offrono tutte le modalità di trasporto, consentendo agli operatori del settore una scelta che si traduce in economia di costi, rapidità di consegna e minori prezzi dei beni sul mercato. Così accade che scali, pur strategicamente ben posizionati, non riescono ad attrarre i grandi flussi mercantili in quanto non sono in grado di fornire ciò che è richiesto dalla logistica moderna.

### *La marginalizzazione della Sicilia*

Questa lunga premessa spiega come, in assenza di investimenti infrastrutturali – nei porti, nelle ferrovie, nella logistica – la globalizzazione abbia finito per penalizzare pesantemente il Mezzogiorno d'Italia. Quella che dovrebbe essere una formidabile rendita di posizione si è trasformata – per insipienza o calcolata difesa di interessi diversi – in dolorosa marginalizzazione. La Sicilia ne è un esempio lampante: unica isola al mondo con più di cento mila abitanti e distante dal continente meno di due miglia a non essere collegata stabilmente con la terraferma, movimentata una quantità di merci decisamente ridotta. In pratica solo quella che viene prodotta e consumata sul suo territorio. L'esatto opposto di Olanda e Belgio, come vedremo nel seguito.

Quella della Trinacria è un'anomalia planetaria che, invece di essere rapidamente sanata, è stata prorogata oltre il limite della ragionevolezza, a dispetto delle conseguenze negative causate all'intero Paese.

Una scelta essenzialmente “politica”, consacrata da innumerevoli episodi apparentemente slegati che, lungi dall’essere casuali, hanno dimostrato di essere frutto di una coerente visione mirata alla difesa di interessi economici facilmente individuabili. Non vi sono valide ragioni economiche a sostegno della sospensione dell’iter dei lavori di costruzione del Ponte sullo Stretto, decisa dal governo Prodi nel 2006; né della cancellazione del suo finanziamento (2011) e dell’incredibile e definitiva caducazione dei contratti d’appalto già sottoscritti operata dal governo Monti nel 2012. Con il contorno di elementi meno noti che mostrano, da un lato, l’interesse del mondo nei confronti di un’opera tecnicamente straordinaria e, dall’altro, confermano la volontà di penalizzare la parte più fragile del Paese, a vantaggio di un’altra meglio rappresentata all’interno dei governi.

È stata ignorata dai media la proposta di due colossi cinesi come la *China Investment Corp.* e la *China Communication and Construction Co.* che, immediatamente dopo la definitiva interruzione dei lavori, si dichiararono disponibili a finanziare e realizzare l’opera. Così come è stata considerata ragionevole la proposta fatta dall’allora Premier Paolo Gentiloni e del suo Ministro dei Trasporti Graziano Delrio al Forum di Pechino del 2015 di offrire al Presidente Xi Jinping i porti di Venezia e Trieste quali terminali europei della *Belt and Road Initiative*, la Nuova Via della Seta. In spregio alla geografia, alle condizioni del Sud d’Italia e allo stesso buonsenso. Parafrasando Talleyrand, o Fouché<sup>[2]</sup>, più che un crimine nei confronti del Sud, fu un errore strategico per il futuro del Paese. Gli stessi fallimentari risultati di quell’iniziativa avrebbero dovuto contribuire a un rapido cambio di strategia ma nulla di sostanziale è accaduto fino alla fine del 2021.

### *Le conseguenze per il Paese*

Accantonata, o, meglio, mai presa seriamente in considerazione, l’idea di puntare sui porti più meridionali per captare i grandi flussi mercantili che attraversano il Mediterraneo lungo l’asse Est-Ovest, a un tiro di schioppo dalle coste di una Sicilia priva di scali competitivi e fortemente penalizzata dal *bottleneck* rappresentato dallo Stretto di Messina, la politica dei trasporti italiana proseguì nell’illogico tentativo di destinare gli investimenti in infrastrutture e logistica quasi esclusivamente alle «ascelle» (Spirito, 2022, p.90) tirreniche e adriatiche che hanno il loro punto di forza nei porti liguri e veneto-friulani. Ignorando la concorrenza di scali distanti solo poche decine di miglia come Marsiglia, a ovest, Koper (Capodistria) e Rijeka (Fiume) a est.

Quanto di preciso abbiano inciso queste scelte, autolesionistiche per il Paese, non certo per gli scali privilegiati, nel calo di competitività dell’Italia avvenuto nell’ultimo decennio del secolo scorso e nei primi due del XXI non è dato sapere, ma la perdita di posizioni del Paese è innegabile ed è stata rilevante: è impossibile negare che portualità e la logistica hanno giocato un ruolo determinante in un si-

stema economico mondiale globalizzato nel quale il ruolo della mobilità di merci e persone era decisivo.

È un fatto che il reddito pro capite dell'intero Paese è sceso «al di sotto della media comunitaria - nonostante essa ora comprenda anche i Paesi dell'Est; diventando inferiore a quello di inizio secolo» ed è altrettanto chiaro che buona parte delle sue difficoltà derivano «[...] proprio da una capacità assai modesta di adattamento alle nuove condizioni economiche e tecnologiche del nuovo quadro internazionale [...]» (Viesti, 2021, p. 169).

Non è stato solo un problema del Sud: «Tutte le regioni italiane hanno perso terreno: il reddito pro capite del Piemonte e del Friuli Venezia Giulia era, nel 2000 il 131% della media comunitaria ma è sceso al 103% nel 2018; quello dell'Umbria è passato, nello stesso periodo dal 118% all'84%» (Viesti, 2021, p. 173).

Torna la domanda iniziale: come può crescere un Paese nel quale un terzo dei suoi abitanti non produce e non consuma?

Viene spontaneo chiedersi se queste decisioni siano state prese per incompetenza dei policy maker o siano derivate dai condizionamenti delle *lobby* che controllano la politica economica italiana e la stessa portualità. Fino al 2021, nessuna forza politica ha saputo giustificare questa mancanza di una visione strategica dettata dal buon senso e dalla geografia, ma è storia che, mentre la globalizzazione dispiegava tutta la sua potenza e alcuni Paesi – dentro e fuori l'Ue – si arricchivano grazie alla logistica, i governi italiani hanno ignorato con protervia i benefici ottenibili grazie alla collocazione dell'Italia e del suo Meridione al centro del Mediterraneo e dei grandi flussi mercantili intercontinentali. Significativo il caso dei Paesi Bassi: «Nel 2018, il commercio estero (esportazioni e importazioni di beni e servizi) rappresentava il 161% del PIL nei Paesi Bassi contro il 50% in Germania. Con i porti marittimi di Rotterdam, Amsterdam, Moerdijk, Terneuzen e numerosi aeroporti internazionali, i Paesi Bassi sono particolarmente ben attrezzati e rappresentano una piattaforma logistica indispensabile nel cuore dell'Europa» [4].

#### *L'importanza di una logistica efficiente e al passo coi tempi*

Ma è realmente così importante una rete logistica diffusa uniformemente sul territorio? AV e AC ferroviaria possono essere realmente determinanti per la crescita del Mezzogiorno? In termini di valore aggiunto e di contributo alla ricchezza del Paese, le infrastrutture contano così tanto da risollevare il depresso Pil italiano?

Per rispondere, usiamo il rozzo buon senso degli ingegneri senza perderci nelle raffinate analisi degli economisti: valgono di più centomila cellulari custoditi nei gli immensi stabilimenti di Dongguan o gli stessi centomila distribuiti capillarmente nei negozi di tutto il mondo?

La risposta è scontata e rende bene l'apporto dato da trasporto e distribuzione al Pil di un qualsiasi Paese in epoca di globalizzazione.

A conferma della grande importanza delle connessioni, è arrivato lo studio dell'Università Federico II di Napoli<sup>3)</sup> che ha dimostrato come, nel decennio 2008-2018, le 12 città servite dall'AV ferroviaria hanno visto il Pil pro capite crescere del 10%, a fronte del 3% di quelle a distanza superiore alle due ore da una stazione AV. Non solo: un ulteriore approfondimento ha rivelato come la Tav conta più del reddito dal quale si parte: le prime, pur se situate in regioni "povere", sono cresciute dell'8%, a fronte di un misero 0,4% delle seconde.

Non è stato un fenomeno solo italiano: guardiamo cosa è accaduto negli altri Paesi dell'Ue, beneficiati dal disinteresse dell'Italia a rendere il Mezzogiorno competitivo. È del 3,1% il contributo dato dal Porto di Rotterdam al Pil dei Paesi Bassi. E sono oltre 90 mila i posti di lavoro generati da quel grande scalo. Il Porto di Anversa, a sua volta, partecipa al Pil belga, nettamente inferiore a quello olandese, per il 5% e 21 miliardi di valore aggiunto. In quegli stessi anni, Valencia e Algeciras hanno staccato Genova e Gioia Tauro, mentre il Pireo, in concessione alla Cina, è diventato il primo scalo del Mediterraneo. L'esempio più clamoroso è quello di Duisburg in quanto testimonia le sinergie che la logistica di sistema è in grado di creare tra porto e territorio circostante. Situata alla confluenza dei fiumi Ruhr e Reno, Duisburg era il cuore della grande e fortemente inquinante industria dell'acciaio tedesca; caduta in una profonda crisi una trentina d'anni fa, perse 6 mila ettari di aree industriali e 65 mila posti di lavoro, fino a quando venne scelta dalla Cina come terminale europeo della *Belt and Road Initiative*, la Nuova Via della Seta. Bruxelles non trovò nulla da obiettare e il grande porto fluviale fu rapidamente ammodernato per consentirgli di assolvere alle nuove funzioni.

Uno dopo l'altro, sorsero enormi *European Distribution Center-EDC* e *Distributepark* nei quali trovarono lavoro qualificato e ben remunerato oltre 50 mila persone, per lo più dedicate alla gestione delle merci trasportate dalle stesse grandi navi che, uscite da Suez, erano passate a poche miglia dalla Sicilia. Senza toccarla.

In sintesi, la sola Rotterdam movimentata più container di tutti i porti italiani messi insieme ed è velleitario pensare che qualsiasi scalo italiano, da solo, possano farle concorrenza: troppo abissali sono le differenze orografiche con Genova, dove ogni sforzo volto a migliorare la competitività del porto costa miliardi su miliardi per generare benefici molto ridotti.

L'unica strategia possibile non è quella di trascurare alcuni porti a beneficio di altri o di competere con l'inavvicinabile Rotterdam, bensì di pianificare una portualità diffusa, cioè una rete di scali distribuiti strategicamente lungo i settemila km delle nostre coste e collegati con la rete TEN-T europea.

C'è una certa somiglianza tra portualità e turismo. Negli anni '50-'60 l'Italia era il Paese più visitato al mondo, negli anni seguenti ha perso una posizione dopo l'altra. Ora è al quarto o quinto posto, pur avendo tesori inestimabili distribuiti su tutto il territorio.



Venezia, Roma e Firenze, per nominare le prime tre città d'arte italiane, sono pressoché sature e non riusciranno a crescere in modo rilevante senza penalizzare la qualità dei servizi offerti, con costi notevolissimi. Hanno, invece, grandissimi margini di crescita le decine e decine di gioielli meno noti, sparsi in ogni angolo del Paese. Una situazione analoga a tanti porti italiani, a condizione di attrezzarli e specializzarli opportunamente dal punto di vista logistico e collegarli in rete.

È necessaria una visione politica a medio-lungo termine che non venga radicalmente modificata a ogni cambio di maggioranza. Una strada, un ponte, un porto non sono né di destra né di sinistra ma rappresentano, spesso, la preconditione per una crescita diffusa e sostenibile.

*Il mondo è cambiato e continua a cambiare. Qualcuno l'aveva capito*

A cavallo tra fine Ottocento e primi del Novecento, due grandi meridionalisti come Giustino Fortunato e Francesco De Sanctis predicavano, inascoltati, che non c'è sviluppo senza coesione, non c'è coesione senza mobilità e non c'è mobilità senza infrastrutture<sup>[4]</sup>.

In altre parole, se non si recupera il ritardo infrastrutturale del Meridione, l'Italia intera resterà un Paese di serie B o C perché non potrà mai crescere un Paese nel quale un terzo dei suoi abitanti non produce e non consuma.

Il Mezzogiorno possiede una dotazione di infrastrutture e servizi di trasporto nettamente inferiore alla media italiana<sup>[5]</sup> ed europea<sup>[6]</sup>. Un terzo d'Italia manca dei requisiti indispensabili per crescere, trasformando un vantaggio geografico in una penalizzazione. Ma, contrariamente a quanto molti pensano, non sono le infrastrutture di base a essere carenti, bensì quelle più avanzate. «La sola Sicilia ha una dotazione di strade provinciali e regionali pari a quella dell'intero Nord Ovest» (Viesti, 2021, p. 382), una constatazione che rende ridicola e priva di significato l'obiezione più diffusa negli ultimi tempi: prima del Ponte pensiamo alle opere locali<sup>[7]</sup>.

Una contestazione smentita dalla stessa Ue, che richiede che la Rete centrale, il *Core Network*, formata dai grandi Corridoi sovranazionali, sia completata entro il 2030; mentre per il completamento della prima a livello locale, il *Comprehensive Network*, c'è tempo fino al 2050<sup>[8]</sup>.

Per altro, che siano le grandi arterie a creare ricchezza è ampiamente documentato dalla storia, oltre che dall'Economia dei trasporti. Samarcanda prosperò rapidamente quando, nel XIV secolo, divenne il crocevia delle carovaniere provenienti da Est e dirette all'Ovest, cariche di sete e spezie. Ma la sua ricchezza si squagliò come neve al sole solo pochi secoli dopo, allorché furono trovati itinerari più convenienti. Il declino di Samarcanda iniziò proprio perché fu resa marginale nei grandi flussi commerciali del tempo.

Al contrario, intere regioni sono diventate ricche quando, da lontane e difficilmente raggiungibili qual erano, entrarono a far parte di grandi "armature trasportisti-

che”. Illuminanti, in tal senso, le parole con le quali il Presidente delle Ferrovie russe, Vladimir Yakunin, propagandò il progetto *Razvitie*, Sviluppo. Un modo simile a quello utilizzato da Xi Jinping per promuovere la *Belt and Road*, basato sul concetto secondo il quale «un grande asse infrastrutturale irradia sviluppo nei territori attraversati». Un principio che Yakunin vuole applicare alle immense distese della Siberia e Xi alla Cina sud occidentale. Entrambi con un occhio rivolto alla Mongolia, ma che è valido, su scala ovviamente molto minore, anche per il nostro Mezzogiorno.

Illuminante il caso dell'imponente crescita dell'Ovest americano nella seconda metà del XIX secolo. In un secolo e mezzo, il Pil dello Stato della California è arrivato a superare del 30% quello dell'intera Italia, pur con 20 milioni in meno di abitanti, e l'impulso iniziale non fu dato dai *Conestoga*, i carri coperti protagonisti di tanti western, o dalle Colt di John Wayne, bensì dal *Pacific Railroad Act* del 1862, col quale Abraham Lincoln prolungò la ferrovia fino alle rive del Pacifico. Era chiaro per tutti che l'America, per crescere rapidamente e in modo uniforme – allora la parola “sostenibile” non era ancora diffusa – doveva connettersi ai territori periferici e ridurre i tempi e i costi di trasferimento delle persone e delle merci da un lato all'altro del Paese. Nessuno ebbe il coraggio di sostenere che, prima della Omaha-Sacramento, il primo itinerario approvato dal Congresso nel 1862, andavano realizzate la Los Angeles–San Diego e la San Francisco-Seattle.

L'Italia ha pagato duramente errori strategici che hanno avuto e continuano ad avere conseguenze tragiche sulla qualità della vita e sullo spopolamento di una parte rilevante del Paese. Tra tutti i capoluoghi dell'Ue, Messina registra il calo maggiore del numero di abitanti. Reggio Calabria segue a ruota, come anche le altre città siciliane e calabresi. Brusca smentita della profezia secondo la quale la logistica sarebbe stata per l'Italia quello che era il petrolio per i Paesi arabi.

### *Il Ponte sullo Stretto come segnale di una nuova strategia*

Tornando al Ponte, c'è chi chiede, provocatoriamente, se basterebbe a risolvere tutti i problemi del Paese. Ovviamente no, ma mostrerebbe l'attenzione dell'Italia e dell'Europa verso la sponda sud del Mediterraneo, assegnando alla prima un ruolo, un prestigio e un'autorevolezza che il Nord Europa non le ha mai riconosciuto.

C'è però un'altra funzione del Ponte che teniamo particolarmente a sottolineare: quella di Opera territoriale. Un modello di «[...] approccio decentrato ed integrato alle politiche economiche, occupazionali e sociali. Decentrato perché il livello che rileva è quello sub-nazionale e, nella maggior parte dei casi, sub regionale» nel quale «[...] le azioni di sviluppo locale implicano un'attivazione più o meno accentuata degli attori locali pubblici e privati [...] e tendono a essere valutate positivamente proprio perché insegnano agli attori locali, nei casi in cui essi non siano già capaci di farlo, a porsi obiettivi comuni e a cooperare per raggiungerli. [...] spingendo gli attori a creare dei veri e propri *policy networks*, che si caratterizzano per le relazioni

di fiducia e cooperazione tra attori provenienti da ambiti diversi, ma impegnati a perseguire gli stessi obiettivi di sviluppo della realtà territoriale in cui operano»<sup>[9]</sup>. Una visione straordinariamente interessante e adeguata alla dimensione epocale dell'opera in quanto spazia tra aspetti locali e continentali senza soluzione di continuità. Una visione che va valutata e tradotta in azioni concrete per non incorrere in abbagli o trascurare nessuna delle innumerevoli potenzialità.

Negli ultimi decenni, la principale iniziativa dell'Ue è stata la Politica di Coesione, che ha come obiettivi la crescita economica equilibrata, la creazione di posti di lavoro, la competitività delle imprese, lo sviluppo sostenibile e la protezione dell'ambiente. Con particolare riguardo ad aree arretrate. È paradossale che, almeno fino al 2021, siano stati proprio i governi italiani a disattendere queste indicazioni. Un rapporto<sup>[10]</sup> di Prometeia<sup>[11]</sup> indica in oltre 6 miliardi il danno causato alla sola Sicilia dalla mancanza di un collegamento stabile ed efficiente. Una somma enorme che ha inciso e continua a incidere sul bilancio di un Paese che non può permettersi questi errori.

Un Paese povero di materie prime; afflitto da un enorme debito pubblico; con un'agroalimentare mortificato dalle regole comunitarie; una Ricerca e Sviluppo che non decolla per mancanza di risorse adeguate e una grande industria trasferita dove il Fisco è più favorevole non ha altra strada che utilizzare i doni che Geografia e Storia gli hanno concesso.

### *Uno sguardo al domani*

La globalizzazione, pur con i suoi inconvenienti, rappresenta un'opportunità e il Ponte è lo straordinario strumento che consente di coglierne gli aspetti più favorevoli: «[...] mentre il capitalismo è diventato completamente mobile – grazie alla estrema facilità di trasferimento del denaro da una parte all'altra del mondo in frazioni di secondo -, la mobilità è diventata compiutamente capitalistica» (Spirito, 2022, p. 11). Il Ponte sullo Stretto, come un'Expo della durata di alcune decine d'anni, può dare origine a un fenomeno *win-win*, determinato anche dalla complementarità tra logistica meridionale e manifattura settentrionale, secondo il principio per il quale la realizzazione di una nuova connessione dischiude nuove opportunità e rappresenta l'elemento fondamentale per la creazione di ricchezza.

«Aprire nuove vie di comunicazione è tornato a essere non solo una priorità economica ma anche un assetto strategico – pensiamo a un Piano Mattei esteso alle infrastrutture – per il posizionamento degli Stati nello scenario della nuova politica internazionale» (Spirito, 2022, p. 14). La Blu Banana<sup>[12]</sup> ha colpevolmente ignorato le aree che si stanno rivelando decisive per determinare i nuovi equilibri nel Mediterraneo centrale. «L'intera portualità meridionale europea è rimasta un fronte scoperto, mentre la globalizzazione ha costruito una centralità marittima che è tale non solo per la costruzione delle catene del valore industriale, ma anche per la definizione delle sfere di influenza» (Spirito, 2022, p. 15) geopolitiche.

Appare paradossale che il ritardo nell'interpretare i cambiamenti avvenuti nel panorama euromediterraneo abbia finito per marginalizzare l'intera Europa ed esaltare la funzione del Ponte e del luogo ove deve sorgere, nonché di chi si accinge a costruirlo. Per altro, l'alternativa non può essere continuare a proteggere le lobby che ostacolano lo sviluppo degli scali e delle infrastrutture ferroviarie meridionali. «Dagli anni Settanta si assiste a una caduta tendenziale del saggio di crescita medio annuo del prodotto effettivo e del prodotto potenziale della nostra economia. Negli anni Settanta il saggio di crescita effettivo è stato del 3,6%; negli anni Ottanta il saggio di crescita effettivo è stato del 2,4% e quello potenziale del 3%; negli anni Novanta: effettivo 1,5%; potenziale 2%; nel 2001-2003: effettivo tra 0 e 1%, potenziale tra 1 e 2%» [5]. Lo stesso accorciamento delle catene di approvvigionamento, preconizzato da più parti, rafforza ulteriormente tale visione: solo 140 km dividono Capo Bon da Mazara del Vallo, dove interi quartieri vedono convivere serenamente siciliani e arabi, secondo l'antica tradizione di tolleranza e di ospitalità siciliana.

In definitiva, a nostro parere, la realizzazione immediata del Ponte sullo Stretto rappresenta l'unica vera speranza di rilancio di un Sud e di un'Italia anagraficamente sempre più anziani e sfiduciati dalla mancanza di prospettive per i loro giovani. Non c'è altra scelta.

### *Bibliografia*

- Corrado G. 2021. *Giustino Fortunato e le due Italie*. Calvello: Villani Editore.  
Fortunato G. 1927. *Le strade ferrate dell'Ofanto: 1880-1897*. Firenze: Vallecchi.  
Spirito P. 2022. *Il nuovo capitalismo della mobilità*. Napoli: Guida Editori.  
Viesti G. 2021. *Centri e periferie*. Bari: Editori Laterza.

### *Sitografia*

- [1] <https://www.shippingitaly.it/2022/10/27/sfatato-da-pitto-fedespedi-il-mito-dei-5-giorni-di-navigazione-a-vantaggio-dei-porti-italiani/>  
[2] <https://www.lastampa.it/cronaca/2017/01/02/news/span-id-ul1005470353784ef-i-600-mila-container-span-perduti-di-genova-1.34662296/>  
[3] <https://it.readkong.com/page/time-is-money-una-valutazione-alternativa-dei-divari-8033029>  
[4] <https://www.asefibrokers.com/notizie/i-segreti-del-commercio-olandese-secondo-coface>  
[5] <https://www.italianieuropei.it/it/la-rivista/archivio-della-rivista/item/610-le-cause-del-declino-italiano.html>  
[6] <https://www.shippingitaly.it/2022/10/27/sfatato-da-pitto-fedespedi-il-mito-dei-5-giorni-di-navigazione-a-vantaggio-dei-porti-italiani/>  
[7] <https://www.shippingitaly.it/2022/10/30/cozzani-psa-la-media-dei-transit-time-conferma-i-5-giorni-di-vantaggio-per-litalia/>  
[8] [https://www.ilsole24ore.com/art/italia-divisa-due-tav-pil-7percento-citta-collegate-ACCZKIFB?refresh\\_ce&nof](https://www.ilsole24ore.com/art/italia-divisa-due-tav-pil-7percento-citta-collegate-ACCZKIFB?refresh_ce&nof)  
[9] <https://www.italianisti.it/pubblicazioni/atti-di-congresso/letteratura-e-scienze/TAVELLA.pdf>

- [10] [https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/collana-seminari-convegni/2022-0025/n-25\\_mezzogiorno.pdf](https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/collana-seminari-convegni/2022-0025/n-25_mezzogiorno.pdf)
- [11] <https://www.astrid-online.it/static/upload/ance/ance6.pdf>
- [12] <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/la-rete-anas>
- [13] <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/135/reti-transeuropee-orientamenti>
- [14] <https://pti.regione.sicilia.it/portal/pls/portal/docs/152367673.PDF>

### *Note*

- [1] Non tutti sono d'accordo con questa tesi. C'è chi la nega [6] e chi la conferma [7].
- [2] L'origine della frase è controversa: c'è chi l'attribuisce al primo, chi al secondo. Indubbiamente, però, entrambi erano sufficientemente cinici per pronunciarla.
- [3] Il prof. Ennio Cascetta, professore ordinario di Pianificazione dei Trasporti ed ex capo della Struttura Tecnica di Missione del Ministero delle Infrastrutture, ha diffuso questi dati sul Sole 24ore del 30 Gennaio 2020 sotto il significativo titolo: Italia divisa in due dalla Tav: Pil a +7% nelle città collegate [8].
- [4] Concetto facilmente deducibile dalla lettura delle opere dei due grandi meridionalisti. Del primo citiamo (FORTUNATO, 1927, p.331) e l'approfondimento (CORRADO, 2021, p. 214); mentre del grande storico irpino basta citare la frase: «Venga la ferrovia e in picciol numero di anni si farà il lavoro di secoli», acutamente evidenziata da Chiara Tavella nella presentazione del suo lavoro su De Sanctis [9].
- [5] «Nel caso delle reti di trasporto stradali e ferroviarie le difficoltà di accesso più rilevanti riguardano le isole, la Calabria e le aree appenniniche interne in ragione della loro maggiore distanza dalle direttrici autostradali e dagli snodi delle linee ferroviarie ad alta 56 velocità, in Figura 5.1; un maggiore ritardo delle regioni meridionali si riscontra anche per i collegamenti aerei e quelli marittimi, in particolare in relazione al traffico merci».
- [6] «[...] le infrastrutture per la competitività diventano un fattore di crescita non soltanto in virtù di un necessario e non rinviabile recupero del gap che divide sempre più il Sud dal resto del Paese e dell'Europa, ma, soprattutto, in un'ottica di integrazione e di sviluppo delle attività economiche. Solo così si comprende come il ritardo nella dotazione infrastrutturale diviene, sempre più, un freno alla crescita del Paese, in generale, e del Mezzogiorno, in particolare» [11, p. 5].
- [7] La rete stradale della Sicilia ha uno sviluppo complessivo di 3.915,318 km; quella del Piemonte di 1.607,739 km; quella del Lazio di 1.255,749 km; quella della Campania di 1.465,454 km; quella della Lombardia di 1.923,578 km; quella del Veneto di 729,383 km; quella della Calabria di 1.975,482 km.
- [8] Sono decine i documenti della Commissione europea dei Trasporti che inducono gli stati membri a completare le due Reti entro i tempi assegnati. Per brevità segnaliamo le Note tematiche del Parlamento europeo che, relativamente alla Revisione della RETE-T del 2021, così recita: «In particolare, la rete di alta qualità deve essere gradualmente completata in tre fasi: 2030 per la rete centrale, 2040 per la rete centrale estesa, introdotta di recente, e 2050 per la rete globale. Gli assi più importanti della rete centrale e della rete centrale estesa che rappresentano il più elevato valore aggiunto dell'UE sono raggruppati in nove corridoi di trasporto europei» [13].
- [9] Fondazione Marco Biagi, Scheda che fornisce un quadro comparato delle politiche di sviluppo locale nei 25 Stati membri dell'Unione europea.

- [10] «A causa della condizione di insularità, negli ultimi vent'anni, ogni singolo residente in Sicilia (neonati compresi) avrebbe pagato una sorta di tassa occulta quantificabile, annualmente, in 1.308 euro. Un costo che si traduce in circa sei miliardi e 540 milioni di euro (pari al 7,4 per cento del Prodotto interno lordo regionale) ogni dodici mesi. Tenendo, invece, in considerazione i costi dei trasporti e le conseguenze sugli operatori economici e i vari settori di attività, la stima dell'impatto della riduzione dei prezzi sul Pil risulterebbe pari al 6,8 per cento: il risultato è che l'Isola è gravata di una penalità quantificabile in sei miliardi di euro all'anno» [14]. Con queste parole il Vicepresidente della Regione siciliana e assessore all'economia, prof. Gaetano Armao ha presentato lo studio Stima dei costi dell'insularità siciliana del 2020, aggiungendo: «Gli effetti dell'insularità sulla Sicilia sono stati stimati attraverso due differenti approcci metodologici: il modello econometrico definito dall'Istituto Bruno Leoni e il modello multisettoriale della Regione. Si è tenuto conto di svariati fattori che spaziano dalla dotazione infrastrutturale ai costi di trasporto».
- [11] Associazione per le previsioni econometriche con sede a Bologna, fondata da P. Onofri, R. Prodi e A. Tantazzi nel 1974, specializzata nei servizi di *risk management*, *wealth management*, *asset management* e consulenza finanziaria
- [12] Così sono state chiamate le aree con le maggiori probabilità di sviluppo economico e demografico dell'Europa occidentale.

FENGYING WU, LIN ZHAO, YAOJUN GE, CLAUDIO BORRI

*Most recent developments in large bridge aerodynamics  
(2013-2024)*

*Alcuni recenti sviluppi in aerodinamica dei ponti di grande luce  
(2013-2024)*

*Abstract*

As follow-up to the historical perspective given at 6<sup>th</sup> EACWE in Cambridge [1], a review of bridge aerodynamics advancements within the latest decade is introduced. Within the perspective of evolution of long-span bridges, the paper shows how the cross-section developed (from the streamlined box girder or the truss girder to the slotted-box girders, owing to the demand of the larger spans and avoiding turbulence-induced phenomena), but it also presents the enormous challenge these long/super-long span bridges are facing by wind excitations, such as flutter, buffeting, VIVs, and golloping, etc. The phenomena of interest in bridge aerodynamics are discussed through the historical milestone papers published and/or presented on the various journals or at major conferences. A few examples of large-amplitude vibrations observed in real structures are also recalled, such as very recently observed VIVs of Humen Bridge in China. Moreover, the most recent development of AI tools was a totally emerging method for reproducing and forecasting wind effects and also for bridge engineering in this new decade.

*Sommario*

Quale sviluppo conseguente alla prospettiva storica presentata al 6<sup>th</sup> EACWE a Cambridge (Borri *et al.*, 1993) [1] vengono qui illustrati i maggiori e più recenti sviluppi in aerodinamica dei ponti di grande luce dell'ultimo decennio. Nella prospettiva dell'evoluzione dei grandi ponti, l'articolo mostra non solo come la sezione trasversale di impalcato si sia evoluta dalla tipologia aerodinamicamente profilata del cassone singolo, o dell'impalcato reticolare, verso impalcati multi-cassone forati, o *bi/three-slotted*, a causa della larghezza sempre maggiore della sezione richiesta, e per evitare fenomeni indotti dalla turbolenza, ma esso mostra anche l'enorme sfida dei ponti di grandissima luce derivante dal dominare gli effetti del vento su dimensioni così importante. Fenomeni quali il flutter, il *buffeting*, le vibrazioni da distacco dei vortici o *VIV-Vortex-Induced-Vibrations* e il galoppo, che sono di interesse per l'a-

erodinamica dei ponti, vengono discussi attraverso una prospettiva storica dei principali lavori, considerabili come pietre miliari, presentati alle maggiori conferenze e pubblicati sulle principali riviste. Vengono ricordati alcuni esempi di grandi vibrazioni osservate in strutture reali, come quelle da distacco dei vortici dell'Humen Bridge in Cina. Inoltre, il recentissimo sviluppo degli strumenti di AI ha rappresentato un metodo totalmente nuovo per riprodurre e prevedere gli effetti del vento, anche nel caso dell'ingegneria dei ponti, nell'ultimo decennio.

### *Introduction*

From the rapid development of the bridge aerodynamics within the last century, which was a very flourishing branch of wind engineering, depended the tremendous contributions from the pioneers in this research field. With the revolution of science and technology, as well as material, a remarkable evolution has been achieved within this decade. This paper focuses on the advancements in this exciting sector in the latest ten years, after retrospect a large amount of literature, authors track developments in the various aspects of wind-induced vibrations, some outstanding achievements in bridge aerodynamic are highlighted after revisiting some milestones in bridge engineering projects, as well as papers and report on the various conferences. Moreover, the traditional research topic is still the opening subject to looking forward to receive more research findings, such as the wind-induced vibrations and non-synoptic wind environment; and the outstanding contributions are recalled and summarized as following parts. Notably, a very emerging method/tool applied in the wind engineering, especially progresses in the bridge aerodynamic are updated in the final part.

### *Evolution of long-span bridge structures*

In recent decades, the development of both science, technology, and also material proceeded hand in hand with the need of creating structures of increasing size, an increasing number of long-span bridges have been built worldwide in many coastal areas to cross straits or seas, or built in mountain valley areas to cross canyons. Some of representative long-span bridges were built within last decade or under the construction stage were given in Table 1. From the analysis of the evolution of the major achievements of recent years, the cross sections used for the execution of bridge decks of large and very large spans can be subdivided into: 1) truss-girder sections, with high stiffness and poor aerodynamic performances; 2) box-girder sections with high aerodynamic efficiency; and 3) multi-cellular sections with very high aerodynamic performances. The truss-girder and the single box girder bridge ushered the mid-decades of last century, such as Great Belt East Bridge, Denmark (1,624 m), opened in 1998, also the Humber Bridge, UK (1,410 m), those two bridges were on behalf of single-box girder bridge. Miyata proved that the truss-stiffened deck configurations guaranteed the required safety level for flutter instability. Recently, a long-span bridge



Table 1 - Representative long-span bridges within last decade.

| Bridges                              | Main span [m] | Year | Location | Cross-section | Structural type              |
|--------------------------------------|---------------|------|----------|---------------|------------------------------|
| Aizhai Bridge                        | 1,414         | 2012 | China    | Truss-girder  | Suspension bridge            |
| Yi Sun-sin Bridge                    | 1,514         | 2012 | Korea    | Twin-boxes    | Suspension bridge            |
| Russki Island Bridge                 | 1,885         | 2012 | Russia   | Single-box    | Cable-stayed bridge          |
| Hardanger Bridge                     | 1,310         | 2013 | Norway   | Single-box    | Suspension bridge            |
| Third Bosphorus Bridge               | 1,408         | 2013 | Turkey   | Single-box    | Collaborative system bridges |
| 1915 Canakkale Bridge                | 2,023         | 2022 | Turkey   | Twin-boxes    | Suspension bridge            |
| Braila bridge                        | 1,120         | --   | Romania  | Single-box    | Suspension bridge            |
| Shiziyang Bridge*                    | 2,180         | --   | China    | Truss-girder  | Suspension bridge            |
| Xihoumen Highway and Railway Bridge* | 1,488         | --   | China    | Triple-boxes  | Collaborative system bridges |
| Messina Bridge*                      | 3,300         | --   | Italy    | Triple-boxes  | Suspension bridge            |

\* denotes the bridge still under construction stage.

with main span of 2,180 m, Shiziyang Bridge in China was under the construction stage, the truss-girder section was chosen for same reason. However, a great challenge for the Shiziyang Bridge was to take over the strong-wind induced instabilities. Zhao *et al.* (2024b) investigated the critical wind speed for flutter and VIVs characteristics, a central stabilization plate was installed on the deck to mitigate soft flutter.

In order to improve aerodynamic stability of suspension bridges, the application of central vent in the box section was supported by previously researchers via theoretical and experimental methods. Thus, a novel cross-section, central-slotted box girder bridge, of long-span bridge was taken into designers 'considerations. In 2009, Xihoumen Bridge in China, a suspension bridge which adopted the central-slotted cross-section type for the first time, with main span of 1650 m, was opened to service stage. Yang *et al.* (2017) have presented a series of previously research investigations around the aerodynamic stabilization for this novel type of long-span suspension bridges, with box girders by employing central air vent, which leads to slotted box girders. They have investigated the critical wind speeds corresponding to slot widths and angles of attack through wind tunnel test first time. As a latecomer, Yin sun-sin Bridge was built in Korea and open to service stage in 2012 (Lee *et al.*, 2012); the sensitivity of the Reynolds numbers on aerostatic force coefficient was investigated through

experimental results. The safety rail prevented the Reynolds number dependency of aerostatic force coefficients at negative angles of attack. A totally new type of section was instead the one proposed for the Messina Strait Bridge, Italy, a tri-cellular cross section, stiffened by several transverse beams; such an innovative solution was also due to the need of very high aerodynamic and aeroelastic performances because of the exceptional span of the bridge, with the main span of 3,300 m. The chosen solution could allow for a strong reduction of the drag force, and then of the static deformation in the horizontal plane, while the improved stability was checked with a vast wind tunnel test campaign. Lately, this new cross-section type was adopted again in Xihoumen highway and railway Bridge, in China, with the main span of 1488 m, and a superior aeroelastic performances could be achieved due to the double-slotted girder; Wu *et al.* (2023) also pointed out the VIVs may be the crucial problems for Xihoumen highway and railway Bridge, because of various additional facilities installed on the deck surface, such as wind barriers and balustrades. The highlight of this tri-cellular cross section bridge in China was the collaboration system adopted to provide sufficient stiffness in bending and torsion while achieving the large spans. However, in these last decades, so many important and challenging bridges have been built which are relevant for some of their characteristics, both from the technical and the aesthetic points of view. Just to mention two cases among the others, a reference can be made to the Millau Viaduct, France, and the Aizhai Bridge, China. The Millau Viaduct is the tallest bridge in the world, being the major masts as high as 340 m, that is more than the Eiffel Tower. Opened in 2004, it is a multi-span cable-stayed bridge, including six 342 m long central spans and two 204 m long lateral spans. The Aizhai Bridge is another spectacular example, built near Jishou, Hunan, China, and opened in 2012. The main span is 1,146 m long and it is probably the highest suspension bridge of the world, being placed 336 m above the underneath valley.

### *The phenomena of major concern in bridge aerodynamics*

#### *Vortex-induced vibration*

Vortex-induced vibration-VIV is a phenomenon triggered by the resonance between the Kármán vortex shedding forces and one of the natural frequencies of the structure, which indeed presents strong nonlinearities and where a major role is played by self-excitation. A well-known phenomenon during VIVs is the frequency of vortex shedding that is no-longer governed by the Strouhal law but is synchronized or “locked” to the vibration frequency of the structure, that is, “lock-in”. The state-of-the-art knowledge of VIV before 1963 was quite limited. Strouhal (1878), studying the tones produced by a wire immersed in a wind stream, had observed that they were directly proportional to the flow speed and inversely proportional to the wire diameter. Research work around how non-structural details impacted the VIVs’ characteristics was published and a noticeable example is the experimental campaign for the proposed

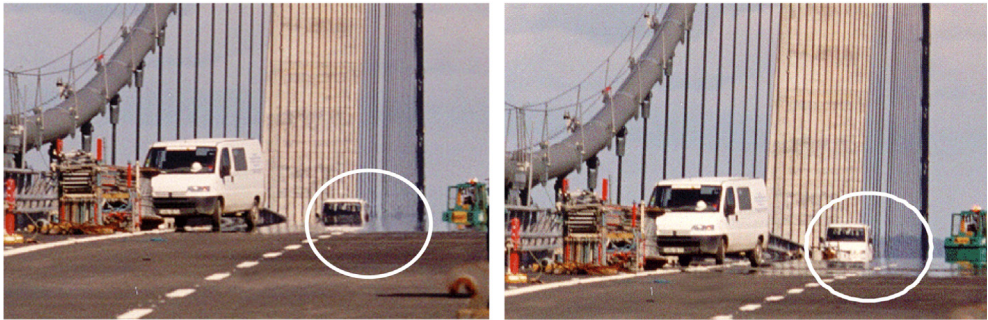


Fig. 1 - View along the deck of the East Bridge at crest, on the left, and trough of a large amplitude vertical oscillation, on the right.



Fig. 2 - Installation of spoiler on Humen Bridge.

Messina Bridge, Italy (Diana *et al.*, 2007). The impacts of all non-structural elements on the vortex-related stability of a double-slotted box girder, Xihoumen Highway and Railway Bridge, were investigated by the latest research findings (Wu *et al.*, 2023). Authors pointed that the most adverse impacts on the VIVs were wind barriers. Not occasionally, many researches spotlighted on this field, since the non-structural elements is essential for the long-span bridge, for ensuring driving safety of vehicles and requirements of maintenance while the bridge in the on-service state. At the early years, ten VIV events of the Storebælt suspension bridge were observed, as shown in Figure 1. Larsen presented the results of the on-site structural and wind monitoring program, correlation to wind-tunnel tests and the design and erection of guide vanes to the main span girder for mitigation of the oscillations. Another recent example is Humen Bridge, in Figure 2. Based on the fast results of field measurements, Ge *et al.* (2023) pointed out that the direct reason was that the water-filled barriers were placed

along the two edges of the bridge deck upper surface, which destroyed the streamlined aerodynamic shape configuration. The aerodynamic control spoiler was proposed to apply to suppress vortex-induced vibration based on systematic investigation.

### *Galloping*

Galloping is a single-degree-of-freedom dynamic instability typical of slender structures with non-circular bluff sections, due to cross-flow motion-induced forces which produce negative aerodynamic damping. It is characterized by large oscillations at one of the transversal structural modal frequencies, usually the lowest, with amplitude indefinitely growing with the wind speed beyond a certain critical value. Galloping in the plunging degree-of-freedom is generally not a problem for bridge decks, as it may occur only in case of very bluff girders, which are usually too stiff to give rise to this type of instability. Nevertheless, it is an important phenomenon for bridge towers and noncircular hangers. Nevertheless, a significant boost to the research on this phenomenon was given by Parkinson and coworkers with the papers presented at the first international conferences on wind engineering, where the nonlinear quasi-steady theory to galloping was formulated and applied to the case of square and rectangular two-dimensional cylinders, showing successful qualitative and quantitative agreement with experiments. Examples of interference between VIV and galloping can be conjectured from their results. In a paper presented at the last ICWE conference in Amsterdam, Matsumoto and Laneville (2011) investigated the complicated problem of the relation between galloping and Kármán vortex shedding, highlighting that the former is able to appear when the latter is mitigated or suppressed. Recently, Mannini *et al.* (2013) studied the combined VIV-galloping instability with experiments on a 3:2 rectangular cylinder.

### *Flutter*

Flutter is a dynamic instability basically involving a torsional and a vertical bending vibration mode of the deck with similar shapes. The flutter phenomenon is analytically approached by assuming that so-called “self-excited” forces stem from the motion of the body. The mechanism through which energy is extracted from the flow and feeds the structural oscillations is related to the variation of modal frequencies, that tend to approach due to fluid-structure interaction, and to the phase between the two degrees of freedom. At the time of the first international conference on wind engineering the theory of flutter for airfoils was already consolidated. The importance of flutter for long-span bridges was already in the minds of many pioneering delegates. A milestone in the history of bridge aerodynamics was set during the 1971 conference in Tokyo, where Scanlan (1971) reported flutter derivative results for a wide range of bridge deck geometries obtained by recording the free-decaying motion of elastically suspended section models from imposed initial conditions with

and without wind. More advanced identification techniques by this method have been used later on (Costa and Borri, 2007; Bartoli *et al.*, 2009).

With the purpose of a clear insight into the flutter mechanism, to shed some light on the flutter mechanism, simplified formulas to calculate flutter critical wind speed have been proposed (Chen and Kareem, 2006). Mannini and Bartoli (2007) also investigated in the wind tunnel the probabilistic properties of flutter derivatives for a box-girder deck section and made a first attempt to evaluate the uncertainty propagation from the aeroelastic coefficients to the calculated flutter instability threshold. Some present research also dedicated themselves to this: Gao *et al.* (2020) modeled the nonlinear oscillatory system during coupled post-flutter instabilities as a weak perturbation of the classical linear flutter theory. After that, Zhao *et al.* (2024b) predicted the flutter critical wind speed of long-span bridges by utilizing a nonlinear optimization strategy based on the principle of instantaneous power balance-IPB of the flutter critical state. In retrospect, the passive aerodynamic control method was widely used to control flutter issues, but it was worth noted that passive aerodynamic countermeasures may not satisfy the design requirements. The latest research by Zhao *et al.* (2024b) proposed a high effective active control device, investigated the improvement of a pair of wind flaps on the critical wind speed, while flaps were installed on the wind fairing. A real-time feedback of active control strategy was adopted, and 25% improvement of critical flutter speed obtained finally.

### *Buffeting*

Buffeting refers both to the excitation mechanism of a structure due to the wake of another structure and to the effect of turbulence naturally present in the atmospheric boundary layer. At the time of the first Conference on Wind Effects on Building and Structures the main contributions on buffeting were from the aeronautical field. The response of bridges to turbulent wind is usually calculated by assuming the linear superposition of buffeting and self-excited forces and possibly using the flutter derivatives measured in turbulent flow. Larose *et al.* (1992) compared full-scale measurements, results for full-aeroelastic and section wind-tunnel models and the prediction of a theoretical model based on the quasi-steady aerodynamic theory, neglecting aeroelastic coupling between the modes. Borri and Costa (2005) applied indicial functions as time-domain counterpart of aerodynamic admittances. If the effect of turbulence is accounted for not only in the buffeting forces but also in the self-excited forces, the dynamical system becomes time-variant and therefore the classical spectral analysis of random vibrations is no longer applicable. For this reason, a first attempt to do it was done by Xiang *et al.* (1995), who found a significant effect on the torsional response of the Shantou Bay Bridge, China. The nonlinear relation between self-excited and buffeting forces was also investigated by Diana *et al.* (2007). The same research group few years later proposed a time-domain rheological model to account for the depen-

dence of aeroelastic forces on reduced wind speed and angle of attack (Diana *et al.*, 2007). Recently, the field measurement of buffeting research occupies an increasingly important position. Wang *et al.* (2013) analyzed the cable-stayed Sutong Bridge with the wind spectra used in the design phase and those obtained experimentally from a long-term SHM system to compare the actual buffeting response with design predictions. Hu *et al.* (2017) presented an enhanced nonstationary buffeting force model for calculating tropical storm-induced buffeting response of long-span bridges, pointed out that the time-dependent admittance function reduces the extreme responses.

#### *Static instabilities*

The former is an aerostatic instability caused by the vanishing of the torsional stiffness of the structure due to the negative aerodynamic contribution related to a positive slope of the moment coefficient. In the last ten years, studies on aerostatic instability dive deeper into the calculation and analysis methods with the consideration of nonlinearities and complex situations. Domaneschi *et al.* (2015) explored the wind-induced stability in different controlled (passive, semi-active dampers, TMD) and uncontrolled configurations by FEM. Montoya *et al.* (2021) developed an efficient modal-based method for nonlinear aerostatic stability. Zhang and Zhu (2021) elaborated the effect of asymmetric wind field on static torsional divergence of flexible suspension bridge, the structural stability of flexible suspension bridge becoming poor under asymmetric wind load. Nevertheless, multi-sources nonlinearity and multi-stability during the lateral-torsional buckling are still the research hotspots for the complex structural system, such as long-span bridges.

#### *Cable vibration*

Cable vibration often represents the major aerodynamic problem for cable-stayed bridges. The oscillations were attributed to the formation of a water rivulet on the upper windward surface of the cable, which renders aerodynamically unstable its apparent cross section. Another possible mechanism of cable excitation, along with conventional vortex-induced vibration, is due to intermittent two-dimensional Kármán vortex shedding at high reduced velocity. Over the past decades, the rain wind-induced vibration-RWIV on large span bridges has been widely reported. Numerous explanations and mechanisms for the RWIV are proposed and discussed. Jing *et al.* (2017) elaborated the main excitation mechanism of RWIV from the coupling of the upper rivulet and cable vibration. The oscillating upper rivulet induces the changes in aerodynamic forces, which produce a positive work and excite the cable to vibrate. Gao *et al.* (2020) revealed that the higher- and multiple-mode RWIVs can be excited by a local rivulet, even under a lower wind speed and compared the RWIVs with VIVs to uncover their underlying similarities and relationships. Chang *et al.* (2022) proposed a revised number to consider the aerodynamic damping du-

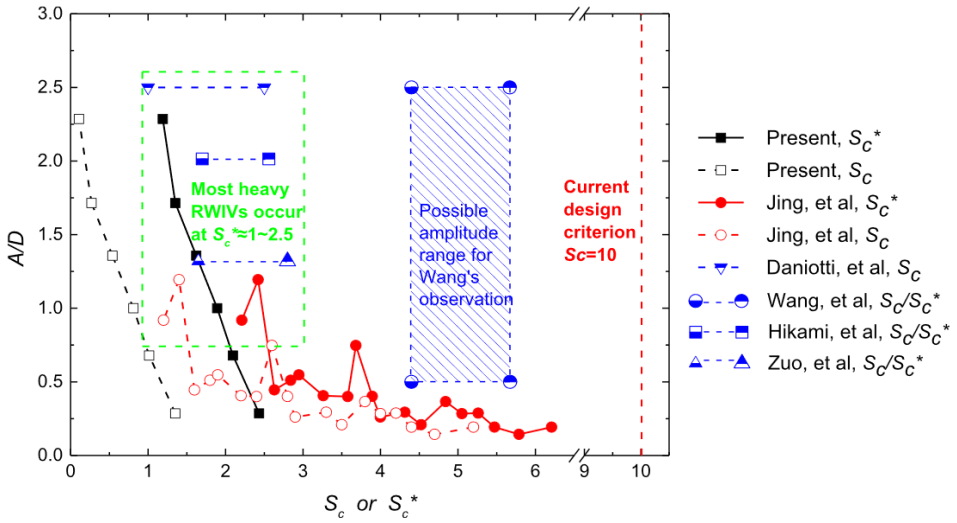


Fig. 3 - RWIV occurrence with  $Sc$  number and  $Sc^*$  number in wind tunnel experiments and field measurements.

ring the RWIV, besides the impact of mass and damping in the original number, as shown in Figure 3. However, the discussions of the development mechanism of RWIV still need to go further in-depth and a consensus among the varied mechanisms proposed so far is still lacking.

#### *Development on the creation of AI tools for reproducing and forecasting wind tunnel tests*

Machine learning algorithms, deep learning algorithms and other AI tools were greatly boosted within recent decades, and AI tools have raised more attention of many scholars for reproducing and forecasting wind engineering problem in addition to traditional mathematical tools, weakening prior knowledge and manual intervention. In the field of wind tunnel test, Wu and Kareem (2013) first proposed an ANN based on embedded cellular automata optimization to represent nonlinear and unsteady aerodynamic forces. With the deepening of research on neural network architecture, networks used for complex time series mapping such as RNN and LSTM are also used for aerodynamic modeling, and scholars have verified its feasibility on numerical simulation and wind tunnel test data (Li *et al.*, 2021). Ma *et al.* (2023) proposed a group sparse regression method which can identify the essential terms of nonlinear polynomial aerodynamic formula. After preliminary verification of the fitting performance of the machine learning algorithm, the research direction gradually

developed into prediction and identification problem for field measurement data. Li *et al.* (2020a) proposed a machine learning framework to the vortex vibration problem, using health monitoring as the data source, using a decision tree algorithm to classify vortex vibration events, and then established a vortex vibration response time domain model based on support vector machines. Liu *et al.* (2022) explored the probabilistic dependence between wind parameters and structural responses by explicit polynomial regression equations and proposed a Bayesian inference approach. Scholars also try to use machine learning methods to directly predict aerodynamic performance. Due to the complex shape of the bridge section and the strong nonlinear wind-induced effects, machine learning research involving geometric shapes is still in its infancy, and it is difficult to directly predict aerodynamic performance.

### *Conclusions*

This review paper retrospect the advancement of the bridge aerodynamics within the last decade, many built or under construction stage long-span bridges were summarized world-widely. With the increasement of across ability, long and super long-span bridge became the bellwether in recent challenging projects, with a result of increasing sensitivity to wind-induced vibration. The evolution of long-span bridge was raked up at the beginning to deepen overall understanding of the development of bridge engineering in the last ten years. A clearly advance route could be observed that multi-box girder bridge increased since the demanding of across ability, that kind of cross-section type improved flutter performance greatly compared to the truss girder or single box girder bridge. However, VIVs were frequently reported. Indeed, the VIV performance of bridge structures still grasped the researchers' attention greatly within the recent decade, many researchers dedicated to promote development of this field on the basis of wind tunnel tests, simulations and field measurements. Besides the VIVs, the research topic around the buffeting, flutter, cable vibration, and static instabilities issues were still mentioned frequently. It worth noting that the non-synoptic wind-induced large amplitude vibration raised tremendous discussions, such as typhoon, downburst, and strong mountain valley wind, the strong turbulence, large wind angle of attack or gust wind resulted frequently wind-induced oscillations. What the most attractive trend in the latest decade was the application of the AI tools in the bridge aerodynamic subject. Many scholars used the novel tools for reproducing and forecasting wind engineering problem in addition to traditional mathematical tools, weakening prior knowledge and manual intervention. Overall, the trigger mechanism and reliable approach for not only modeling vortex-induced vibration but also for self-excited forces (likewise flutter and buffeting), and some other aspects as foregoing wind-induced vibrations are still needed further continuous efforts, providing theoretical foundation for the modern bridge engineering evolution towards to more flexible and lighter in the future. Finally, many impor-



tant issues in bridge aerodynamics are still today open problems (more reliable models of vortex-induced vibration, a reformulation of self-excited forces for flutter and buffeting analyses or a better understanding of wind-excitation of inclined cables are needed, just to mention a few examples) and they are supposed to become more and more pressing due to the present increase in the dimension, flexibility and lightness of modern bridge structures, so that in the near future a strong research effort in this branch of wind engineering is still needed and breakthrough studies are expected.

### References

- Borri C., Majowiecki M., Spinelli P. 1993. The aerodynamic advantages of a double-effect large span suspension bridge under wind loading. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 48, 317-328
- Borri C., Bartoli G., Mannini C. 2013. The long way from Teddington (1963) to Cambridge (2013) through 50 years of bridge aerodynamics. In: *Fifty Years of Wind Engineering –Prestige Lectures from the 6th EACWE* (C.J. Baker, J. Owen, M. Sterling and D. Hargreaves Eds.). Nottingham: University of Nottingham.
- Bartoli G., Contri S., Mannini C., Righi M. 2009. Towards an improvement in the identification of bridge deck flutter derivatives. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(8), 771-785.
- Borri C., Costa C., 2005. Time-domain buffeting simulations for bridges. In: *Proceedings of the 4th European and African Conference on Wind Engineering* (J. Náprstek and C. Fischer Eds.), 46.
- Chang Y., Zhao L., Zou Y., Ge Y. 2022. A revised Scruton number on rain-wind-induced vibration of stay cables. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 230, 105-166.
- Chen X., Kareem A. 2006. Understanding the underlying physics of multimode coupled bridge flutter based on closed-form solutions. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Computational Wind Engineering*. 145-148.
- Costa C., Borri C. 2007. Full-scale identification of aeroelastic parameters for bridges. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Computational Wind Engineering*. 799-806.
- Diana G., Fiammenghi G., Belloli M., Rocchi D., *et al.* 2007. Sensitivity analysis on the effects of different aerodynamic devices on the behavior of a bridge deck. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering*. 2191-2198.
- Domaneschi M., Martinelli L., Po E. 2015. Control of wind buffeting vibrations in a suspension bridge by TMD: Hybridization and robustness issues. *Computers & Structures*, 155, 3-17.
- Gao G., Zhu L., Li J., Han W., *et al.* 2020. A novel two-degree-of-freedom model of nonlinear self-excited force for coupled flutter instability of bridge decks. *Journal of Sound and Vibration*, 480, 115406.
- Ge Y.J., Zhao L., Jinxi C. 2023. Case study of vortex-induced vibration and mitigation mechanism for a long-span suspension bridge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 220(2), 104866.
- Hu L., Xu Y.L., Zhu Q., Guo A., *et al.* 2017. Tropical storm-induced buffeting response of long-span bridges: Enhanced nonstationary buffeting force model. *Journal of Structural Engineering*, 143(6), 04017027.

- Jing H., Xia Y., Li H., Xu Y., *et al.* 2017. Excitation mechanism of rain-wind induced cable vibration in a wind tunnel. *Journal of Fluids and Structures*, 68, 32-47.
- Larose G.L., Davenport A.G., King J.P.C. 1992. Wind effects on long span bridges: consistency of wind tunnel results. In: *Progress in Wind Engineering, Proceedings of the 8th International Conference on Wind Engineering* (A.G. Davenport, N. Isyumov, J.P.C. King, M. Novak, *et al.* Eds.). 1191-1202.
- Lee S., Yoon J., Kwon S. 2012. Yi Sun-sin Bridge: High Speed Wind Tunnel Tests of Twin Box Girder, IABSE Congress Report, 18(30).
- Li W., Laima S., Jin X., *et al.* 2020. A novel long short-term memory neural-network-based self-excited force model of limit cycle oscillations of nonlinear flutter for various aerodynamic configurations. *Nonlinear Dynamics*, 100(3), 2071-2087.
- Li T., Wu T., Liu Z. 2020. Nonlinear unsteady bridge aerodynamics: Reduced-order modeling based on deep LSTM networks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 198, 104116.
- Li S., Laima S., Li H. 2021. Physics-guided deep learning framework for predictive modeling of bridge vortex-induced vibrations from field monitoring. *Physics of Fluids*, 33(3), 037113.
- Liu P., Chu X., Cui W., *et al.* 2022. Bayesian inference based parametric identification of vortex-excited force using on-site measured vibration data on a long-span bridge. *Engineering Structures*, 266, 114597.
- Ma T., Cui W., Gao T., *et al.* 2023. Data-based autonomously discovering method for nonlinear aerodynamic force of quasi-flat plate. *Physics of Fluids*, 35(2).
- Mannini C., Bartoli G. 2007. A probabilistic approach to bridge deck flutter. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering*. 2351-2358.
- Mannini C., Marra A.M., Massai T., Bartoli G. 2013. VIV and galloping interaction for a 3:2 rectangular cylinder. In: *Proceedings of the 6th European and African Conference on Wind Engineering*.
- Matsumoto M., Laneville A. 2011. Generation of galloping of bluff body in relation to Karman vortex. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Wind Engineering*.
- Montoya M.C., Hernández S., Kareem A., Nieto F. 2021. *Efficient modal-based method for analyzing nonlinear aerostatic stability of long-span bridges*. *Engineering Structures*, 244, 112556.
- Scanlan R.H. 1971. An examination of aerodynamic response theories and model testing relative to suspension bridges. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures*. 941-951.
- Strouhal V. 1878. U<sup>ber</sup> eine besondere Art der Tonerregung. *Annalen der Physik und Chemie*, 216-251.
- Wawzonek M.A., Parkinson G.V. 1980. Combined effects of galloping instability and vortex resonance. In: *Wind Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering* (J.E. Cermak Ed.), 673-684.
- Wang H., Hu R., Xie J., Tong T., *et al.* 2013. Comparative study on buffeting performance of Sutong Bridge based on design and measured spectrum. *Journal of Bridge Engineering*, 18(7), 587-600.
- Wu F., Y., Zhao L., *et al.* 2023. Aerodynamic Force Distribution Characteristics around a Double-Slotted Box Girder of a Long-Span Bridge during Vortex-Induced Vibration. *Journal of Bridge Engineering*, 28(1).

- Wu T., Kareem A. 2013. Aerodynamics and aeroelasticity of cable-supported bridges: identification of nonlinear features. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(12), 1886-1893.
- Xiang H. 1995. Buffeting response analysis and control of long-span bridges. In: *A State of the Art in Wind Engineering, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering*. 295-319.
- Yang Y., Zhou, R., Ge Y. *et al.* 2017. Flutter characteristics of twin-box girder bridges with vertical central stabilizers. *Engineering Structures*, 133, 33-48.
- Zhao L., Cheng Y., Liu S., Fang G., *et al.* 2024a. Instantaneous Power Balance Algorithm for Flutter Critical Wind Speed Prediction of Bridge Girders. *Journal of Engineering Mechanics*, 150(2), 04023120.
- Zhao L., Wang Z., Fang G., *et al.* 2024b. Flutter performance simulation on streamlined bridge deck with active aerodynamic flaps. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 13170.
- Zhang Z., Zhu L. 2021. Wind-induced symmetric and asymmetric static torsional divergence of flexible suspension bridges. *Journal of Fluids and Structures*, 103, 103263.

### *Sitography*

- [1] <https://flore.unifi.it/handle/2158/820280>



PIERO D'ASDIA, FABIO RIZZO

*Interaction between structural model and aerodynamics effects  
in the aeroelastic stability of suspension bridge*

*Interazione fra modello strutturale e aerodinamica  
nella stabilità aeroelastica dei ponti sospesi*

*Abstract*

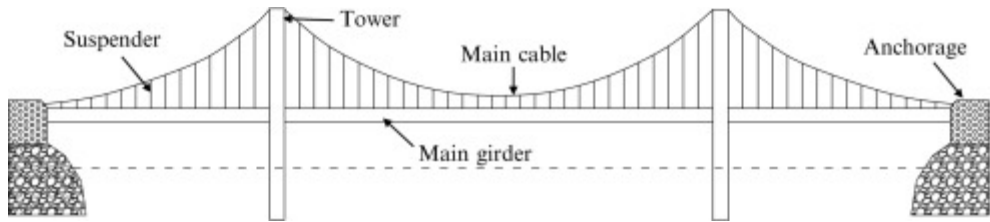
The toughest challenge in the suspension bridge design is to ensure the safety under the aeroelastic phenomena due to the wind action. The most severe phenomenon is the SDOF or MDOF flutter instability. It is well known that the bridge deck aerodynamics affects the flutter instability and that twin and multiple-box bridge deck represents a sure advantage to increase the critical flutter velocity. This paper discusses the aerodynamics of twin and multiple-box deck. In particular, some results obtained changing the boxes spacing are given. In addition, two proposals to modify the ratio between torsional and flexural natural frequencies are discussed. The first one consists of the hangers crossing in order to increase the ratio between torsional and flexional natural frequencies. The second one consists of the torsional frequency reduction to be smaller than flexural one.

*Sommario*

Nei ponti sospesi di grande luce la sfida più rilevante è assicurarne la stabilità sotto l'azione del vento per quanto riguarda i fenomeni aeroelastici. Il fenomeno più pericoloso è l'instabilità dovuta al *flutter* ad uno o più gradi di libertà. È ben noto il ruolo dell'aerodinamica dell'impalcato nella possibilità di insorgere del *flutter*. Altrettanto ben noto è il vantaggio che da tale punto di vista presentano gli impalcati bi e multi-cassone per aumentare la velocità critica di *flutter*. In questo articolo viene discussa la variabilità dell'aerodinamica dell'impalcato bi e multi-cassone modificando la distanza fra i cassoni. Infine, si discute il comportamento strutturale che si ottiene con l'introduzione nello schema statico di pendini incrociati fra i due lati del ponte, ovvero rendendo la frequenza torsionale inferiore a quella flessionale.

*Introduction*

Suspension bridge is a type of bridge in which the deck is hung below suspension cables on vertical suspenders. The basic structural components of a suspension bridge



*Fig. 1 - A typical suspension bridge architecture.*

system include stiffening girders/trusses, the main suspension cables, main towers, and the anchorages for the cables at each end of the bridge. The main cables are suspended between towers and are finally connected to the anchorage or the bridge itself, and vertical suspenders carry the weight of the deck and the traffic load on it.

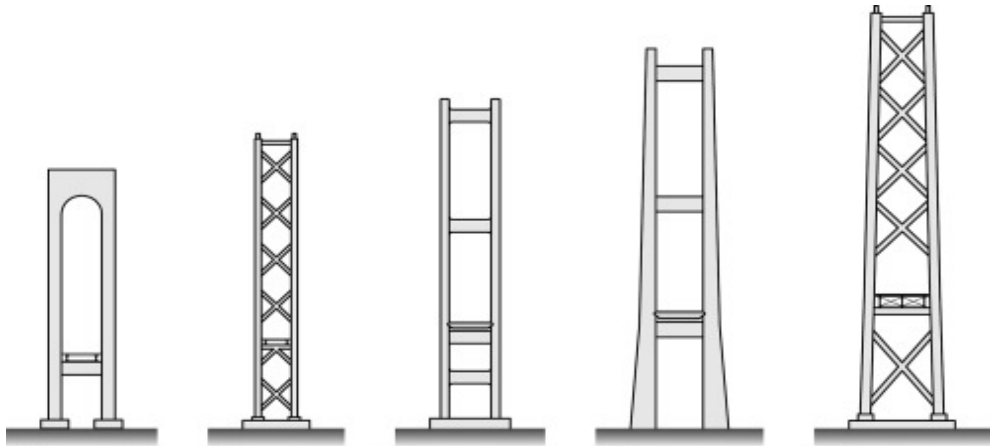
The whole cross-section of the main cable is highly efficient in carrying the loads and buckling is not a problem. Therefore, the dead weight of the bridge structure can be greatly reduced and longer span becomes possible. In addition, the esthetic appearance of suspension bridges is another advantage in comparison with other types of bridges (Lin and Yoda, 2017).

Suspension bridges, see. e.g., Figure 1, typically consist of two and sometimes four parallel cables separated by a distance approximately equal to the roadway deck width that they support. These cables act as tension elements and extend from anchors at each of their ends over the tops of the intermediate towers. The deck is suspended by strong ropes running from the deck level to the main cables. The main cables can consist of parallel strong wires that are aerially spun in place or prefabricated wire ropes.

The deck can be stiffened by a truss or by girder elements. The purpose of the stiffening element is to ensure aerodynamic stability and to limit the local angle changes in the deck. The bridge can be erected without any ground-based towers. The resulting bridge is very elegant in appearance, and its form clearly expresses its function. As the existing inventory of suspension bridges have aged, inspections have revealed active corrosion and stress corrosion cracking in many of the wires comprising the main cables.

A typical suspension bridge is a continuous girder suspended by suspension cables, which pass through the main towers with the aid of a special structure known as a saddle, and end on big anchorages that hold them. The main forces in a suspension bridge are tension in the cables and compression in the towers. The deck, which is usually a truss or a box girder, is connected to the suspension cables by vertical suspender cables or rods, called hangers, which are also in tension. The weight is transferred by the cables to the towers, which in turn transfer the weight to the anchorages on both ends of the bridge, then finally to the ground.

The pylons of suspension bridges, in Figure 2, can be steel structures, as is usually the case for U.S. and Japanese bridges, or concrete structures, like the Store-



*Fig. 2 - Typical layouts of suspension bridge towers, ordered in ascending size. From the left: simple frame, trussed, multiple frame, stain lined frame, and stain lined truss.*

baelt Bridge. Concrete structures are typically more economical, at least in areas of low seismicity and with good soil conditions (De Miranda, 2016). The tops of pylons have to accommodate the cable saddles, where practically all the load of the half bridge is concentrated. The anchor blocks, always set in concrete, have the purpose of transmitting both vertical and horizontal forces to the soil, transferred by the cable anchorages. They are massive structures, which contribute to much of the total cost of the bridge, as well as lengthening construction time.

Three-dimensional modeling is closely recommended for suspension bridges. This includes the following items:

1. Main cables and saddles: if truss elements are used, cables are meshed at the hanger locations. Otherwise, specific catenary cable elements are included in the FEM solutions. The modeling and analysis should account for saddles' role in the various erection and exercise phases: moveable/fixed, according to the type of bridge. Considering saddles' relevant role in the whole bridge structure, a 3-D sub model should be considered;
2. Hangers: Truss elements can be used except for the principal rigid connection between the girder and the main cables, at midspan, where beam elements are preferred, together with a specific sub model of the structure, including solid elements, to account for hot spot stress checks;
3. Pylons and Girders by FEM modelling (Pipinato, 2022).

The dynamic response prediction for long-span bridges, exposed to wind loads, is a complex task. The study of bridge flutter has attracted the attention of the scien-

tific community because of the susceptibility to flutter-induced catastrophic bridge failure. Over the years, analytical and numerical methods have been developed and successfully applied to the quantification of the loads and the simulation of the response (De Miranda, 2016; Ge and Xiang; 2009, Katsuchi *et al.*, 1999; Khalil *et al.*, 2016). However, it remains necessary to perform physical experiments to gain critical information for the analysis of the fluid-flow forces on bridge decks.

For the case of large span suspension bridges the most significant challenge is to ensure their stability under the wind action, not only in relation to the tensions and deformations induced by the static component of the wind actions but also and above all with regard to the aeroelastic phenomena or the self-excited oscillations due to aeroelastic instabilities. The most relevant aspect during the design process is to avoid the flutter at one or more degrees of freedom. This phenomenon is the most relevant because the correct structural sizing for live loads, i.e. traffic or walking, is enough to prevent static aeroelastic phenomena such as torsional divergence or phenomena such as buffeting and galloping and also those linked to the lock-in of the vortex shedding of deck elements, towers and cables. Several studies on the flutter instability carried out during the Messina bridge design process have provided results that are generalizable for very large spans.

It is well known that the deck aerodynamics affects the bridge vulnerability to the one or more degrees of freedom flutter instability, i.e. instability associated to one or more modes of vibration of the structure depending on the positive or negative value assumed by the lift and torque derivatives corresponding to the angle of attack zero between the wind flow and the deck and with wind speed values corresponding to the onset of flutter instability dependent on the magnitude of the absolute value of these derivatives.

The torsional vibration mode frequency is bigger than the corresponding vertical bending mode frequency for wind speed equal to zero. However, when the wind speed increases, structural frequencies change and the torsional one tends to decrease. It can occur that the two frequencies became equal, and couple under the wind speed that provides the instability.

Therefore, the flutter speed can increase, i.e. in order to avoid the flutter instability, both with the decrease in the value of the derivatives, i.e. acting on aeroelastic parameters, and by spacing frequencies without wind, i.e. acting on structural parameters.

Multiple-box decks, as for example the Messina bridge deck, reduce the flutter instability risk compared to other typologies. In this paper some results on the interaction between the boxes spacing and the elasticity is discussed. Secondly, the paper discusses two solutions to improve the bridge structural behavior:

- i) crossed hangers between the two sides of the bridge;
- ii) inverting the initial frequencies making the torsional one lower, rather than higher, than the flexural one.



### *Structural background*

Extremely large structures, such as long-span bridges, must be designed for a life longer than ordinary constructions and safety verification cannot usually be completely derived from instructions and codes made for smaller constructions. At the same time, the cost of long-span bridges should not be uselessly increased requiring excessive or irrational performance. Adequate structural response to environmental actions for earthquake and wind. The seismic action affects anchorages and towers and it influences the overall costs of the structure. The wind action almost affects the deck design because phenomena as for example flutter static divergence, vortex-shedding, and buffeting. Long-span bridge deck must be as light as possible to limit cables weight. Wind actions on deck should be minimized to contain the horizontal actions on the towers. Decks are the most important structural elements in designing long span bridges, although is a secondary structural element. In addition, it is unneglectable an adequate structural response to anthropogenic actions. Wind forces can grouped in three categories: 1. static forces, that change slowly in relation with structural characteristics and they induce static deformations/tensions; 2. aerodynamic forces, that change with frequencies near the natural structural frequencies and can induce aerodynamic phenomena as for example the forced oscillations and resonance; 3. aeroelastic forces, that are generated by the motion of the structure and can induce auto-excited oscillations and aeroelastic instability. Aeroelastic phenomena can be grouped, in turn, in static and dynamic phenomena. Static phenomena are the torsional divergence and the static instability. Dynamic phenomena are the dynamic instability given by the flutter, the vortex shedding, the lock-in and the galloping, and the buffeting.

### *Twin-box deck*

Twin box decks are becoming increasingly adopted in long span bridges due to their good aerodynamic performance with respect to the flutter instability. For small gaps between the decks they behave as a whole continuous body while, increasing the gap, strong dynamic interaction between the two occurs: the windward deck causes a turbulent wake that impinges on the leeward girder inducing unsteady aerodynamic forces. Figure 3 shows some examples. Sato *et al.* (2002), discusses some results for a suspension bridge with a central-span length equal to 2800 m and a twin-box deck with the ratio between the main cables spacing and the deck thickness equal to 8.6. They have estimated the critical flutter velocity equal to 85 m/s. Aerodynamic stabilization for two box-girder suspension bridges in China with super long span is introduced hereafter, including the 1490 m spanned Runyang Yangtze River Bridge with a central stabilizer and the 1650 m spanned Xihoumen Sea-Crossing Bridge adopted twin-box girder, and followed by the aerodynamic feasibility study of a box-girder suspension bridge with a main span of 5000 m. Ge and Xiang (2009), discussed two examples of twin-box deck suspension bridges with central-span length equal

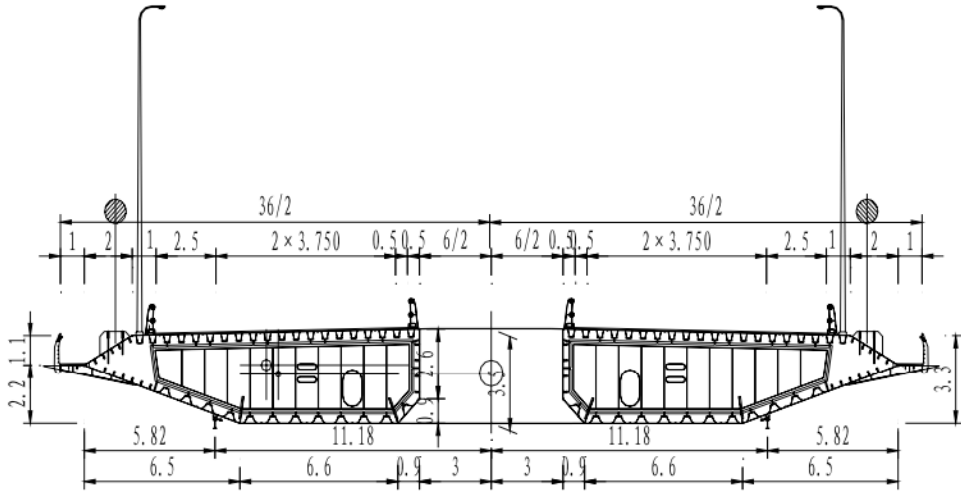


Fig. 3 - Proposed box girder sections for Xihoumen Bridge, Unit: m (Ge and Xiang, 2009).

to 5000 m and with  $B/D = 17$  and  $32$ , respectively. They have estimated the critical flutter velocity equal to  $74.7$  m/s and  $82.9$  m/s, respectively.

#### Multiple-box deck

Multiple-box decks are inherently stable against aeroelastic instability due to classical flutter. Figure 4 shows an example of multiple-box deck bridge designed to cross the Strait of Messina. The bridge stability with multiple-box decks is entrusted to the suspension system. Figure 5 shows a comparison between single a multiple-box section deck in term of Lift and Moment coefficient.



Fig. 4 - Multiple-box decks examples: Chongming bridge in Shanghai, cable-stayed bridge with central-span length equal to 730 m, on the left, and Messina bridge '92, in Italy, suspension bridge with central-span length equal to 3.300 m, on the right.

Interaction between structural model and aerodynamics effects  
in the aeroelastic stability of suspension bridge

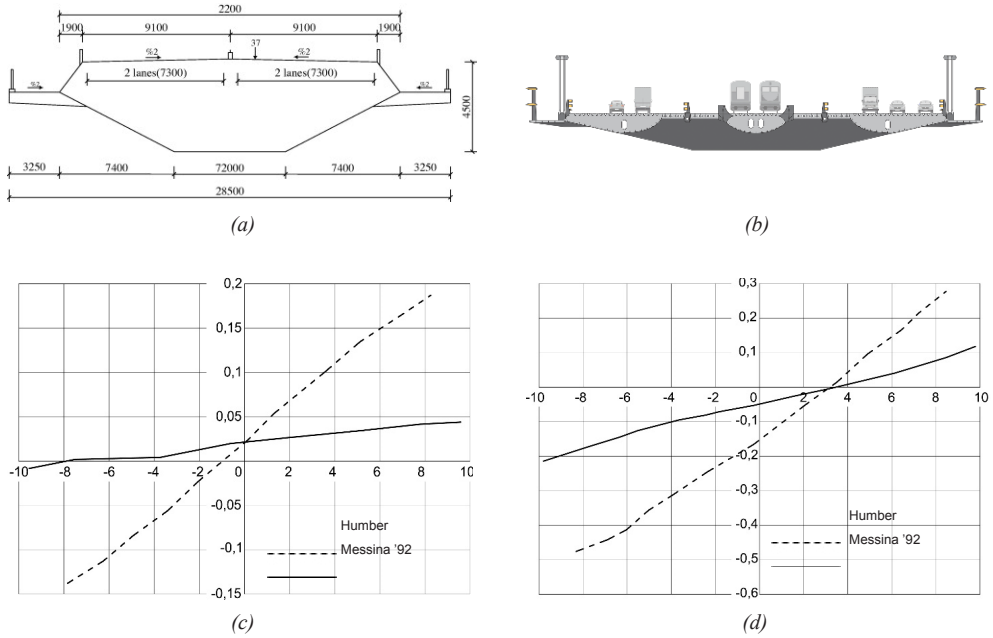


Fig. 5 - Humber bridge deck (a), Messina bridge deck (b), Lift coefficient (c) and Moment coefficient (d).

*Theoretical overview*

The dynamic response of a long-span bridge due to wind excitation can be modeled through the multi-mode approach in the frequency domain. The dynamic component of the wind loading, causing deck vibration, can be represented by superposition of turbulence-induced, aerodynamic, forces and motion-induced, aeroelastic, forces. Self-excited forces, acting on a unit-length section of the deck are defined as lift,  $L_h$ , drag,  $D_p$ , and moment,  $M_\alpha$ . These forces are commonly based on a first-order linear expansion of the  $h$  vertical displacement and  $\alpha$  torsional rotation of the generic deck cross section, first introduced by Scanlan and Tomko (1971). The effects of the lateral DOF and  $D_p$ , usually important in special cases only (Katsuchi *et al.*, 1999), were not considered.

Even though this model is strictly valid for simple-harmonic vibration of the deck, it is usually acceptable for small-amplitude random vibration.

Consequently, the aeroelastic lift and moment forces of the generic cross section, per unit deck span or longitudinal model length, were determined as reported in Eq. (1a) and Eq. (1b).

$$L_h = 0.5\rho U^2 B \left[ KH_1^*(K) \frac{h}{U} + KH_2^*(K)(B\alpha/U) + K^2 H_3^*(K)\alpha + K^2 H_4^*\left(\frac{h}{U}\right) \right] \quad (1a)$$

$$M_\alpha = 0.5\rho U^2 B \left[ KA_1^*(K) \frac{h}{U} + KA_2^*(K)(B\alpha/U) + K^2 A_3^*(K)\alpha + K^2 A_4^*\left(\frac{h}{U}\right) \right] \quad (1b)$$

In the previous equations  $\rho$  is the air density,  $U$  the mean wind speed perpendicular to the bridge, or model, longitudinal axis,  $B$  is the deck width; the “over-dot” symbol denotes derivation with respect to time  $t$ . The quantities  $H_i^*$  and  $A_i^*$ , with  $i = 1, \dots, 4$ , are given by Scanlan and Tomko (1971). These functions are experimentally found in wind tunnel by testing a section model of the full-scale girder at a reduced scale. The flutter derivatives depend on the reduced frequency  $K = \omega B/U$  or, equivalently, reduced velocity  $U_r = U/(nB) = 2\pi/K$ , with  $\omega$  being the angular vibration frequency of the deck in rad/s and  $n = \omega/(2\pi)$  the frequency in Hz. The dynamic equilibrium equations of the 2-DOF system, which is tested in the wind tunnel, reproduce the vertical,  $h$ , and torsional,  $\alpha$ , aeroelastic vibration of a representative finite-length section of the full-scale bridge deck. The lift force  $L_h$  and overturning moment  $M_\alpha$  per unit length of the deck are measured over the span length  $\lambda$  of the experimental model. The dynamic equations Eq. (2) of the 2-DOF system, reproducing the vibration of the apparatus tested in wind tunnel, can be derived as shown below, following the original formulation by Scanlan and Tomko (1971), reported in Simiu and Scanlan (1986):

$$M \left[ \ddot{h} + \alpha \left( \frac{\dot{s}}{M} \right) + 2\xi_h \omega_h \dot{h} + \omega_h^2 h \right] = L_h \lambda I_\alpha \left[ \ddot{\alpha} + h \left( \frac{\dot{s}}{I_\alpha} \right) + 2\xi_\alpha \omega_\alpha \dot{\alpha} + \omega_\alpha^2 \alpha \right] \quad (2)$$

In Eq. (2)  $M$  is the total mass of the model over the length  $\ell$ , which also accounts for the mass of the moving components of the experimental rig;  $I_\alpha$  is the total mass moment of inertia;  $\alpha$  is the static mass unbalance about the elastic axis, equal to the product of mass  $M$  and the distance, with appropriate sign, between the elastic center, center of stiffness, and the center of mass;  $\lambda$  is the longitudinal length of the model;  $\omega_h$  and  $\omega_\alpha$  are the angular frequencies of vibration corresponding to the two DOFs;  $\xi_h$  and  $\xi_\alpha$  are the corresponding structural damping ratios. The damping ratios coefficients replicate unavoidable dissipation mechanisms in the wind tunnel setup, which cannot be eliminated. The careful selection of the model's frequencies is also an important issue in the design of the experimental apparatus to ensure the successful measurement of the flutter derivatives.

After the experimental measurement of the flutter derivatives, Eq. (2) was used to determine the critical flutter speed of the model, tested in the wind tunnel. The solution to the flutter problem was based on the original 2-DOF flutter theory,

proposed by Scanlan. Calculation of the flutter speed was based on the iterative procedure described by Simiu and Scanlan (1986), simulating a 2DOF dynamical system with mass, inertia, damping ratios and flutter derivatives corresponding to the actual setup.

*Case study: Messina bridge*

The Strait of Messina Bridge is a planned suspension bridge across the Strait of Messina aimed to connect Sicily with mainland Italy. The bridge would span the cities of Torre Faro in Sicily and Villa San Giovanni in mainland Italy. Figure 6 shows the typical modal deformed shape for the vertical and torsional mode.

In the 1960s, a wide variety of proposals were advanced, including everything from submerged tubes to floating struts, pontoons and a revolving central section of the bridge. None turned out to be realistic. In 1969, an international design competition was arranged. In the 1970s, feasibility studies were undertaken by the State Railways leading to the creation of a private company with responsibility for planning the crossing of the Strait. In the 1980s, the Messina Strait Company set up with support from the State Railways, the regions and *Istituto per la Ricostruzione Industriale-IRI*. It concluded that it would be feasible to build a suspension bridge. Detailed plans followed in the 1990s with final approval from the High Council of Public Works. The 2006 plan called for a single-span suspension bridge with a central span of 3.300 m. Plans called for four traffic lanes, two driving lanes and one emergency lane in each direction, two railway tracks and two pedestrian lanes. In order to provide a minimum vertical clearance for navigation of 65 m, the height of the two towers was to be 382.6 m. This would have been taller than the Millau Viaduct in France, currently the tallest bridge in the world at 341 m. The bridge's suspension system would have relied on two pairs of steel cables, each with a diameter of 1.24 m and a total length, between the anchor blocks, of 5.300 m.

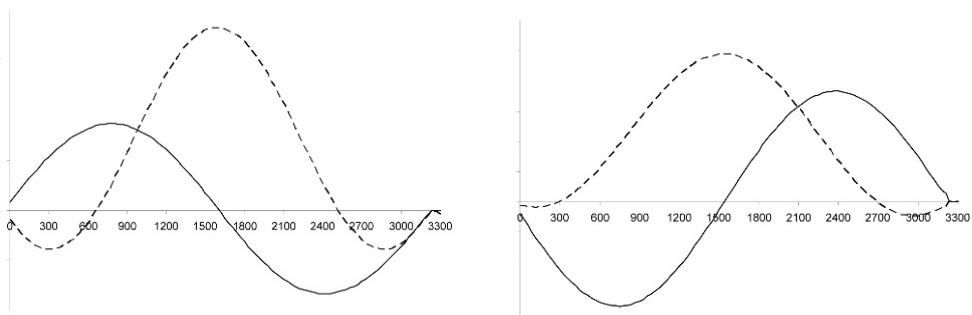


Fig. 6 - Structural modal shapes: Vertical mode, on the left, and Torsional mode, on the right.

Tab. 1 - Multiple-box deck suspension bridge structural modal frequencies. Structural parameters  $B$  = main cables spacing;  $\gamma$  = deck weight,  $f_h$  = vertical modal frequency;  $f_a$  = torsional modal frequency,  $U_c$  = critical flutter velocity.

| Configurations   | $b$<br>[m] | $g$<br>[t/m] | Structural Modal frequencies<br>[Hz] |              |                    | $U_c$<br>[m/s] |
|------------------|------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------|----------------|
|                  |            |              | $1^{st} f_h$                         | $1^{st} f_a$ | $1^{st} f_a / f_h$ |                |
| 1 (Messina 1992) | 52         | 18.5         | 0.0604                               | 0.0804       | 1.33               | 94.0           |
| 2                | 52         | 15.6         | 0.0604                               | 0.0821       | 1.36               | 86.7           |
| 3                | 48         | 14.8         | 0.0604                               | 0.0823       | 1.38               | 79.4           |
| 4                | 44         | 14.3         | 0.0605                               | 0.0847       | 1.40               | 88.6           |
| 5                | 40         | 14.1         | 0.0605                               | 0.0866       | 1.43               | 65.1           |

#### *Flutter instability acting on aeroelastic parameters*

As it was discussed in the first Section, the deck shape affects the aeroelastic effects. It was observed that reducing the main cables spacing dimension, i.e. reducing boxes spacing, the ratio between the first torsional and vertical natural frequency increases. Some structural parameters are listed in Table 1 for five different configurations. The main cables spacing varies from 52 m, configuration 1, to 40 m, configuration 5. It is important to specify that 2 differs from 1 because the absence of grillages. Though wind tunnel experiments were observed that the ratio between the first two frequencies, i.e. torsional and flexional, in the following also named vertical, respectively, varies between 1.33 and 1.43. Finally, the critical flutter velocity ranges from 65.1 m/s, configuration 5, to 94 m/s, configuration 1. The strongest decreasing of the critical flutter velocity occurs for the main cables spacing around 40 m.

#### *Flutter instability acting on structural parameters*

Finite Element Method-FEM analyses performed on crossing hangers, in Figure 7, have shown that the critical flutter velocity for configuration 1 increases to 120 m/s. The analyses were performed using the TENS0 nonlinear geometrical analysis program, which can execute dynamic step-by-step integration of the nonlinear three-dimensional structure with geometric nonlinearities.

The TENS0 software includes modules for simulating cable and beam finite element models and for the study of wind-structure interaction phenomena with generation of wind speed time histories and simulation of various aeroelastic loads. The Newmark-Beta method with Rayleigh damping is used for numerical integration of the dynamic equations. Wind loads on the bridge deck are time dependent; they are simulated by applying the aerodynamic coefficients as a function of the time-dependent angle of attack and by setting the appropriate values of dynamic wind pressure at a given mean wind speed  $U$  at deck level.

Interaction between structural model and aerodynamics effects  
in the aeroelastic stability of suspension bridge

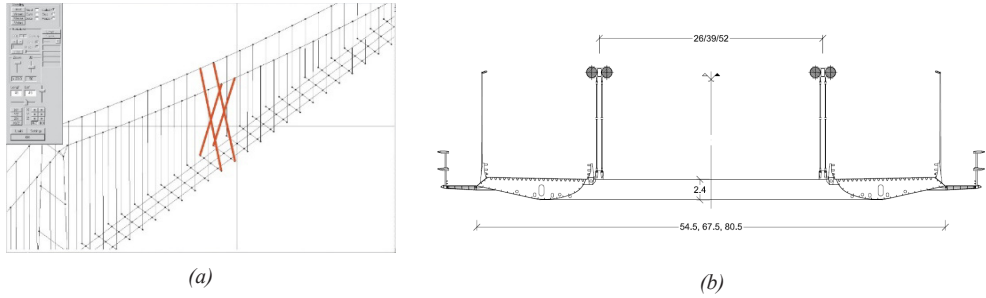


Fig. 7 - Flutter instability acting on structural parameters: Crossed hangers FEM analyses (a) and case study of a twin-box deck (b).

The program evaluates displacements and rotations of the bridge deck at progressively increasing values of  $U$  and records the velocity at incipient flutter when the reference deck vibration amplitude exceeds  $\pm 5^\circ$ .

In addition, the possibility to reduce the torsional frequency to be case of a twin-box suspension bridge with a flexural frequency bigger than the torsional frequency has been investigated. The twin-box deck assumed as a case study is illustrated in Figure 7. The main cables spacing was varied from 54.5 m to 80.5 m and the modal analyses was performed through FEM analyses by using Tenso. Results are listed in Table 2.

Analyses were pushed by using a wind velocity bigger than 100 m/s and the critical flutter velocity did not occurred. The same results were also obtained by (Andersen *et al.*, 2014; Bartoli *et al.*, 2008; Bartoli *et al.*, 2009). Even if the 1<sup>st</sup> torsional-to-1<sup>st</sup> bending frequency ratio is about one in still air, the attainment of the aim against flutter instability is substantially obtained: it is known that the frequency separation is expected to increase under wind as a consequence of the reduction of the torsional frequency and of the slight increase of the vertical bending frequency; consequently, the modes should tend to further separate instead of coupling. The achievement of the aim of flutter-instability suppression is confirmed by the 2<sup>nd</sup> torsional-to-2<sup>nd</sup> bending frequency ratio, that is smaller than one for all the configurations.

Tab. 2 - Twin-box deck suspension bridge structural modal frequencies. Structural parameters:  $B$ =cord deck dimension;  $f_h$  = vertical modal frequency;  $f_a$  = torsional modal frequency.

| Configurations | $b$<br>[m] | Structural Modal frequencies [Hz] |                       |                           |                       |                       |                           |
|----------------|------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
|                |            | 1 <sup>st</sup> $f_h$             | 1 <sup>st</sup> $f_a$ | 1 <sup>st</sup> $f_a/f_h$ | 2 <sup>nd</sup> $f_h$ | 2 <sup>nd</sup> $f_a$ | 2 <sup>nd</sup> $f_a/f_h$ |
| 6              | 54.5       | 0.06074                           | 0.06052               | 0.99                      | 0.08211               | 0.07731               | 0.94                      |
| 7              | 67.5       | 0.06099                           | 0.06077               | 0.99                      | 0.08201               | 0.07720               | 0.94                      |
| 8              | 80.5       | 0.06181                           | 0.06192               | 1.00                      | 0.08197               | 0.07814               | 0.95                      |

### Conclusions

This paper has discussed the flutter instability on twin and multiple box deck suspension bridges varying the box spacing, crossing hangers and acting on the modal flexional and torsional natural frequencies. Results discussed confirmed that the deck aerodynamics affects the flutter instability and that reducing the main cables spacing dimension the ratio between the first torsional and vertical natural frequency increases. Finally, two case studies were discussed: the case of the suspension bridge with hangers crossed and the case of a twin-box deck bridge with the first flexural frequency bigger than the torsional. High critical flutter velocities were estimated using both solutions.

### References

- Andersen M.S., Sahin E., Laustsen B., Lenius M., Læsø J.R. 2014. Implementation of the non-flutter design principle. IN-VENTO 2014, XIII Conference of the Italian Association for Wind Engineering, 22-25 June 2014, Genova, Italy.
- Bartoli G., D'Asdia P., Febo S., Mannini C., Noè S., Procino L. 2009. Innovative configurations for long-span suspension bridges. Proceedings of the 5th European and African Conference on Wind Engineering. Florence, Italy.
- Bartoli G., D'Asdia P., Febo S., Mannini C., Pastò S., Procino L. 2008. Innovative Solutions for long-span suspension bridges. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics Applications.
- De Miranda M. 2016. Long-span bridges. In: *Innovative Bridge Design Handbook, Construction, Rehabilitation and Maintenance* (ed. by A. Pipinaso). Oxford: Butterworth-Heinemann, Ch. 15, 383-425.
- Ge Y.J., Xiang H.F. 2009. Aerodynamic stabilization for box-girder suspension bridges with super-long span. In: *Proceedings of the EACWE 5*, 19th-23rd July, Firenze, Italy.
- Katsuchi H., Jones N.P., Scanlan, R.H. 1999. Multimode coupled buffeting and flutter analysis of the Akashi-Kaikyo Bridge. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 125(1), 60-70.
- Khalil M., Poirel D., Sarkar A. 2016. Bayesian analysis of the flutter margin method in aeroelasticity. *Journal of Sound and Vibration*, 384, 56-74.
- Lin W., Yoda T. 2017. Suspension Bridges. In: *Classifications, Design Loading, and Analysis Methods. Bridge Engineering*, Ch. 11, 195-211.
- Pipinato A. (editor). 2022. *Innovative Bridge Design Handbook Construction, Rehabilitation and Maintenance*. 2<sup>nd</sup> Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sato H., Hirahara N., Fumoto K., Hirano S. *et al.* 2002. Full aeroelastic model test of a super long-span bridge with slotted box girder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 2023-2032.
- Scanlan R.H., Tomko J.J. 1971. Airfoil and bridge deck flutter derivatives. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 97(EM6), 1717-1737.
- Simiu E., Scanlan R.H. 1986. *Wind Effects on Structures*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons.



GIORGIO DIANA, FILIPPO CALAMELLI

*The evolution of super-long span bridge decks,  
from Tacoma to Messina*

*L'evoluzione degli impalcati nei ponti di grandissima luce,  
dal Tacoma al Messina*

*Abstract*

Suspension bridges are the only feasible solution to reach a span length higher than 1.100 m. The impact of turbulent winds on such structures is crucial and may lead to aeroelastic instabilities, i.e. one-degree-of-freedom instabilities or two-degree-of-freedom flutter instabilities. Following the well-known collapse of the Tacoma Bridge in 1940, the design of long-span bridge decks has evolved to address these challenges, resulting in the last decade in the development of the “Messina type” multi-box deck. This paper begins by outlining the primary challenges caused by turbulent wind on suspension bridges, followed by the presentation of the engineering solutions implemented to address them.

*Sommario*

I ponti sospesi sono l'unica soluzione praticabile per raggiungere lunghezze di campata superiori a 1.100 m. L'impatto dei venti turbolenti su tali strutture è significativo e può portare a instabilità aeroelastiche, in particolare instabilità a un grado di libertà o a due gradi di libertà, anche chiamata instabilità di flutter. Dopo il noto crollo del Tacoma Bridge nel 1940, la progettazione degli impalcati di ponti a grande luce si è evoluta per affrontare queste sfide ingegneristiche, portando nell'ultimo decennio allo sviluppo dell'impalcato multi-box di tipo “Messina”. Il presente documento inizia delineando i problemi indotti dal vento turbolento sui ponti sospesi, in seguito vengono presentate le soluzioni ingegneristiche adottate per affrontarli.

*Introduction*

This work aims to describe how super-long span bridge decks have evolved over time, mainly from an aerodynamic point of view. In long-span bridges, the deck is a fundamental component that, with its aerodynamic shapes, influences the maximum span length. We will focus on suspension bridges which, for spans longer than 1.000-1.100 m, represent the only feasible solution. A historical overview regarding

the development of super-long span bridges is presented, mainly focusing on the aerodynamic solutions employed to overcome wind-induced issues.

In 1940, the famous collapse of the Tacoma Bridge led researchers and engineers to investigate the aeroelastic effects on long-span bridges, which before were not considered. The cause of the collapse was identified as a torsional one-degree-of-freedom, 1 d.o.f., instability, which is typical of deck sections characterized by a negative derivative of the moment coefficient with respect to the wind angle of attack. This problem was overcome by designing deck sections with a wing-like shape, i.e. the Humber Bridge or the Great Belt Bridge. Nevertheless, this solution, in the case of spans longer than 1.600 m, can lead to a two-degrees-of-freedom, 2 d.o.f instability, known as flutter instability. Specifically, as the wind speed increases, the frequency of the torsional vibration mode tends to decrease and overlap with that of the corresponding vertical one. When the motions are synchronized, flutter instability is triggered. Therefore, to solve the problem of the flutter instability in the Messina Strait Bridge, featuring a main span 3.300 m long, multi-box deck sections were introduced. These sections are characterized by a significantly lower derivative of the moment coefficient if compared to the single-box ones.

In this paper, wind-induced problems on long-span bridges are initially introduced. Subsequently, the design solutions employed to overcome the aeroelastic problems of suspension bridges are presented, starting with the Tacoma Bridge and ending with the Messina Strait Bridge.

### *Wind-induced problems on bridges*

Turbulent wind blowing on a bridge produces static and dynamic actions. For shorter bridges, i.e. with the main span in the order of 100 m or less, wind-induced effects are typically not critical. However, as the span length increases, the bridge motion caused by wind becomes more and more significant. To deeply investigate the response of a long-span bridge subjected to turbulent wind, it is necessary to define the aerodynamic forces on all its components, i.e. deck, towers, cables and hangers. However, the deck is the most sensitive part to the wind action and consequently, this section will focus on analyzing the aerodynamic forces acting on this component. The static loads acting on a bridge deck are due to the mean wind speed. These loads are a function of the deck aerodynamic coefficients and of the wind angle of attack. On the other hand, the dynamic effects are related to the turbulence of the incoming wind, also known as buffeting response, and to the aeroelastic forces induced by the motion of the deck itself. The variation of these latter can modify the structural properties of the bridge, potentially leading to aeroelastic instability phenomena. Several kinds of instability may arise, including 1 d.o.f. instabilities in the vertical or torsional direction as well as 2 d.o.f. resulting from the coupling of vertical and torsional motions, commonly called flutter instability. Finally, also Vortex-Induced Vibrations-VIV can be crucial for the design of long-span bridges.

*Static actions*

As previously mentioned, the mean wind speed generates a static load applied to all the elements of the bridge, i.e. deck, towers, cables and hangers. For long-span bridges, the static force on the deck is the most relevant one. It is transmitted to the towers passing through the hangers and cables leading to a bending moment that can potentially affect the design of the structure. Therefore, to reduce the load at the top of the towers, the deck shape should be optimized to keep the drag coefficients as small as possible.

*Dynamic actions: the Quasi-Steady Theory*

The Quasi-Steady Theory-QST is a non-linear analytical method to predict the aerodynamic forces on a bridge deck as a function of its motion and wind turbulence. This approach correctly reproduces the wind action only if the reduced velocity is higher than 20-25. The reduced velocity is a key parameter to understand the physics of the interaction between the wind and the deck motion. It is defined as:

$$V^* = \frac{U}{f \cdot B} \tag{1}$$

with  $U$  mean wind speed,  $f$  vibration frequency and  $B$  deck chord.  $V^*$  can be interpreted as the ratio between the period of oscillation of the structure, i.e.  $T = 1/f$ , and the time  $B/U$  required for a fluid particle to cross the deck. High values of  $V^*$  mean that the aerodynamic forces are computed using the static aerodynamic coefficients and, as wind speed input, the relative velocity with respect to the deck motion as in Figure 1.

The ‘‘Corrected’’ Quasi-Steady Theory-CQST was introduced by Diana *et al.* (1995) to properly take into account the deck angular velocity. Referring to an iso-

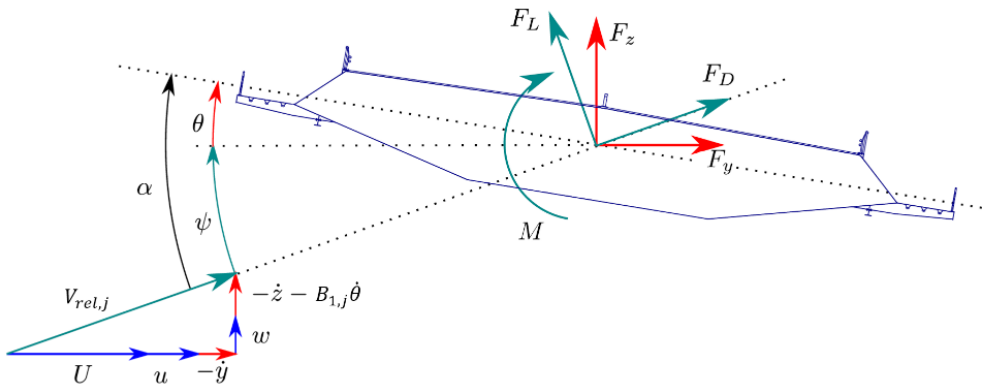


Fig. 1 - Sign convention.

lated deck section of length  $L$  characterized by three degrees of freedom, i.e. lateral  $y$ , vertical  $z$  and torsion  $\theta$ , see Figure 1, the CQST formulation of the aerodynamic forces is as follows:

$$\begin{aligned} D(t) &= \frac{1}{2} \rho B L [V_{\text{rel},D}(t)]^2 C_D [\alpha_D(t)] \\ L(t) &= \frac{1}{2} \rho B L [V_{\text{rel},L}(t)]^2 C_L [\alpha_L(t)] \\ M(t) &= \frac{1}{2} \rho B^2 L [V_{\text{rel},M}(t)]^2 C_M [\alpha_M(t)] \end{aligned} \quad (2)$$

with  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$  respectively drag, lift, and pitch moment coefficients  $\rho$  air density,  $V_{\text{rel},j}$  instantaneous relative wind velocity and  $\alpha_j$  instantaneous angle of attack. The  $j$  index, with  $j = D, L, M$ , is introduced in the notation since the CQST takes into account, in the formulations of the relative velocity and the angle of attack, different values of  $B_{1,j}$  for the drag, lift and moment aerodynamic forces. Specifically:

$$\begin{aligned} V_{\text{rel},j}^2 &= \left( U + u - \dot{y} \right) + \left( w - \dot{z} - B_{1,j} \dot{\theta} \right)^2 \\ \alpha_j &= \theta + \psi_j = \theta + \tan^{-1} \left( \frac{w - \dot{z} - B_{1,j} \dot{\theta}}{U + u - \dot{y}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

with  $\alpha_j$  angle of rotation of  $V_{\text{rel},j}$  with respect to the horizontal.  $u$  and  $w$  are the longitudinal and the vertical components of the incoming turbulent wind. The values of  $B_{1,j}$  are identified from the flutter derivatives at high  $V^*$  (Diana *et al.*, 2015). From the formulation reported above it is possible to note that the aerodynamic forces on a bridge deck section are a function of the incoming turbulence, i.e. buffeting contribution, and of the deck motion, i.e. self-excited contribution. Moreover, it is necessary to define the static aerodynamic coefficients, which are typically identified with wind tunnel tests on deck sectional models, see Figure 2.

### *One-degree-of-freedom aerodynamic instabilities*

As mentioned in the previous section, the motion of the deck generates aeroelastic forces which can modify the structural properties of the bridge, leading to potential aeroelastic instabilities. The latter are governed by the derivatives, with respect to the angle of attack  $\alpha$  of the lift and moment coefficients. When the lift derivative is negative, aeroelastic forces tend to reduce the damping related to the structure's vertical motion. Therefore, when the total damping, i.e. structural damping + aero-

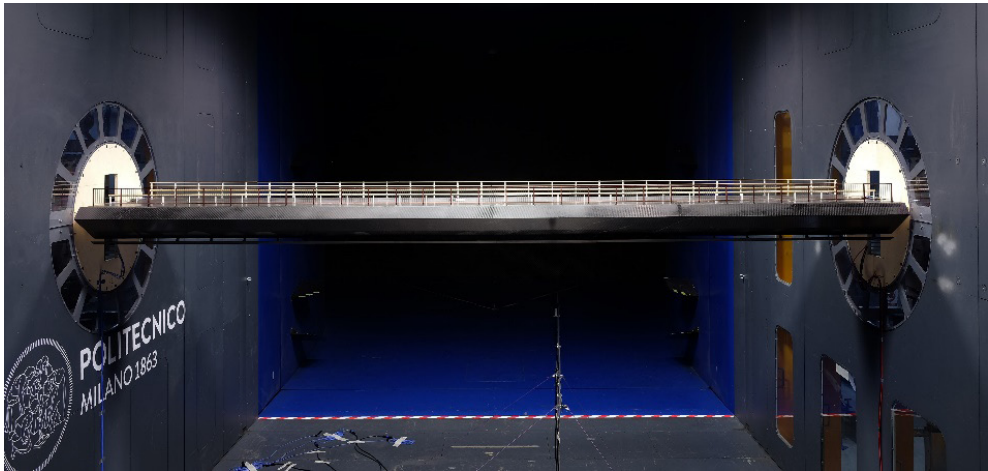


Fig. 2- Example of deck sectional model: Gjemnessund Bridge, Norway (Andersen *et al.*, 2022) in the high-speed test section of Politecnico di Milano

dynamic damping, is negative, energy is introduced into the system and an instability condition is generated. The mean wind speed at which the system is unstable is called the critical velocity. The same 1 d.o.f. instability can occur torsionally if the derivative of the moment coefficient is negative.

#### *Two-degrees-of-freedom aerodynamic flutter instability*

Flutter instability is characterized by the coupling of the bridge's vertical motion with the torsional one. The frequencies of the latter, which in the absence of wind are greater than the vertical ones, tend to become equal due to the aeroelastic forces. The two motions become synchronized leading to the introduction of energy into the system, ultimately resulting in a flutter instability. Also in this case the phenomenon is governed by the derivative of the moment coefficient with respect to the effective angle of attack  $\alpha$ . Specifically, in case of positive value, which is needed to avoid 1 d.o.f. instabilities as previously stated, the aeroelastic forces tend to reduce the overall torsional stiffness and thus, the related frequency of motion. Since in long-span bridges the torsional frequency is physiologically higher than the corresponding vertical one, when they become closer one to each other flutter instability is triggered.

Flutter instability is one of the most important problems that affect very long-span bridges since, increasing the span length, the ratio between the torsional modal frequencies and the corresponding vertical ones decreases, see Figure 3. Therefore, the wind speed at which the modes synchronize reduces significantly as the length of the span increases. The stability of a long-span bridge can be investigated experimentally in the wind tunnel employing an elastically suspended deck sectional

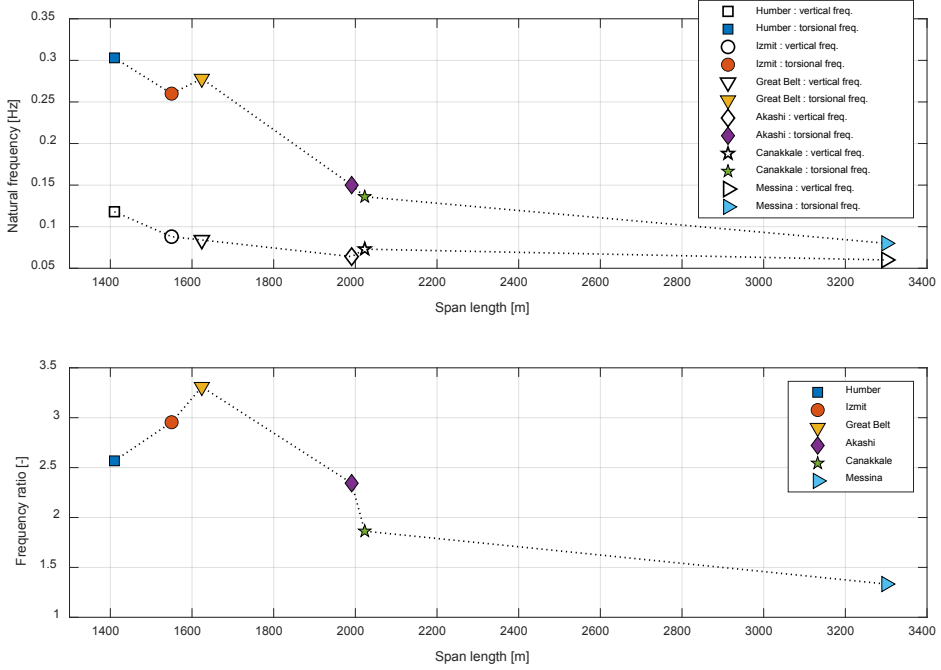


Fig. 3- Torsional and vertical frequencies of different suspension bridges as a function of the span length.

model. Alternatively, numerical methods based on finite element models of the structure can be employed (Diana *et al.*, 2022). These algorithms require the knowledge of the aerodynamic properties of the bridge deck.

#### Vortex-Induced-Vibrations-VIV

Vortex shedding is a phenomenon wherein vortices are alternatively shed from a bluff body immersed in a fluid flow. The detachment frequency  $f_s$  is related to the body dimension, e.g. the chord  $B$  in the case of a bridge deck section, and the mean wind speed  $U$  by the Strouhal relation:

$$f_s = St \frac{U}{B} \quad (4)$$

where  $St$  is the Strouhal number, which depends on the body shape. For a structure immersed in a wind flow, such as a long-span bridge, when  $f_s$  aligns with a natural frequency, resonance amplification of the motion can occur. Once the deck, which is the most sensitive part of the bridge to VIV, starts to vibrate, the value of  $f_s$ , in Eq.

(4), does not change even if the wind speed is varying. Specifically, vortex shedding becomes synchronized with the deck motion, increasing the amplitude of vibration even if the wind speed is changed due to turbulence. This effect is called lock-in. The vibration amplitude induced by vortex shedding depends on the structural damping or, more specifically, on the Scruton number  $Sc$ :

$$Sc = 2\pi \frac{m\zeta}{\rho B^2} \quad (5)$$

where  $m$  is the linear mass of the structure and  $\zeta$  is the damping ratio. An increase of  $Sc$  results in a decrease in the amplitude of oscillations. Concerning long-span bridges, VIV is an important issue for both towers and deck. In the first case, vortex shedding can induce high amplitudes of vibration during the construction stage, when the towers are standalone. As for the deck, VIV represents one of the most important aspects in the design of the section geometry. VIV is typically investigated by performing wind tunnel tests on elastically suspended deck sectional models (Diana *et al.*, 2015).

#### *Historical overview of suspension bridges*

Bridges are classified as long-span bridges when the main span is longer than 1.000 m. Approximately up to 1.100 m a bridge can be realized using a “cable-stayed” technology while, for greater lengths, the only feasible solution is a suspension bridge. The development of suspension bridges was boosted in the first decades of the nineteenth century by an improvement in the materials properties and in the technological skills. Built in 1931, The George Washington Bridge has a main span 1.067 m long. This length made it one of the longest bridges of its time and a milestone in the history of these structures. After 6 years the iconic Golden Gate Bridge was built in San Francisco with a higher span length, i.e. 1.280 m. Subsequently, throughout the 19th century, several bridges with a span ranging from 1.200 m to 1.400 m were built. A significant step was made in 1998 with the construction of the Akashi Bridge, characterized by a length of 1,991 m. Currently, the longest suspension bridge is the Çanakkale Bridge with a main span of 2023 m, in Turkey. A third impressive jump in the span length increase is represented by the definitive design of the Messina Strait Bridge. The bridge is completely designed and ready to be built. It will be the longest suspension bridge in the world with a span length 1.5 times longer than the Akashi Bridge.

As mentioned in the previous sections, wind-induced effects on bridges are enhanced by increasing the span length. However, at the beginning of the 19<sup>th</sup> century, aeroelastic phenomena were not known. The well-known collapse of the Tacoma Bridge (1940), which occurred the same year as its inauguration, prompted designers to investigate the problem of aeroelastic effects on bridge decks, leading to the

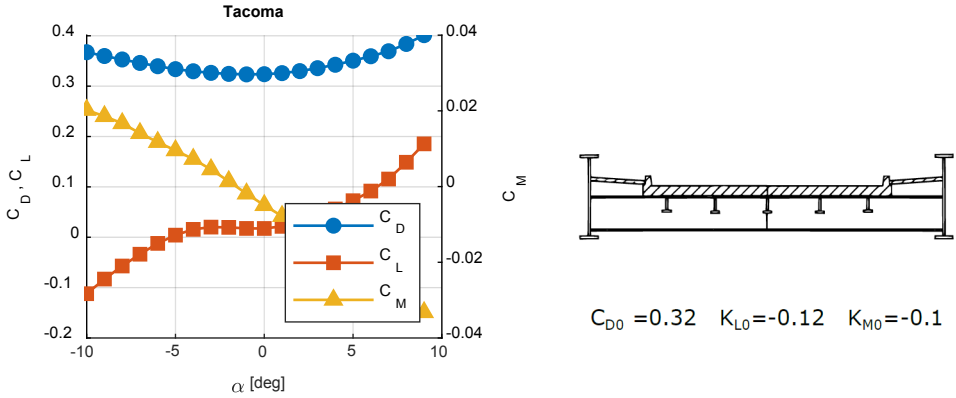


Fig. 4- Drag, lift and moment coefficient of the Tacoma Bridge as a function of the wind angle of attack, on the left, and the deck section profile of the Bridge, on the right.

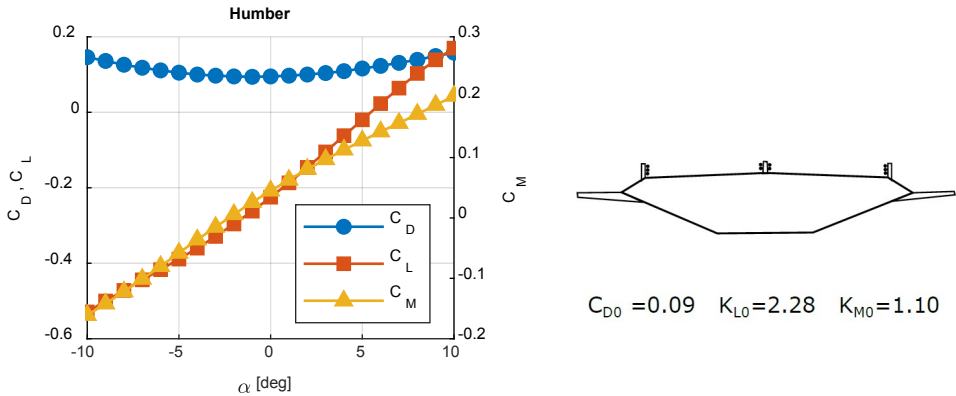


Fig. 5 - Drag, lift and moment coefficient of the Humber Bridge as a function of the wind angle of attack, on the left, and the deck section profile of the Bridge, on the right.

identification of the collapse cause as a one-degree-of-freedom instability, mainly torsional. As previously mentioned, this phenomenon is typical of bridge deck sections characterized by a negative derivative of the moment coefficient with respect to the effective angle of attack  $\alpha$ . As shown in Figure 4, this is a feature of the Tacoma Bridge deck section.

To address the problem, deck sections were developed employing profiles resembling wings, see for instance the Humber Bridge, in Figure 5, or the Great Belt Bridge. This type of deck is still widely used for the design of suspension bridges with spans up to 1.600 m such as, for instance, the Hardanger Bridge in Norway (Fenerci *et al.*, 2017). In Figure 5 it can be seen that the lift and moment coefficients



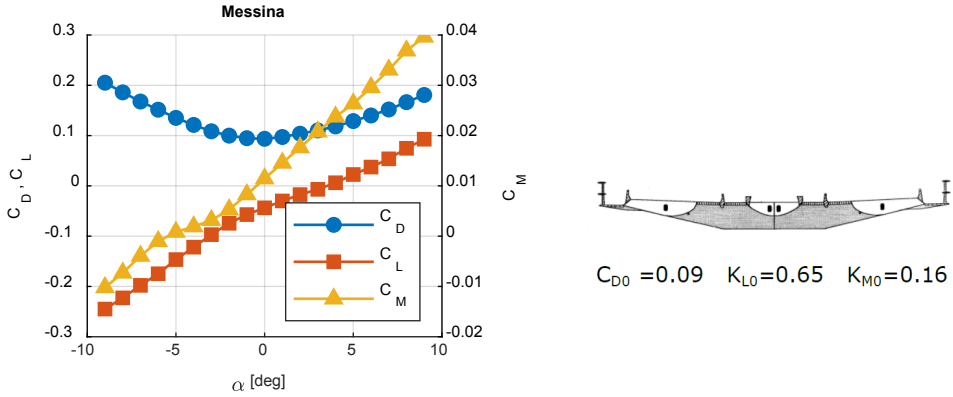


Fig. 6 - Drag, lift and moment coefficient of the Messina Strait Bridge as a function of the wind angle of attack, on the left, and the deck section profile of the Bridge, on the right.

of the Humber Bridge are characterized by positive lift and moment derivatives. In this way, it is possible to avoid 1 d.o.f. instabilities.

Nevertheless, these deck sections are subjected to flutter instability. As previously mentioned, the high value of the derivative of the moment coefficient with respect to the angle of attack acts as negative torsional stiffness, reducing the frequency of the first torsional mode. As this frequency approaches that of the corresponding vertical mode, it leads to flutter instability. As shown in Figure 3, increasing the bridge span length, the torsional frequency gets closer to the vertical one, and thus, aerodynamic forces need a lower wind speed to trigger the instability.

In the design of the Messina Strait Bridge, the key point to reach a span length of 3.300 m is the multi-box girder deck, internationally identified as the “Messina-type” (Brancaleoni *et al.*, 2009). This section is characterized by significantly lower derivatives of the lift and moment coefficients with respect to those of a single-box section, as can be seen comparing Figure 6 and Figure 5. If a “Humber-type” deck were used for the Messina Strait Bridge, the critical flutter speed would be reduced to 40 m/s. Research conducted for the development of the multi-box girder deck solution contributed to the construction of the Çanakkale Bridge in Turkey.

Also, VIV represents one of the most important aspects in the design of the section geometry. Single-box decks generally show only one mechanism of vortex shedding, caused by the separation of the flow from the upstream edge. On the other hand, multi-box deck sections may present different vortex-shedding phenomena due to the interaction of the wake generated by the upwind box with the other boxes. The different mechanisms may excite the bridge’s vertical and torsional modes. Furthermore, also wind barriers or other obstacles placed along the edge of the deck can trigger vortex shedding.

### *Conclusions*

This paper presented a journey through the history of suspended bridges' aerodynamics. At first, the main wind-induced problems were introduced, including 1 d.o.f. instabilities, flutter instability and VIV. Subsequently, the most iconic suspension bridges were presented from the point of view of deck aerodynamics, starting with the famous collapse of Tacoma Bridge and ending with the Messina Strait Bridge, characterized by a main span 3.300 m long. The key point to achieve this length lies in the multi-box deck section, characterized by very low values of the derivatives of the lift and moment coefficients. The research on the "Messina-type" deck solution contributed to the construction of the Çanakkale Bridge in Turkey, which is currently the longest suspension bridge in the world and to the design of other long-span bridges that are under construction.

### *Bibliography*

- Andersen M.S., Isaksen B., Hansen S.O. 2022. Full-Scale Monitoring of the Wind Field, Surface Pressures and Structural Response of Gjemnessund Suspension Bridge. *Structural Engineering International*, 32, 43-54.
- Brancaleoni F., Diana G., Faccioli E., Fiammenghi G., Firth I.P.T., Gimsing N.J., Jamiolkowski M., Sluszkowski P., Solari G., Valensise G., Vullo E. 2009. *The Messina Strait Bridge*. Boca Raton: CRC Press.
- Diana G., Falco M., Bruni S., Cigada A., Larose G.L., Damsgaard A., Collina A. 1995. Comparisons between wind tunnel tests on a full aeroelastic model of the proposed bridge over Stretto di Messina and numerical results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54, 101-113.
- Diana G., Falco M., Bruni S., Cigada A., Larose G.L., Damsgaard A., Collina A. 2015. Wind tunnel: a fundamental tool for long-span bridge design. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11, 533-555.
- Diana G., Stoyanoff S., Allsop A., Amerio L., Styrk Andersen M., Argentini T. 2022. IABSE Task Group 3.1 Benchmark results. Numerical full bridge stability and buffeting simulations. *Structural Engineering International*, 33(4), 623-634.
- Fenerci A., Øiseth O., Rønnquist A. 2017. Long-term monitoring of wind field characteristics and dynamic response of a long-span suspension bridge in complex terrain. *Engineering Structures*, 147, 533-555.





The evolution of super-long span bridge decks, from Tacoma to Messina















FABIO BRANCALEONI

*Le strutture del ponte sullo Stretto,  
dalle prime proposte al progetto definitivo*

*The structures of the bridge on the Strait,  
from the first proposals to the final design*

*Sommario*

Per un ponte sospeso di grande luce la concezione nasce dalla conformazione dell'impalcato e dal suo comportamento aeroelastico. In questo lavoro viene illustrata dal punto di vista strutturale l'evoluzione delle soluzioni sviluppate per il progetto dell'attraversamento dello Stretto di Messina con un ponte sospeso di campata centrale di 3300 m di luce a partire dagli anni '70 del secolo scorso sino al progetto definitivo del 2011. Vengono poi descritte le soluzioni per le altre componenti dell'opera, in particolare sistema di sospensione e torri, per concludere con un cenno su alcuni altri aspetti innovativi introdotti e perfezionati nello stesso periodo.

*Abstract*

The conception of a long span suspension bridge stems from the configuration of the deck and from its aeroelastic behaviour. The present paper describes from a structural standpoint the evolution of the solutions developed for the Messina Strait with a 3300 m main span suspension bridge from the Seventies of the past century to the final design of 2011. The solutions for the other main bridge components are subsequently illustrated, with the suspension system and the towers, to conclude with a brief overview of some innovative aspects progressively introduced in the same period.

*Introduzione*

La chiave per la fattibilità di un ponte sospeso di grande luce è la stabilità aerodinamica, con l'impalcato che costituisce l'elemento sul quale si esplicano le maggiori azioni del vento e che è quindi a questo fine determinante (Gimsing, 2012). La conclusione che per il complesso ambiente dello Stretto di Messina la scelta per un attraversamento stabile fosse un ponte sospeso a campata unica di 3300 m di luce fu raggiunta dopo venti anni di studi nel 1990 (Brancaleoni *et al.*, 2009) e fu accompagnata da un lungo processo di sviluppo di soluzioni per l'impalcato di un ponte che avrebbe avuto più del doppio della luce massima del più grande allora esistente.

Al tempo, infatti, il ponte più grande del mondo era il Giovanni da Verrazzano negli Stati Uniti, del 1964, con 1298 m di luce, per divenire nel 1981 il ponte sull'Humber, nel Regno Unito, con 1410 m di luce. A fine anni Ottanta iniziò poi la costruzione del ponte sullo stretto dell' Akashi, in Giappone, che sarebbe stato completato nel 1998 con una luce centrale di 1991 m e soltanto nel 2022 si sarebbero superati i 2 km con il ponte 1915 sui Dardanelli, in Turchia, con 2023 m di luce centrale.

La prima parte di questo lavoro è dedicata alla esposizione della evoluzione che nel periodo che va dagli anni '70 del secolo scorso al 2011, anno in cui è stato completato il progetto definitivo del ponte sullo Stretto, hanno avuto le soluzioni progressivamente studiate per l'impalcato, delle quali vengono sottolineati soprattutto gli aspetti di comportamento strutturale, funzionale e costruttivo.

Nel seguito sono in modo analogo esposte le configurazioni per le altre componenti della sovrastruttura, ossia il sistema di sospensione e le torri, che a quella dell'impalcato conseguono. Se infatti l'impalcato è, nel comportamento strutturale globale dominato dai cavi principali, un elemento secondario, è però quello cui sono applicati i carichi più significativi: in primo luogo il suo stesso peso, poi il traffico stradale e ferroviario e, soprattutto, le azioni del vento.

Infine, si affrontano alcuni fra i diversi aspetti specifici e innovativi introdotti nel progetto per delle componenti dimensionalmente minori ma di grande importanza. Ci si riferisce in particolare a giunti di espansione e sistema dei vincoli.

### *L'impalcato del ponte*

Nel fervore tecnico e scientifico seguito al crollo del ponte di Tacoma Narrows nel 1940 è stato presto compreso come una delle possibilità per migliorare la stabilità aerodinamica dei ponti fosse il ridurre e regolare le azioni del vento sugli impalcati. Questo in alternativa alla concezione più classica, pur valida sino a certe luci, di aumentarne la rigidità con impalcati reticolari di notevole dimensione.

Furono quindi, fin dagli anni Cinquanta, proposte diverse idee volte a permettere il passaggio di flussi d'aria attraverso l'impalcato rendendolo in parte "trasparente", in un primo periodo con approcci certamente rozzi, anche se di qualche efficacia. Si vedano ad esempio i grigliati introdotti per l'impalcato del ponte 25 de Abril sul Tago in Portogallo del 1966, i molti studi condotti per il ponte sull' Akashi (Brancaleoni *et al.*, 2009) e poi non adottati per tornare a una soluzione reticolare, nonché i grigliati introdotti nel 1956 nel quadro della riabilitazione del ponte storico di Wheeling sul fiume Ohio negli Stati Uniti, (Cuddy, 1999).

In questo quadro, i primi schemi per garantire la stabilità aerodinamica per la campata unica sullo Stretto derivarono dal concetto di *vented deck*, che vedeva impalcato a cassone alare a lastra ortotropa (Brown *et al.*, 1975), quali quello della prima applicazione nel 1966 per il ponte sul Severn, trasformati in una successione di piccoli cassoni sempre in acciaio, con interposte larghe aperture chiuse da grigliati.

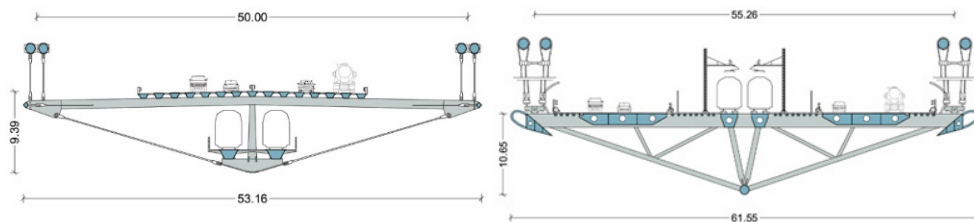


Fig. 1 - Impalcato per il ponte a campata unica: configurazione degli anni '70, a sinistra, e degli anni '80, a destra.

Nella configurazione degli anni '70 per il ponte sullo Stretto, in Figura 1, sono presenti un livello superiore per le vie di corsa stradali con numerosi cassoncini e interposti grigliati e un livello inferiore per i due binari, mensole di collegamento al sistema di sospensione e funi di irrigidimento del sistema (Gruppo Ponte Messina, 1979).

Tale soluzione mostrò eccellenti caratteristiche di stabilità aerodinamica, presentando tuttavia numerosi aspetti non soddisfacenti. Primo, la complessità costruttiva, con i molti elementi che avrebbero necessitato di giunzioni complesse. Non ottimale poi lo sfruttamento dei materiali, con i cassoncini della piattaforma stradale portati dai trasversi e non in essa integrati, nonché con un doppio livello che rende significativa l'area esposta al vento e quindi la associata componente di spinta, argomento sul quale si tornerà a proposito delle torri. La marcia su grigliati alternati a zone piene è poi di scarsa qualità sia in termini di comfort che di sicurezza.

Provata la fattibilità e la stabilità aerodinamica, venne intrapreso un percorso di miglioramento e di introduzione di ulteriori concetti e soluzioni, con un primo passo compiuto a inizio anni Ottanta, sempre in Figura 1. In questa soluzione vengono introdotte diverse innovazioni: i numerosi cassoni vengono integrati nei trasversi e uniti in quattro soltanto, due per le carreggiate stradali e due per la piattaforma ferroviaria che, visti gli spazi disponibili, viene portata sullo stesso livello. Rimangono i grigliati soltanto per le corsie di sosta e di servizio e rimane una importante struttura reticolare tridimensionale di irrigidimento, connessa a un processo di comprensione del comportamento dell'opera che non aveva ancora completamente abbandonato concetti classici di *stiffening girder*. Sono anche presenti due elementi che saranno molto importanti e che subiranno una successiva profonda evoluzione e ottimizzazione: gli schermi perforati per la protezione dei veicoli dagli effetti diretti del vento e i grandi profili alari esterni sul piano impalcato, per una più razionale canalizzazione dei flussi e per introdurre smorzamento aerodinamico aggiuntivo. Sulla base di questa configurazione venne redatto il rapporto di fattibilità da parte della società pubblica Stretto di Messina S.p.A. (Stretto di Messina, 1986).

Il processo di sviluppo di soluzioni più efficaci progredì comunque in parallelo agli studi di fattibilità. Un aspetto importante fu la comprensione, raggiunta già negli

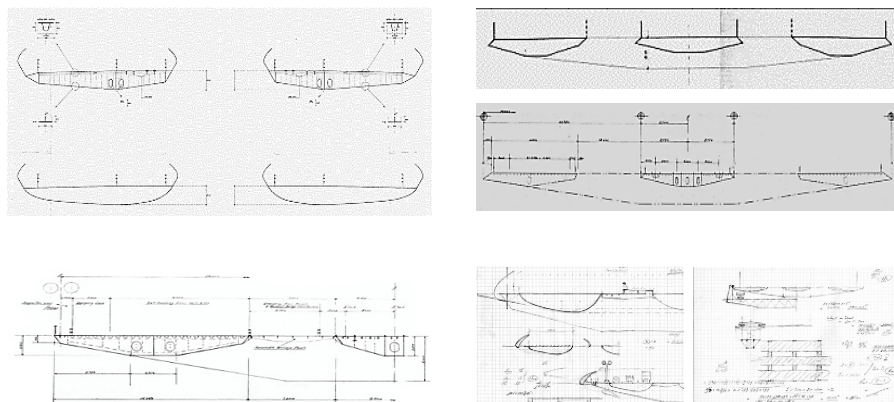


Fig. 2 - Schizzi di sviluppo per la soluzione di impalcato elaborata negli anni '80 (cortesia di Mrs. Celia Brown e disegni dell'autore).

anni '70 ma pienamente esplicitata soltanto successivamente, del fatto che la rigidità geometrica dei cavi principali era tanto alta da garantire di per sé eccellenti prestazioni di servizio (Brancaleoni, 1979). Ottenuta la stabilità aerodinamica tramite l'aerodinamica dell'impalcato, questo rendeva del tutto superflua la presenza di una struttura irrigidente, che poteva essere eliminata.

Furono poi ulteriormente uniti fra loro i cassoni, studiando soluzioni a due cassoni, ciascuno con una carreggiata stradale e un binario posto all'interno. Questa configurazione, interessante dal punto di vista strutturale, risultò non adeguata come deformabilità rotazionale, con pendenze trasversali eccessive, e si fu costretti ad abbandonarla: viene oggi ampiamente ripresa per ponti solo stradali. Si concluse quindi che la piattaforma ferroviaria dovesse essere collocata sull'asse dell'opera, evitando eccentricità eccessive dei carichi associati: quindi tre cassoni, due esterni stradali e uno centrale ferroviario, collegati al sistema di sospensione da grandi trasversi pure a cassone. Di questo periodo di grande fervore intellettuale sono una minima testimonianza alcuni degli schizzi di sviluppo, mostrati in Figura 2.

Una volta presa nel 1990 la decisione finale per la soluzione a campata unica, i concetti sopra delineati furono alla base di una prima soluzione preliminare di impalcato a tre cassoni, ancora poco perfezionata sia nei dettagli che nella progettazione aerodinamica, che fu poi sviluppata in modo molto più approfondito e più sofisticato nel progetto di massima del 1992, uno dei passi fondamentali nella storia del progetto, in Figura 3 (Brancaleoni, 1993; Brown, 1996). I cassoni sono ora arrotondati e studiati in galleria del vento per ottimizzare il passaggio dei flussi, la struttura è più funzionale e leggera, gli schermi di protezione dagli effetti del vento sono configurati in modo da ridurre la spinta del vento pur conservando la loro efficacia, i

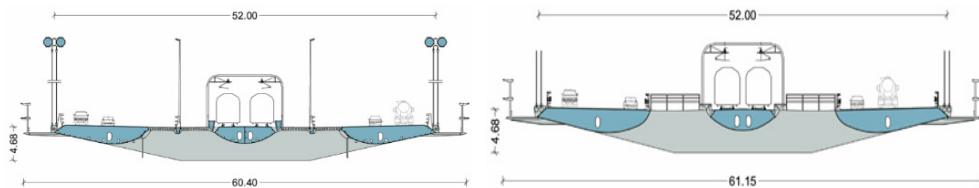


Fig. 3 - L'impalcato nel progetto di massima del 1992, a sinistra, e nel progetto a base della gara di appalto del 2003, a destra.

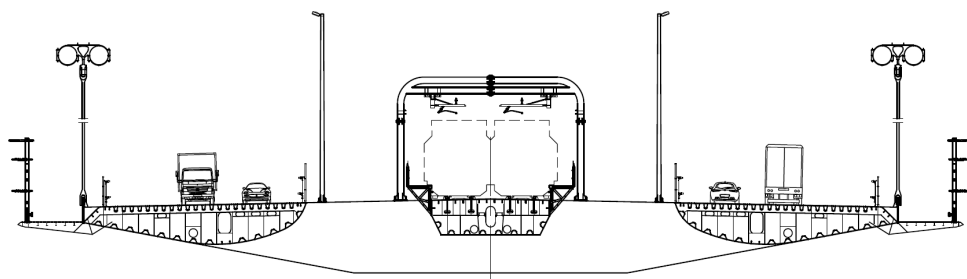


Fig. 4 - L'impalcato nel progetto definitivo del 2011.

profili alari, più piccoli e sdoppiati, sono integrati con i frangivento. Restano ancora i grigliati per le corsie di sosta e di servizio.

Il progetto del 1992 fu nel 2002-2003 sviluppato in progetto per gara di appalto, conservando la concezione generale ma con una decisione importante: non si ritenne accettabile la presenza di grigliati per le corsie di sosta, quindi i cassoni stradali furono leggermente allargati, il numero delle corsie di marcia ridotto da tre a due e l'intera carreggiata stradale collocata su superfici continue, con i grigliati presenti sulle sole corsie esterne di servizio, come mostrato in Figura 3. Su questa base venne sviluppato il progetto definitivo del ponte del 2011, raggiungendo la configurazione di Figura 4. Fra le modifiche, una variazione di forma dell'intradosso del cassone ferroviario, introdotta per risolvere un potenziale problema di distacco di vortici, e l'aumento da due a tre dei profili alari integrati nei frangivento, per un ulteriore miglioramento delle prestazioni aerodinamiche.

### *Il sistema di sospensione*

Si è già detto che il sistema di sospensione dà all'opera sia capacità portante che rigidità globale, con l'impalcato che ha in questo senso un ruolo relativamente secondario. È tuttavia l'impalcato, con il suo peso e i carichi applicati da traffico, a determinare le dimensioni dei cavi portanti principali. Una quantificazione di questo



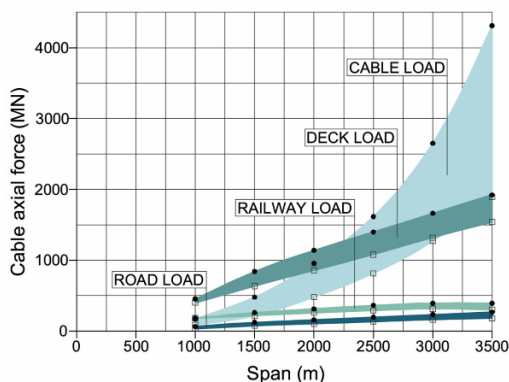


Fig. 5 - Sforzo assiale nei cavi portanti determinato da diverse componenti di carico verticale (Brancaleoni *et al.*, 2009).

concetto è riportata in Figura 5 (Brancaleoni *et al.*, 2009), che mostra in funzione della luce lo sforzo assiale nei cavi principali indotto dalle diverse componenti di carico statico verticale: il peso dell'impalcato, i carichi da traffico stradali e ferroviari e il peso proprio dei cavi. Il contributo dell'impalcato è il più significativo per luci relativamente piccole, attorno ai 1000 m, seguito dai carichi ferroviari e stradali. Al crescere della luce i contributi dell'impalcato e dei carichi da traffico crescono sì, ma in modo pressoché lineare, mentre quello del peso proprio dei cavi cresce in modo ben più che lineare. Nel campo di applicazione di interesse, si vede che attorno a 2500 m di luce il contributo dei cavi eguaglia quello dell'impalcato, per poi superarlo. Questo dato, letto in senso inverso, mostra che ogni elemento di peso sull'impalcato, strutturale o meno, comporta un peso ben maggiore nei cavi portanti.

Per una fattibilità dell'opera, economica e, come vedremo, non solo, occorre quindi che l'impalcato sia il più leggero possibile, per limitare non tanto il suo stesso peso, ma quello dei cavi portanti, che divengono la componente quantitativamente preponderante del ponte. Questo è quello che viene spesso indicato come uno degli effetti di scala nel comportamento dei ponti sospesi di grandissima luce (Brancaleoni *et al.*, 2009). Un aspetto quindi che, nello sviluppo delle soluzioni di impalcato descritto al paragrafo precedente, si rivelò di importanza fondamentale è la ricerca della massima leggerezza ed efficienza strutturale, per la quale la soluzione del 1992 mostra caratteristiche enormemente migliori rispetto a quelle antecedenti, come evidenziato in Tabella 1. Le quantità sostanzialmente identiche del progetto di massima del 1992 e del progetto definitivo del 2011 corrispondono poi a prestazioni decisamente superiori soprattutto in termini di effetti locali e di comportamento a fatica.

Per quel che riguarda la configurazione dei cavi principali si ricorda, senza voler entrare in dettaglio, che l'obiettivo è la realizzazione in sito di grandi fasci di fili

Tab. 1 - Peso dell'acciaio delle diverse componenti della sovrastruttura nella progressiva evoluzione del progetto.

| Componente      | Peso della componente [t] |               |               |               |
|-----------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                 | Progetto 1986             | Progetto 1990 | Progetto 1992 | Progetto 2011 |
| Impalcato       | 129 000                   | 87 000        | 70 500        | 70 000        |
| Cavi principali | 275 000                   | 202 000       | 166 000       | 170 000       |
| Torri           | 220 000                   | 169 000       | 108 000       | 110 000       |

paralleli, ad alta resistenza, di diametro di poco superiore ai 5 mm, zincati a caldo. Le tecniche possibili per la messa in opera sono la tessitura filo a filo, l'*aerial spinning*, o la messa in opera di funi prefabbricate a fili paralleli, i *prefabricated parallel wire strands*-PPWS (Gimsing, 2012; Brancaleoni, 2024).

Per un ponte di queste dimensioni l'area totale dei cavi è estremamente significativa e una configurazione con due soli cavi portanti avrebbe portato ad un diametro assai maggiore di quanto mai realizzato in precedenza, con potenziale complessità costruttiva, in particolare per le operazioni di compattazione, e con dimensioni e sforzi estremamente importanti nelle selle e nei pettini di deviazione. Sia nel progetto di massima del 1992, basato sulla tecnica dello *aerial spinning*, che per quello del 2011, basato invece su funi prefabbricate, si scelse pertanto di avere due coppie di cavi portanti, in Figura 6, con la Tabella 2 che fornisce alcune delle caratteristiche più significative del secondo.

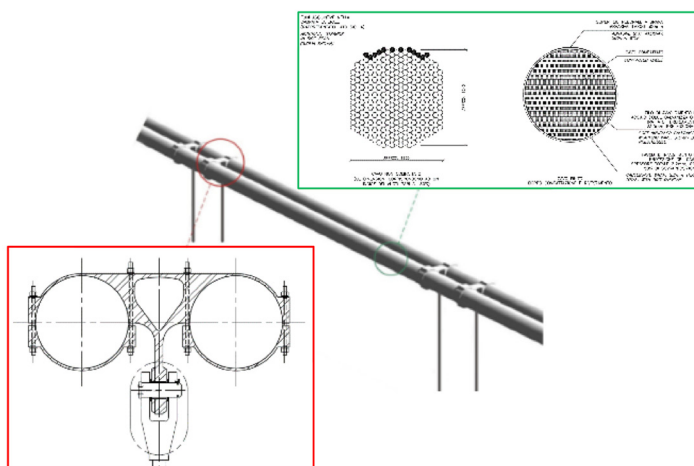


Fig. 6 - I cavi principali nel progetto definitivo del 2011.

Tab. 2 - Principali caratteristiche dei cavi principali, progetto definitivo del 2011.

| Numero   | Diametro [mm]<br>ciascuno | n. PPWS,<br>ciascuno | Fili<br>per fune | Diametro<br>fili [mm] | Classe acciaio<br>(MPa) |
|----------|---------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| 2 coppie | 1 260                     | 349                  | 127              | 5.4                   | 1860                    |

### Le torri

Per dimensioni e sismicità della zona le torri del ponte non possono essere che di acciaio, con soluzioni di calcestruzzo ad alta resistenza che trovano efficace applicazione in altri contesti e per altre luci. Come azione che ne determina il progetto, oltre all'elevatissimo carico verticale, va annoverata la spinta trasversale del vento, che si esplica principalmente sull'impalcato e che viene trasmessa alle torri con un meccanismo pendolare: sotto la spinta del vento l'impalcato si sposta, i pendini si inclinano e la componente orizzontale del loro sforzo assiale si trasferisce ai cavi, che a loro volta si spostano inclinandosi e la trasferiscono alla sommità delle torri. Impalcato di grandi dimensioni e forme tozze ricevono spinte elevate e provocano un altrettanto elevato impegno strutturale delle torri, tanto da richiedere spesso l'introduzione di crociere di controvento, di montaggio complesso e con quantità di acciaio significative. Impalcato a cassone a lastra ortotropa consentono invece configurazioni a telaio, più semplici e con minori quantità di materiale. Come esempi di queste due classi nella Figura 7 sono mostrate le torri del ponte sull' Akashi e del ponte Osman Gazi sulla baia di Izmit, assieme ai loro impalcato.

Per il ponte sullo Stretto le soluzioni di impalcato degli anni '70 erano di peso considerevole e di significativa superficie esposta alla azione del vento, con coefficienti di spinta importanti. Volendo evitare le complesse strutture di controvento di cui si è detto, fu sviluppata una soluzione a doppia A, in Figura 8, schema elegante a

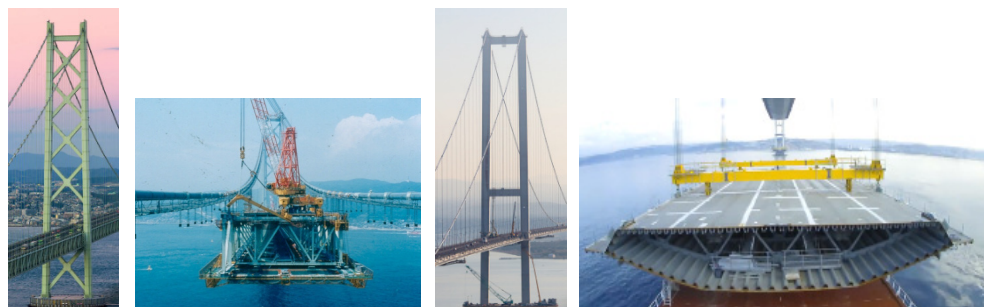


Fig. 7 - Impalcato reticolari o impalcato alari e le conseguenze sulle torri: gli esempi del ponte sull' Akashi, a sinistra, e del ponte Osman Gazi, a destra..

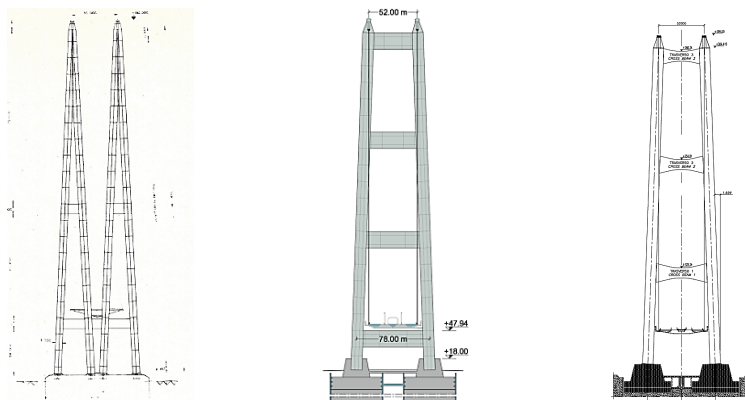


Fig. 8 - Le soluzioni per le torri del ponte sullo Stretto: studio di fattibilità del 1979, a sinistra, progetto di massima del 1992, al centro, progetto definitivo del 2011, a destra.

fronte di una notevole complessità costruttiva dei fusti fortemente inclinati. Le soluzioni di impalcato successive hanno invece consentito l'adozione di schemi a telaio: sempre in Figura 8 sono mostrate la soluzione del 1992 e quella del 2011.

#### *Alcune caratteristiche dinamiche*

Nella Figura 9 sono mostrati il primo modo di vibrazione, trasversale o pendolare con un periodo proprio di circa 32 s, il terzo modo di vibrazione, che è il primo verticale con periodo proprio di circa 17 s, e il quinto modo di vibrazione, che è il primo rotazionale con periodo proprio di circa 12 s (Brancaleoni *et al.*, 2009). Sono i secondi due a determinare le prestazioni di stabilità aerodinamica con i loro periodi propri molto prossimi, che rendono l'opera particolarmente sensibile da questo punto di vista. A determinare questa prossimità di periodi è la preponderanza non solo della rigidità, ma anche della massa dei cavi, al contrario di quel che avviene per luci inferiori. Diviene questo un secondo effetto scala per le grandissime luci, che mostra anch'esso la necessità di mantenere al minimo possibile le dimensioni dei cavi. I modi di vibrazione visti sinora sono caratterizzati da periodi propri troppo lunghi per essere invece sensibili ad azioni sismiche e lo stesso vale per altri modi globali delle sovrastrutture.

Per giungere a un ordine che porti a una risposta significativa bisogna andare su modi molto successivi, in termini relativi locali, che interessano soprattutto le torri. In Figura 10 sono mostrati il primo modo trasversale e il primo modo longitudinale della torre, che sono rispettivamente il n. 50, con periodo di circa 4,5 s, e il n. 100, con periodo di circa 2,5 s: si tratta comunque di periodi piuttosto lunghi, addirittura simili a quelli obiettivo di molti sistemi ordinari di isolamento sismico.

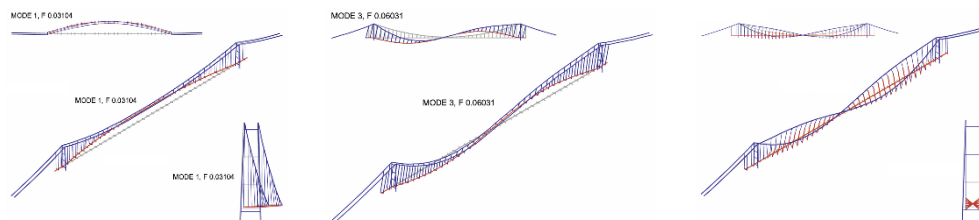


Fig. 9 - Primo modo, periodo di circa 32 s, a sinistra, terzo modo (primo verticale), al centro, e quinto modo (primo rotazionale), a destra; periodi propri rispettivamente circa 17 e circa 12 s.

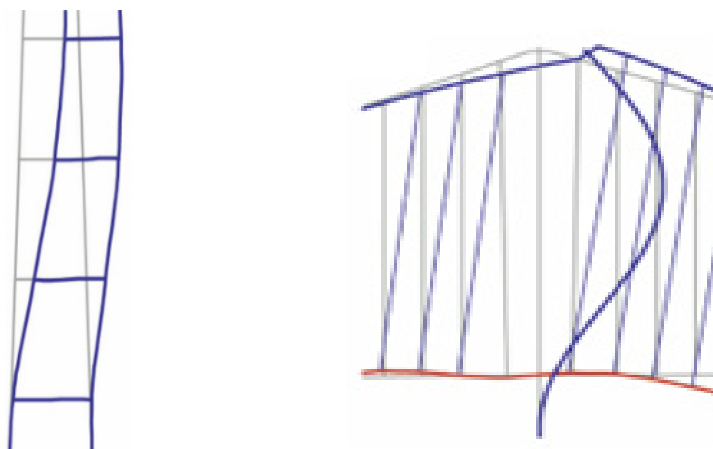


Fig. 10 - I primi modi locali della torre: trasversale, a sinistra, e longitudinale, a destra.

In direzione trasversale il dimensionamento della torre è poi comunque definito principalmente dalle azioni del vento, come detto al paragrafo precedente, mentre in direzione longitudinale il sisma dà un contributo che definisce il dimensionamento dei fusti.

Si aggiunge che quanto esposto è un ulteriore motivo che rende indesiderabili torri rigide, in particolare in direzioni trasversale, onde non abbassarne i periodi propri e rientrare in zone di maggiore sensibilità alle azioni sismiche.

#### *Il sistema di vincolo e i giunti di espansione*

Nei paragrafi precedenti sono stati delineati alcuni degli aspetti del comportamento del ponte che maggiormente influiscono sulla sua concezione e configurazione globale. Per un'opera di queste dimensioni è ben comprensibile come esista poi un gran numero di componenti di maggiore dettaglio che hanno richiesto studi specifici

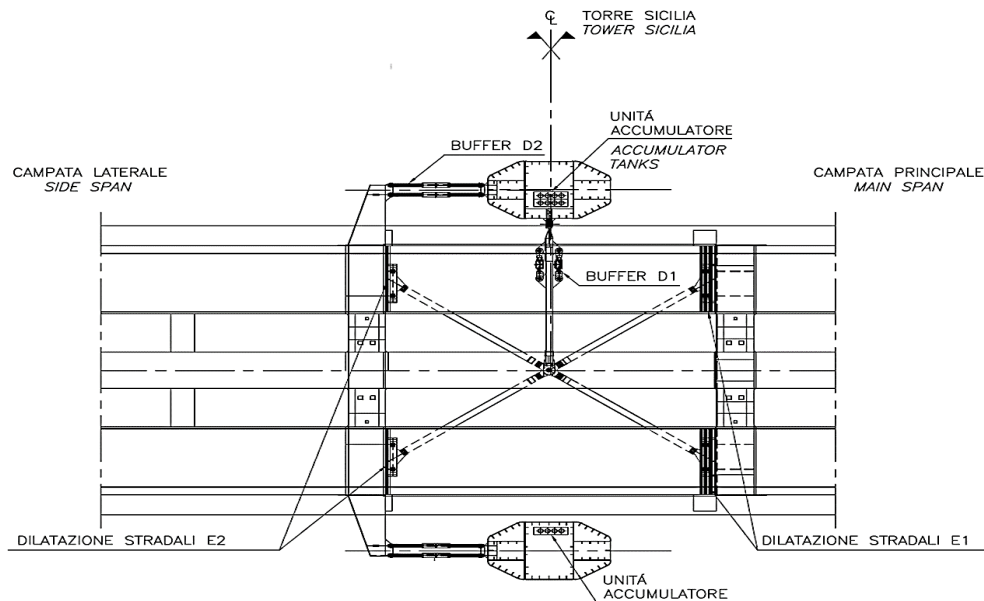


Fig. 11 - La configurazione dell'impalcato alle torri, progetto del 2011: pianta.

e hanno spesso portato a soluzioni originali e innovative. Fra queste si è ritenuto di dare un cenno a una di esse, che ha richiesto un attento processo di studio e ottimizzazione: i giunti di espansione che sono due, collocati ai due terminali dell'impalcato su apposite strutture di transizione verso i viadotti di accesso.

Particolarmente interessante il giunto ferroviario, viste le grandi escursioni previste. Per renderne la meccanica la meno complessa possibile si sono perseguiti due obiettivi:

- ottenere una configurazione che portasse il giunto ferroviario a fornire soltanto spostamenti longitudinali; questo primo aspetto è già completamente presente nel progetto di massima del 1992;
- limitare gli spostamenti longitudinali sia come estensione che come corsa cumulata, in modo da ridurre dimensione assoluta del giunto ed usura, aspetto questo affrontato nel progetto definitivo del 2011.

Per il primo obiettivo è stata introdotta una serie di misure, tutte a carattere strutturale, che possono essere così sintetizzate:

- alle torri i due impalcato stradali sono stati interrotti da giunti, lasciando continuo l'impalcato ferroviario, come mostrato in Figura 11, in modo che le rotazioni della campata centrale attorno all'asse verticale non si riflettano nelle laterali;

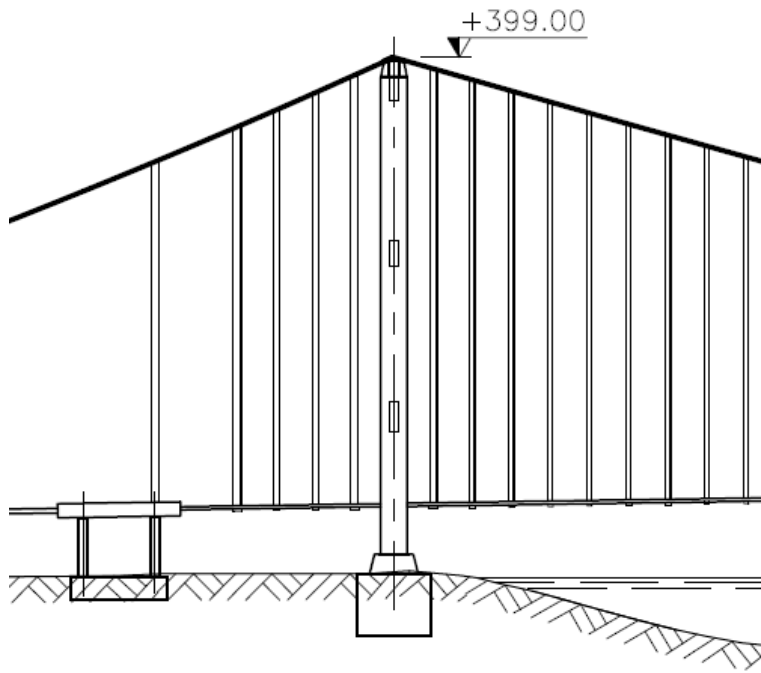


Fig. 12 - La zona delle campate laterali, progetto del 2011: prospetto. Sono visibili le funi di tie down.

- le campate laterali sono brevi, in modo da far sì che le rotazioni proprie attorno all'asse verticale siano modeste, come rappresentato in Figura 12;
- per limitare gli spostamenti verticali delle campate laterali e le associate rotazioni i cavi principali sono stati irrigiditi collegandoli alle strutture terminali con delle funi verticali cosiddette di *tie down*, si veda ancora la Figura 12.

Grazie a quanto sopra descritto le modeste componenti residue di rotazione e di spostamento verticale e trasversale al giunto possono essere efficacemente assorbite da sistemi di guide collocati sulle strutture terminali. Rimangono gli elevati spostamenti longitudinali, che sono dovuti non soltanto alle variazioni termiche, ma anche e soprattutto al passaggio di convogli ferroviari. Fu quindi necessario nel progetto del 1992 introdurre giunti di binario di grande escursione, circa  $\pm 6$  m, di tipologia “ad ago”, guidati da un complesso meccanismo a ruote.

Nel progetto definitivo del 2011 sono invece stati introdotti dei dispositivi oleodinamici a soglia di forza, che permettono pressoché completamente gli spostamenti di origine termica ma limitano fortemente quelli dovuti al traffico, eliminando del

tutto quelli dovuti al traffico medio e leggero. Questo ultimo aspetto, oltre a ridurre significativamente l'escursione complessiva dei giunti, ora pari a  $\pm 2$  m, permette l'adozione di più semplici giunti "a mezza rotaia" e contiene in grande misura gli spostamenti cumulati, con un deciso miglioramento in termini di usura e durabilità, problematica che nelle esperienze degli ultimi decenni si è rivelata molto significativa (Zhang, 2014).

### *Conclusioni*

In questo contributo è stata proposta una sintetica esposizione degli aspetti più salienti del lungo processo di sviluppo del progetto strutturale del ponte sospeso di 3300 m di luce per l'attraversamento dello Stretto di Messina, con le molte soluzioni innovative progressivamente introdotte e perfezionate in un arco di tempo di diverse decine di anni. Idee che possiamo affermare essere oggi alla base della concezione di molti ponti sospesi in tutto il mondo, sia realizzati che in progetto: una iniziativa italiana che permesso significativo progresso tecnico e scientifico internazionale e ha aperto la strada verso la realizzazione di grandissime luci.

### *Bibliografia*

- Brancaleoni F. 1979. *Verformungen von Hängebrücken unter Eisenbahnlasten*. Der Stahlbau. Hoboken: Ernst (Wilhelm) & Sohn.
- Brancaleoni F., Diana G. 1993. The Aerodynamic Design of the Messina Straits Bridge. *International Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 48, 395-409.
- Brancaleoni F. et al. 2009. *The Messina Strait Bridge - A Challenge and a Dream*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- Brancaleoni F. 2024. I cavi portanti dei ponti sospesi, passato e presente. In: *Proceedings of the 6th International Conference on History of Engineering - Atti del 10° Convegno Nazionale* (a cura di S. D'Agostino, F.R. d'Ambrosio Alfano, E. Manzo, R. Mauro). Napoli: Cuzzolin Editore.
- Brown W.C. et al. 1975. Bosphorus Bridge Design and Construction. *ICE Proceedings-Civil Engineering*, 58.
- Brown W.C. 1996. Development of the Deck for the 3,300 m Span Messina Crossing. In: *Proceedings of the 15th Congress of IABSE*. 1019-1030.
- Cuddy M. 1999. Rehabilitation of the Wheeling Suspension Bridge. In: *Proceedings of the International Conference on Historic Bridges*, Wheeling, October, 33-45.
- Gimsing N.J., Georgakis C.T. 2012. *Cable Supported Bridges, Concept and Design*. Third Edition. Chichester: Wiley.
- Gruppo Ponte Messina 1979. *Rapporto di fattibilità*. 5. s.l.: s.e.
- Stretto di Messina 1986. *Rapporto di fattibilità*. s.l.: s.e.
- Zhang Y. et al. 2014. SHM-based condition assessment of expansion Joints in suspension Bridges. In: *Proceedings of the ACEM14 World Congress*. Busan: Techno-Press.





FABIO BRANCALEONI

*I cavi portanti dei ponti sospesi, passato e presente*

*The main cables of suspension bridges, past and present*

*Sommario*

In questo contributo viene proposto un excursus sullo sviluppo dei cavi portanti dei ponti sospesi nell'età contemporanea, dal primo impulso ricevuto con la Rivoluzione Industriale sino ai nostri giorni, con un cenno ai passaggi e alle figure dei maggiori protagonisti di questa evoluzione scientifica e tecnologica.

*Abstract*

An excursus on the development of suspension bridge cables in the contemporary age is presented, beginning with the impetus of the industrial revolution until the present times, with a brief mention of the key moments and major characters of this scientific and technological evolution.

*Introduzione*

Di qualunque materiale fossero composte, la realizzazione delle funi portanti dei ponti sospesi è sempre stata uno dei momenti più complessi nella costruzione di queste opere, con la necessità di portare lunghi elementi al di sopra di grandi spazi per superare fiumi, bracci di mare o vallate. Si sa che i ponti sostenuti da funi vegetali si perdono nell'antichità, vedi (Jakkula, 1941) per un esaustivo regesto, mentre questo lavoro prende le mosse dal periodo successivo alla Rivoluzione Industriale: viene illustrato il passaggio dai ponti a catene a quelli sostenuti da fili, con il ruolo e l'interazione fra l'ingegneria e l'industria europea e quelle statunitensi, i primi esempi, le tecnologie di realizzazione che divengono la premessa del "grande secolo statunitense" da metà '800 a metà '900 del secolo scorso (Kemp, 1993; Petroski, 1996), per poi seguire il progresso e le nuove tecniche che portano sino ai nostri giorni.

*La prima metà dell'Ottocento e i ponti a catene*

La realizzazione di ponti a catene è documentata sin dal Medioevo ed è probabile che di esemplari antecedenti non sia rimasta traccia (Navier, 1823; Drewry, 1832). La maggior parte delle opere è in estremo Oriente, come esempio si cita il famoso

ponete tibetano Chushul Chakzam (ponte di ferro) sul fiume Tsangpo del 1430 con l'imponente luce di 140 m, nonché il suo costruttore, lo yogi, medico, fabbro e ingegnere *ante litteram* Thang-stong rGyal-po. Rari gli esempi in occidente: fra i pochi ponti di cui si ha traccia quattro piccole opere sulle gole della Schöllenen nel Canton Uri in Svizzera, risalenti circa al 1220 (Peters, 1987), ma bisogna giungere sino al 1734 per vedere un ponte a catene sull'Oder in Slesia o al 1741 per un piccolo ponte a catene in Inghilterra, il Winch Bridge di 21 m di luce. Tutto questo sarebbe cambiato profondamente con la rivoluzione industriale: il limite del passato va visto sia nelle caratteristiche meccaniche che potevano essere ottenute per il ferro, sia nella dimensione che i singoli anelli della catena, in genere forgiati manualmente a caldo, potevano raggiungere. Migliori forni e ferriere, motori a vapore e progresso scientifico sono fra gli elementi che danno il via all'era delle costruzioni in ferro e poi in acciaio, fra di esse i ponti sospesi.

Nel periodo in questione, il centro mondiale della produzione dei metalli era senza dubbio l'Inghilterra, con la zona industriale di Manchester e Liverpool. È però negli Stati Uniti che sono riportati i primissimi esempi di ponti a catene contemporanei, con la figura di James Finley, di professione giudice, che brevettò nel 1808 una configurazione di ponte sospeso. Sulla base delle sue idee furono costruiti una quarantina di piccoli ponti, il primo è quello di Jacob's Creek del 1801, di 21 m di luce, il più grande il Newburyport Bridge, del 1810, di 74 m di luce, in Figura 1.

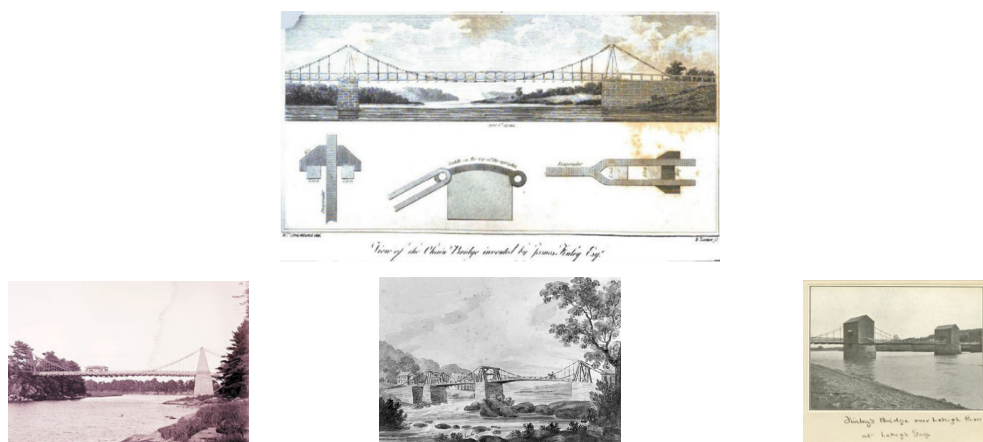


Fig. 1 - James Finley: brevetto del 1808, in alto; sotto da sinistra i ponti di Newburyport, Shuylkill e Lehigh.



*Fig. 2 - Samuel Brown, Union Border Bridge: vista, in alto, e dettagli delle catene, in basso. Le foto sono antecedenti a un importante restauro completato nell'aprile del 2023.*

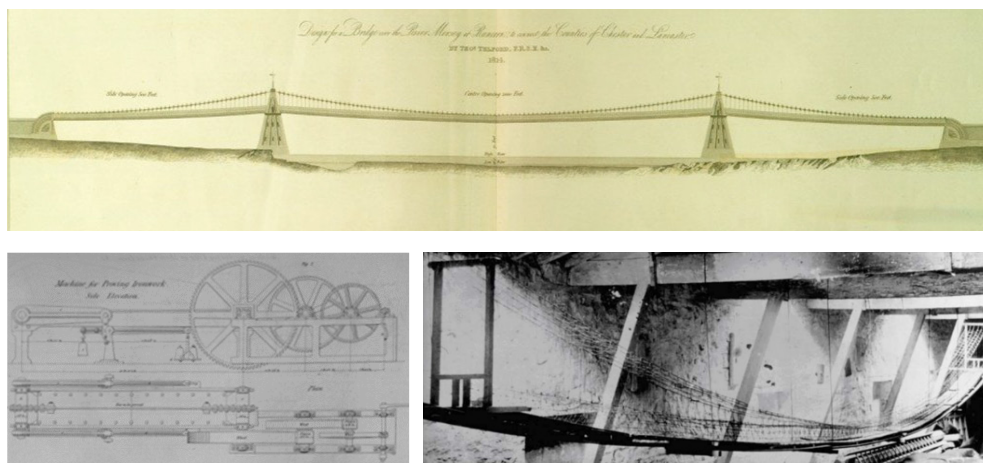
Opere semplici, di concezione rozza, vedono le catene con anelli alternati ad aste rettilinee. Questi esempi non ebbero seguito significativo e negli Stati Uniti i ponti a catene non si sarebbero mai diffusi. Il contrario avvenne pochissimi anni dopo nel Regno Unito, a seguire in tutta Europa e non solo. Fra le molte figure che avanzarono proposte, schemi e brevetti nei primissimi anni del secolo se ne citano qui due, per motivi diversi. La prima è quella di una donna: Sarah Maria Guppy (Higgit, 2016).

Brillante e poliedrica inventrice, Guppy brevettò idee le più varie, da oggetti per la casa sino a, nel 1811, un ponte sospeso a catene. Di questo brevetto non ci furono applicazioni, ma la considerazione di cui ella godeva è indubbia: è documentato che Thomas Telford, di cui si parlerà qui nel seguito, la contattò per chiederle l'accordo a utilizzare le sue idee e diverse sono le testimonianze del fatto che Isambard Brunel, altra figura che viene qui presentata, la consultò per il progetto del Clifton Bridge.

Le prime realizzazioni significative vennero da Sir Samuel Brown, capitano della Royal Navy. Il suo brevetto sui ponti sospesi è del 1817, con la realizzazione di diverse opere la più rilevante delle quali, per luce e per simbolismo, è lo Union Border Bridge sul fiume Tweed, al confine fra Inghilterra e Scozia, in Figura 2, costruito in collaborazione con un'altra importante figura, John Rennie. Completato nel 1820, con i suoi 137 m di luce è spesso indicato come il nuovo record mondiale, anche se rimane di 3 m più corto del Chushul Chakzam di cui si è detto. Ma se la luce non è un record, molto significativi sono i progressi tecnici, con catene di barre forgiate con collegamenti a perno e occhiello e capacità portante complessiva ben superiore rispetto a quanto realizzato in precedenza: il primo vero ponte sospeso moderno.

Al periodo pioneristico seguì un grande interesse, centrato in ambito europeo ma con applicazioni in tutto il mondo, che vide centinaia di ponti a catene costruiti e numerosissime figure di costruttori e progettisti (Jakkula, 1941). In questo quadro la massima espressione di questa tipologia, per livello delle opere e momento della realizzazione, ebbe senza dubbio come cuore il Regno Unito, in connessione alle capacità industriali nella produzione di grandi elementi in ferro e nella loro lavorazione, soprattutto in forgiatura. Volendo restringere il campo a pochissime figure, la prima in tutti i sensi non può che essere quella di Thomas Telford (Smiles, 1867; Rolt, 1958). Figlio di un pastore, giovanissimo muratore, architetto autodidatta, divenne in una luminosa carriera il più importante ingegnere civile del Regno Unito georgiano. Progettò strade, canali e letteralmente un migliaio di ponti, rivoluzionando lo sviluppo di molte aree del Regno Unito ma, per motivi sia culturali che anagrafici, mai partecipando alla ulteriore rivoluzione dei trasporti avvenuta con l'avvento delle ferrovie, cui non si oppose ma che non caldeggiò. L'interesse di Telford per ponti sospesi nacque nel 1814, con uno studio per l'attraversamento del fiume Mersey, il Runcorn Bridge, che avrebbe avuto la luce record di 305 m. Per questo intraprese una sistematica sperimentazione su materiali e modelli, approfondendo le capacità delle diverse possibilità, comprendenti tondi e piatti in ferro forgiato o fili di ferro prodotti per trafilatura; alcuni suoi schizzi sono in Figura 3.

Il progetto del Runcorn non fu mai realizzato, ma presto si presentò una occasione concreta, che sarebbe divenuta non soltanto il primo ponte sospeso di Telford, ma anche la nuova luce record di 176 m e il riferimento mondiale dei ponti a catene: il ponte sullo Stretto di Menai (Provis, 1828) fra Inghilterra e Galles, completato nel



*Fig. 3 - Telford, studi per il Runcorn Bridge: prospetto, in alto; in basso, da sinistra, macchine per la prova degli elementi dei cavi principali e modello del ponte fatto con fili di ferro.*

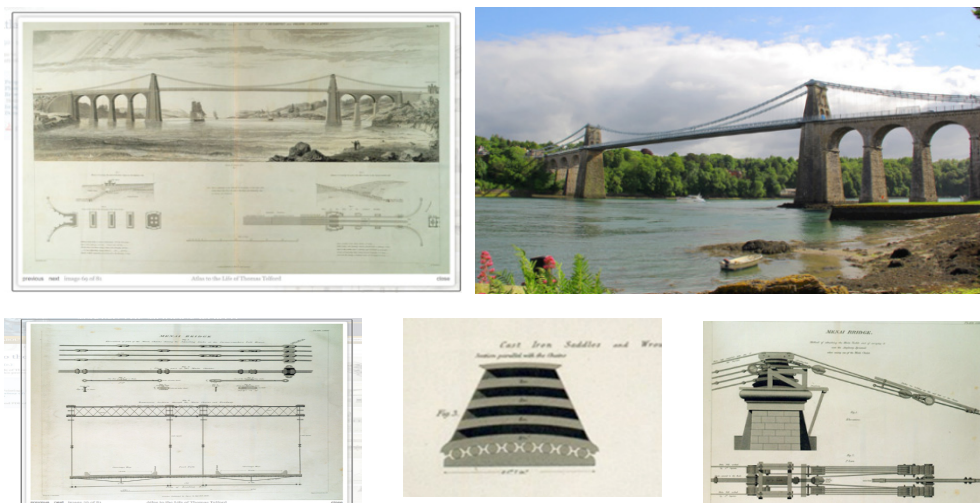


Fig. 4 - Thomas Telford, ponte sullo stretto di Menai: in alto da sinistra prospetto originale e una foto recente; in basso, da sinistra, dettagli delle catene, sistema di rulliere in testa torre e argani per il montaggio delle catene.

1826, in Figura 4. Realizzato con catene in piatti forgiati, vede ulteriori miglioramenti rispetto alle opere di Samuel Brown. Le catene sono multiple, perni e occhielli sono di migliore fattura e dimensioni, molti dettagli importanti sono stati sviluppati, si veda ad esempio il sistema di rulliere posto in sommità alle torri per permettere il libero sviluppo degli spostamenti longitudinali del sistema di sospensione o il complesso sistema di traino per il montaggio delle catene (Smiles, 1867). Telford costruì poi soltanto un secondo ponte sospeso, il Conway Castle Bridge, completato pochi mesi dopo il Menai, di poco più piccolo e di caratteristiche tecniche analoghe.

La seconda figura, scelta per importanza e per contrasto con quella di Telford, è Isambard Kingdom Brunel (Brunel, 2006, prima edizione 1870; Brindle, 2005). Contrasto per origini: il padre Marc fu già un ingegnere importante che realizzò alcuni piccoli ponti sospesi, Isambard studiò come ingegnere e si mostrò precoce e brillante. Contrasto per età: molto più giovane, fu pienamente inserito nel mondo del trasporto ferroviario, che lo vide protagonista assieme ai ponti e al settore navale. Non ultimo, il periodo culturale di ben altra vivacità: si era ormai nel Regno Unito vittoriano. Premesse per un passaggio generazionale che divenne scontro professionale nella occasione del progetto del Clifton Bridge sulla Avon Gorge a Bristol. Di questa vicenda (Clifton Suspension Bridge Trust, 1970), qui si dice soltanto che nel 1829 Telford si oppose a un progetto a campata unica del giovanissimo Brunel che avrebbe superato i 200 m di luce e sarebbe stato il nuovo record, proponendo una



Fig. 5 - Isambard Kingdom Brunel: lo Hungerford Bridge, a sinistra, e il Clifton Bridge, a destra.

sua soluzione a tre campate, tanto mal concepita da non essere mai realizzata e da far sì che l'incarico, malgrado la grande fama di Telford, fosse affidato a Brunel. La costruzione però languì, Brunel nel frattempo costruì un unico altro ponte sospeso, l'Hungerford Bridge, in Figura 5, per venire prematuramente a mancare nel 1859 e non vedere mai il suo capolavoro completato, nel 1864, utilizzando, beffa finale, le catene dell'Hungerford nel frattempo demolito. Lo spettacolare Clifton Bridge giunse tuttavia in un momento in cui nel mondo era accaduto ben altro in questo settore.

Alle realizzazioni nel Regno Unito prestò attenzione tutto il mondo, si ricordano in ambito nazionale il primo modesto esempio del ponte San Benedetto sul Bacchiglione presso Padova del 1828 e le ben più significative realizzazioni del ponte Real Ferdinando sul Garigliano e del ponte Maria Cristina sul Calore, rispettivamente del 1832 e del 1835, entrambi opera di Luigi Giura. In Europa fra i molti che a queste opere dedicarono interesse il nome più famoso è quello di Claude Louis Marie Henri Navier, che nel 1821 compì un viaggio di studio nel Regno Unito e scrisse quello che sarebbe divenuto il più importante trattato sui ponti sospesi dell'epoca (Navier, 1823). Fautore dei ponti a catene, Navier, nel 1824, applicò quanto aveva sviluppato al progetto di un ponte sulla Senna a Les Invalides. Il ponte crollò però in costruzione per il collasso di un blocco di ancoraggio e Navier doveva rimanere uno dei più grandi teorici di sempre, ma mai divenne un costruttore di grandi ponti.

### *Sospesi a dei fili, ancora la prima metà dell'Ottocento*

Negli stessi anni l'interesse di molte figure si diresse verso i fili di ferro ottenuti con i grandi progressi delle tecnologie di trafilatura, per la loro maneggevolezza e per le loro migliori proprietà meccaniche rispetto al ferro forgiato. Lo stesso Telford li studiò, preferendo tuttavia le catene e per diversi anni la scelta fra le due tecnologie fu dibattuta con pareri molto netti a favore delle catene, ritenute più durevole e affidabili (Drewry, 1832; Martin, 1834): nel prossimo paragrafo si vedrà cosa avrebbe detto la storia (Bender, 1872). Malgrado tali pareri contrari numerosi furono i tentativi e le piccole realizzazioni che utilizzavano le funi di fili. La prima fu negli Stati Uniti, con

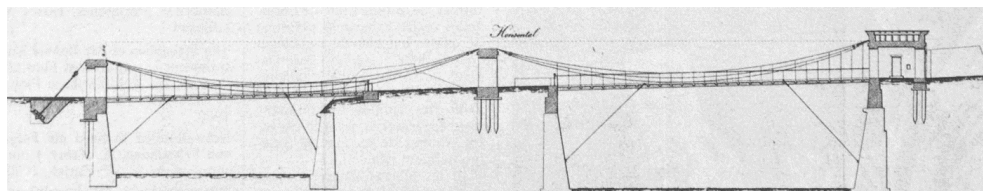


Fig. 6 - Guillaume Henri Dufour, Marc Seguin e Marc-Auguste Pictet: il ponte Saint Antoine a Ginevra.

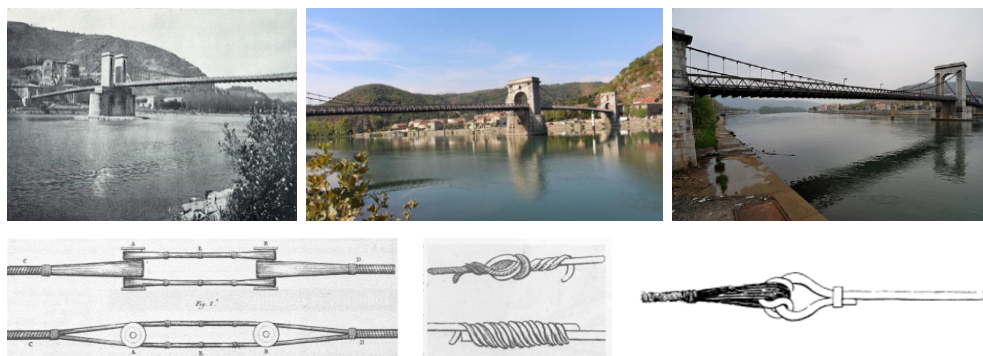


Fig. 7 - Marc Seguin. In alto, da sinistra, i ponti Tournon-sur-Rhône, 1825, e Andance, 1827, e la passerella Marc Seguin, 1849, a destra. In basso: dettagli delle funi e delle giunzioni.

una modesta passerella sospesa realizzata in Pennsylvania da Josiah White e Erskine Hazard nel 1817 sul fiume Schuylkill a Faimount. Seguono due opere strallate, il King Meadows Bridge sul Tweed di Redpath e Brown, nel 1817, e nello stesso anno il Dryburgh Abbey Bridge, ancora sul Tweed, di John e William Smith.

Come per i ponti a catene, lo sviluppo di ponti con funi di fili non doveva avvenire dove i primi furono realizzati: è in Francia che la tecnologia fiorì, *in primis* con la figura di Marc Seguin. Nacque in una famiglia di mercanti di stoffe ma abbandonò presto gli affari di famiglia per dedicarsi alle costruzioni. Realizzò un primo prototipo di ponte nel 1822, con una modesta passerella sul Cance ad Annonay, per partecipare poi assieme a Guillaume Henri Dufour e a Marc-Auguste Pictet alla costruzione del ponte Saint Antoine a Ginevra, in Figura 6, che malgrado le sue modeste luci di 33 m e 23 m può essere visto come il primo vero ponte sospeso con cavi portanti composti da fili (Dufour, 1824). Autore di un testo (Seguin, 1824), gli sono attribuite numerose opere, tutte molto simili e di dimensioni inferiori ai 100 m di luce, alcune delle quali sono mostrate in Figura 7. Le funi erano a fili paralleli, con delicate giunzioni rese necessarie dalla necessità di avere fili più lunghi rispetto a quanto le tecniche di trafilatura dell'epoca consentissero.



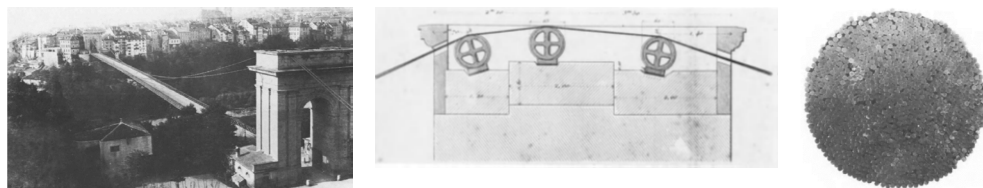


Fig. 8 - Joseph Chaley e Louis Vicat, il ponte sulla Sarine a Friburgo, 1834: da sinistra, vista, particolare delle selle e sezione delle funi.

Per dare anche in questo caso un cenno all'ambito nazionale si ricordano il primo, la passerella di Villa Paolina a Sesto Fiorentino del 1828, opera di Antonio Carcopino, il Leopoldo II sull'Ombrone a Poggio a Cajano presso Firenze del 1833, opera di Alessandro Manetti, e la vicenda molto particolare dei ponticelli a fili in Val di Sesia, ben esposta in (Re, 1993), al cui titolo si ispira l'intestazione di questo paragrafo. Per tutte le opere descritte sinora, che fossero a catene o a funi di fili, una problematica fondamentale era la messa in opera, che per entrambe avveniva, pur con molte varianti, assemblandole a terra su piste della loro intera lunghezza per poi trainarle in sito tramite argani, da terra ove possibile o da pontoni lunghi e stretti e collegarle a tratti più brevi già collocati in testa alle torri. Questo dava una forte limitazione alle luci realizzabili: per un vero progresso era necessaria una tecnologia diversa, che venne ideata in Francia a opera di Louis Joseph Vicat, più noto per i suoi studi sui calcestruzzi ma in realtà *ingénieur en chef de ponts et chaussées* a tutto tondo. In (Vicat, 1834) venne delineato un metodo di assemblaggio di funi composte di fili che avviene interamente in sito: nacque così la tecnologia dello *aerial spinning* (Gimsing, 2012). La prima opera realizzata con questa *nouvelle manière de confectonner les câbles en fil de fer* è in Svizzera e fu un record: il ponte sulla Sarine a Friburgo, in Figura 8, di 273 m di luce, del 1834, che ebbe come progettista principale Joseph Chaley. Seguirono altri ponti ma, ancora una volta, la tecnologia fiorì in un luogo diverso: si torna negli Stati Uniti.

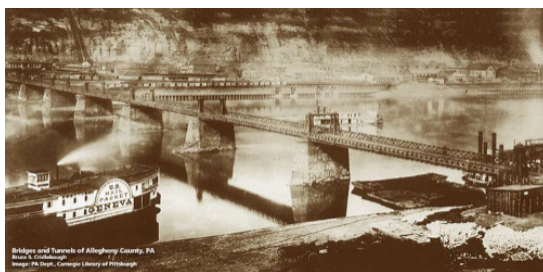
#### *Il grande secolo americano, da metà Ottocento a metà Novecento*

Negli Stati Uniti dell'Ottocento si verificarono tutte le condizioni per lo sviluppo di grandi ponti: industria in espansione, territori vergini e grandi fiumi o bracci di mare, in una società americana sì consolidata ma ancora di grande attrazione per l'immigrazione da tutta Europa. Le due figure qui considerate rappresentano queste due realtà, in contrapposizione personale e non solo: Charles Ellet Jr. (Kemp, 1999), e Johann Augustus Roebling, (Haw, 2020). Ellet nacque negli Stati Uniti, nella Pennsylvania che è uno dei cuori industriali del paese, in una famiglia statunitense da varie generazioni; studiò negli Stati Uniti e si perfezionò in Europa, dove conobbe i ponti di Seguin e i progressi di Vicat. Tornato in patria, avanzò diverse proposte per

ponti sospesi, ne realizzò un primo sullo Schuylkill a Fairmount nel 1842 e scrisse un testo di grande popolarità (Ellet, 1847). Il ponte di Fairmount è nella concezione un tipico “ponte Seguin”, della scuola francese della quale Ellet fu sempre alliere. Nel 1848 gli si presentarono due grandi occasioni: un ponte sospeso ferroviario sulle cascate del Niagara e un ponte sull’Ohio a Wheeling, che divenne il nuovo record con i suoi 308 m. Entrambe ebbero però destino infelice, del primo iniziò la costruzione ma problemi finanziari e politici lo bloccarono, il secondo venne distrutto da una bufera nel 1854 (Kemp, 1999) per essere poi ricostruito e rinforzato varie volte, stravolgendone la concezione originale anch’essa francese (Cuddy, 1999). Ellet morì nel 1862, a seguito di ferite riportate nella guerra civile, ma la sua sfortunata figura diede un importante impulso ai ponti sospesi americani.

Ben diverse le origini di Roebling: prussiano, figlio di un negoziante, studiò in patria dove non trovò sbocco alle sue idee in una società che considerava rigida e poco attiva. Decise quindi di partecipare assieme al fratello a una iniziativa di emigrazione di un gruppo di connazionali. Affascinato da idee di società utopiche, giunto negli Stati Uniti, fondò una comunità agricola ideale “tedesca”, Saxonburg. Ma Roebling, cambiato il nome in John dopo aver preso la cittadinanza americana, scoprì presto che la agricoltura non era il suo futuro e riprese l’attività di ingegnere, partecipando a progetti di ferrovie e canali. Nello stesso periodo iniziò anche la produzione semiartigianale di funi spirodali, tecnologia allora agli albori, dando inizio assieme ai fratelli e poi ai figli a quella che sarebbe diventata una potenza industriale del settore. La passione di John restarono però i ponti sospesi, che aveva già studiato e proposto in Europa. La sua prima occasione venne con un acquedotto sospeso sull’Allegheny, nel 1844, cui ne seguirono altri tre. Costruì poi nel 1846 il primo vero ponte sospeso sul fiume Monongahela, in Figura 9, con 8 campate da 57 m.

L’emergente Roebling cercò più volte contatto e collaborazione con Ellet, che di fatto lo ignorò: i due divennero professionalmente rivali e Roebling proseguì la propria evoluzione di una personale concezione strutturale, che vede la presenza di



*Fig. 9 - John Roebling, le prima strutture sospese: l’acquedotto sull’Allegheny, a sinistra, e il ponte sul Monongahela, a destra.*

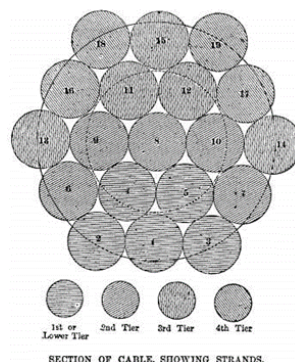
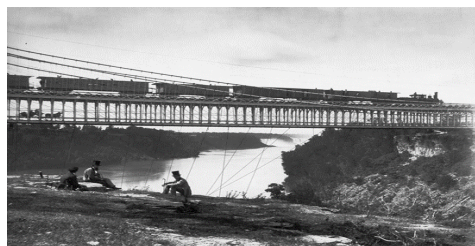


Fig. 10 - John Roebling: in alto, da sinistra, il ponte sulle cascate del Niagara e il ponte Cincinnati-Covington, a lui intitolato; in basso, da sinistra, il ponte di Brooklyn durante il montaggio dei cavi, ben visibile la “spinning wheel”, e dettagli dei cavi.

impalcati più rigidi e di stralli, di un perfezionamento delle tecniche di *aerial spinning* e di giunzioni e ancoraggi per i fili (Hildenbrand, 1877). La sua prima opera di grande importanza nacque sulle ceneri di un lavoro di Ellet: nel 1855 riprese con successo il progetto del ponte ferroviario sulle cascate del Niagara, in Figura 10. Raggiunta una solida fama, realizzò nel 1867 il suo primo record con il ponte Cincinnati-Covington sull’Ohio, 322 m di luce, e si dedicò alla progettazione di quella che sarebbe divenuta l’opera simbolo dei ponti sospesi: il ponte di Brooklyn sull’East River a New York. Roebling non doveva però mai vederlo: morì infatti nel 1869 per le conseguenze di un incidente durante un sopralluogo in sito. A completare il ponte sarà suo figlio Washington Augustus, validissimo ingegnere (Wagner, 2017) che aveva già con lui collaborato nelle opere precedenti; la bellissima biografia scritta da Sayenga (2009) dice del complesso rapporto fra i due. Ma la maledizione dei Roebling non finì: durante la realizzazione delle fondazioni, eseguite con la tecnica dei cassoni pneumatici, Washington soffrì di embolia da decompressione, rimase in cattive condizioni di salute e a tenere i rapporti con i suoi assistenti, con fornitori e con le autorità cittadine fu sua moglie Emily Warren Roebling, figura cui la storica

Marilyn E. Weigold ha dedicato un libro (Weigold, 2019). Il ponte di Brooklyn fu un record per molti aspetti: la luce di 486 m, i fili dei cavi per la prima volta in acciaio e non in ferro, per la prima volta zincati a caldo e per la prima volta prodotti negli Stati Uniti, mentre nei precedenti grandi ponti di Roebling la produzione era stata a Manchester, allora il centro della migliore qualità mondiale (McCullogh, 2012).

Con il ponte di Brooklyn la tecnologia fece un enorme balzo in avanti e furono poste le basi per lo sviluppo dei grandi ponti americani (Petroski, 1996), con opere e figure tra le quali qui vanno ricordati Othmar Hermann Amman, con i due record dei ponti Washington e Verrazano Narrows, Joseph Baermann Strauss e Charles Alton Ellis, con il Golden Gate, David Barnard Steinman con il Mackinac, Leon Solomon Moisseiff con lo sfortunato Tacoma. In questo periodo la tecnologia della realizzazione dei cavi migliora in molti dettagli ma resta soltanto l'*aerial spinning*.

Un ultimo significativo contributo della industria americana al settore ci fu nel 1968, in Pennsylvania: Jackson Leland Durkee della Bethlehem Steel riuscì, primo al mondo, a bobinare funi prefabbricate da 36 fili paralleli della intera lunghezza del cavo. Nacque la tecnologia delle *prefabricated parallel wire strands*-PPWS, con la quale vennero realizzati due ponti negli Stati Uniti, il Newport del 1969 e il Chesapeake Bay del 1973 (Birdsall, 1971). Ma lo *spanning of America* è ormai completo e di nuovo una tecnologia si sviluppa altrove, in questo caso in Giappone.

### *I ponti sospesi in tutto il mondo*

I ponti sospesi costruiti in tutti il mondo nella seconda metà del Novecento vedono tutti la tecnica dell'*aerial spinning*, con il record del ponte sull'Humber, del 1981, in Inghilterra, 1410 m di luce. Per il grande progetto di collegamento delle isole di Honshu e Shikoku in Giappone la Honshu Shikoku Bridge Authority acquistò dalla Bethlehem il brevetto delle PPWS e con questa tecnica, perfezionata sino a portare il numero di fili di una fune prefabbricata a 127, vennero costruite diverse opere, fra di esse il nuovo record del ponte sull'Akashi del 1998, con 1991 m di luce. Le PPWS consentono tempi brevi e si dimostrano molto efficaci; è la fine dell'*aerial spinning*? No: nel 1988 furono realizzati due ponti, il Fatih Sultan Mehemet, o secondo ponte sul Bosforo, e lo Shimotsui Seto in Giappone, con un miglioramento della tecnica e della velocità di tessitura, il cosiddetto *modified aerial spinning*. Le due tecnologie sono oggi entrambe valide e adottate nel mondo: il ponte di Braila in Romania, completato nel 2023, vede lo *spinning*, l'attuale record del mondo, il ponte 1915 sui Dardanelli completato nel 2022, luce 2023 m, vede le PPWS.

### *Conclusioni*

Dopo aver esposto un quadro di due secoli di sviluppo di tecnologie e materiali per la realizzazione dei cavi dei ponti sospesi si conclude con un loro aspetto fondamentale: l'evoluzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali, dal ferro forgiato dei

Tab. 1 - Tensione di rottura dei materiali per catene e funi da inizio Ottocento a oggi.

| Opera         | Periodo | Ø<br>[mm] | $\sigma_r$<br>[MPa] |
|---------------|---------|-----------|---------------------|
| Catene        | '800    | -         | 200-300             |
| Fili ferro    | '800    | 3-7       | 400-800             |
| Brooklyn      | 1883    | 4.57      | 1100                |
| Bear Mountain | 1924    | n.a.      | 1500                |
| Golden Gate   | 1937    | 4.98      | 1550                |
| Storebaelt    | 1998    | 5.38      | 1550                |

| Opera         | Periodo | Ø<br>[mm] | $\sigma_r$<br>[MPa] |
|---------------|---------|-----------|---------------------|
| Akashi        | 1998    | 5.23      | 1760                |
| Yi-Sun-Sin    | 2012    | 5.35      | 1860                |
| Nansha        | 2019    | 5.30      | 1960                |
| “1915”        | 2022    | 5.75      | 1960                |
| Braila        | 2023    | 5.38      | 1860                |
| Zhangjingtiao | 2028    | 5.65      | 2200                |

ponti a catene al filo di ferro della prima metà dell'Ottocento per finire con gli acciai ad alta resistenza oggi utilizzati, in Tabella 1. Volendo gettare uno sguardo al futuro, si può affermare che su questi ultimi si basa il progresso atteso nei prossimi anni: è in costruzione in Cina lo Zhangjingtiao, sullo Yangtze, di 2300 m di luce e molti sono i progetti, con la prospettiva di raggiungere e superare i 3000 m. Si andrà molto oltre? Saranno nuovi materiali a permettere quel che ora è impossibile? Se oggi dobbiamo dire di no, i nostri allievi vedranno la risposta domani (Clarke, 1979).

### Bibliografia

- Bender C., 1872. *Historical Sketch of the Successive Improvements in Suspension Bridges to the Present Time*. Transactions ASCE, 1(1), 27-44.
- Birdsall B. 1971. *Main Cables of Newport Suspension Bridge*. Journal of the Structural Division (ASCE), 97(12), 2825-2835.
- Brindle S. 2005. *Brunel, the Man who built the World*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Brunel I. 2006. *The Life of Isambard Kingdom Brunel, Civil Engineer*. First published in 1870. Stroud: Nonsuch Publishing.
- Chaley J. 1834. *Le Pont Suspendu en Fil de Fer sur la Sarine a Fribourg en Suisse*. s.l.: L.J. Schmid, Imprimeur-Editeur.
- Clarke A.C. 1979. *The Fountains of Paradise*. London: Gollancz Ltd.
- Clifton Suspension Bridge Trust 1870. *The History of Clifton Suspension Bridge*. Eighteenth Edition. Bristol: Bristol Printers Ltd.
- Cotte M. 2015. La controverse Seguin-Navier - À propos de l'introduction des ponts suspendus en France. Cahiers François Viète, II-6/7.
- Cuddy M. 1999. Rehabilitation of the Wheeling Suspension Bridge. In: *Proceedings of International Conference on Historic Bridges*, Wheeling, October, 33-45.
- Drewry C.S. 1832. *Memoir on Suspension Bridges*. London: Longman, Rees, Orme, Brown, Green & Longman.
- Dufour G.H. 1824. *Description du Pont Suspendu en Fil de Fer Construit a Genève*. Paris: J.J. Paschoud, Imprimeur-Librairie.
- Ellet C. 1843. *A Popular Notice of Suspension Bridges with a Brief Description of the Wire Bridge Across the Schuylkill, Fairmount*. Philadelphia: John C. Clark & Sons.

- Gimsing N.J., Georgakis C.T. 2012. *Cable Supported Bridges, Concept and Design*. Third Edition. Chichester: Wiley.
- Glover J. 2017. *Man of Iron, Thomas Telford and the Building of Britain*. London: Bloomsbury.
- Haw R. 2020. *Engineering America, the Life and Times of John A. Roebling*. New York: Oxford University Press.
- Higgit R. 2016. Revealing lives of women in science & technology: the case of Sarah Guppy. *The Guardian*, 8.
- Hildenbrand W. 1877. *Cable-Making for Suspension Bridges*. New York: D. Van Nostrand.
- Jakkula A.A. 1941. A History of Suspension Bridges in Bibliographical Form. *Bulletin of the Agricultural and Mechanical College of Texas, Fourth Series*, 12 (7).
- Kemp E.L. 1993. National Styles in Engineering: The Case of the 19th-century Suspension Bridge. *The Journal of the Society for Industrial Archeology*, 19 (1), 21-36.
- Kemp E.L. 1999. Charles Ellet, Jr. and the Wheeling Suspension Bridge. In: *Proceedings of International Conference on Historic Bridges*, Wheeling, October, 15-31.
- Martin M.E. 1834. *Emploi du fer dans les ponts suspendus*. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1re Série, 2<sup>e</sup> Semestre, CXCIV.
- McCullough D. 2012. *The Great Bridge, the Epic Story of the building of the Brooklyn Bridge*. New York: Simon & Schusters.
- Navier C.L.M.H. 1823. *Rapport À M. Becquey Et Mémoire Sur Les Ponts Suspendus*. Paris: De l'Imprimerie Royale.
- Peters T.F. 1987. *Transitions in engineering: Guillaume Henri Dufour and the Early 19th Century Cable Suspension Bridges*. Boston: Corboz, Basel & Birkhäuser.
- Petroski H. 1996. *Engineers of Dreams, Great Bridge Builders and the spanning of America*. New York: Vintage Books.
- Provis W.A. 1828. *An Historical and Descriptive Account of the Suspension Bridge constructed over the Menai Strait*. London: Ibotson and Palmer.
- Re L. 1993. *Sospesi a dei fili. I ponti pensili dell'800 valesiano*. Universale di Architettura. Torino: Lindau.
- Rolt L.T.C. 1958. *Thomas Telford*. London: Longmans.
- Sayenga D., Editor, 2009. *Washington Roebling's Father, a Memoir of John A. Roebling*. Reston: ASCE Press.
- Seguin M. 1824. *Des ponts en fil de fer*. Paris: Bachelier, Libraire.
- Smiles S. 1867. *The Life of Thomas Telford, Civil Engineer*. London: John Murray.
- Vicat L.J. 1834. *Nouvelle manière de confectionner les câbles en fil de fer*. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1re Série, 1<sup>er</sup> Semestre, CLXXI.
- Wagner E. 2017. *Chief Engineer, Washington Roebling, the Man who built the Brooklyn Bridge*. New York: Bloomsbury.
- Weigold M.E. 2019. *Silent Builder, Emily Warren Roebling and the Brooklyn Bridge*. Independently published in the US, © Weigold.



MARIO DI PAOLA, GIUSEPPE MUSCOLINO

*Evolution of viscoelastic dissipative models  
for structural systems crossed by moving loads*

*Evoluzione dei modelli dissipativi viscoelastici  
per sistemi strutturali attraversati da carichi mobili*

*Abstract*

An excursus on various models developed to represent viscoelastic materials from the end of the 19<sup>th</sup> century until the last decades is presented. To do this, the force-displacement relations for both the classical and fractional models are described. The former leads to integer-order differential equations, while the latter leads to fractional differential equations. Finally, some considerations are made on the effects of these models on the dynamic behavior of the “Messina Strait Bridge”.

*Sommario*

Viene eseguito un excursus sullo sviluppo di vari modelli per rappresentare i materiali viscoelastici dalla fine del XIX secolo fino agli ultimi decenni. A tal fine, vengono descritti i legami forza-spostamento sia per il modello classico che per quello frazionario. Il primo porta a equazioni differenziali di ordine intero, mentre il secondo a equazioni differenziali di ordine frazionario. Infine, vengono effettuate alcune considerazioni sugli effetti di questi modelli sul comportamento dinamico del Ponte sullo Stretto di Messina.

*Introduction*

A suspension bridge is basically a simple structure, with a “serial type” static behavior in carrying permanent loads. In particular, the loads are applied to the deck, conveyed to the main cable through the hangers and transmitted to the ground through the tower and the anchor blocks.

Since for suspended bridges the size of cables increases with the span it follows that for the “Messina Strait Bridge”, main span length 3,300 m, the cable becomes the heaviest and most expensive component of the superstructure (Muscolino, 2014). It follows that limiting the cable weight is the most fundamental design target to be achieved (Brancaleoni *et al.*, 2010). In particular, it has been shown that the final design, in Italian *Progetto definitivo*, for the “Messina Strait Bridge” has a structural deck weight of about 25 t/m, with an average cable weight of 32 t/m. Moreover, one



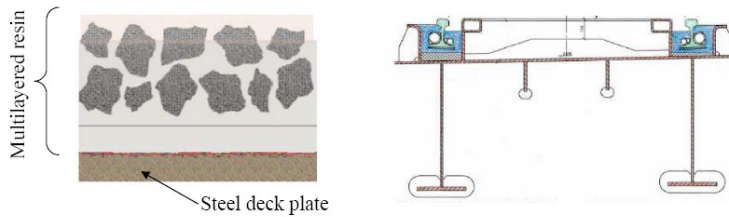


Fig. 1 - Schematic view: roadway pavement, on the left, and embedded rail system, on the right.

extra ton of the deck weight implies more than one and a half tons in the main cable (Brancaleoni *et al.*, 2010).

In the “Messina Strait Bridge” to limit dead loads, the multiple box solution has been chosen for the deck. Furthermore, to reduce the weight of roadway pavement, a thin three-layer resin, composed of a lower primer layer of 0.3 mm (pure resin), a central membrane layer of 2.0 mm (pure resin) and a wearing course layer of 8-9 mm (resin with sand and chippings), has been provided for the roadway, in Figure 1. The weight of the described multilayer resin is much lower than the weight of more traditional asphalt-based pavement systems (Polk *et al.*, 2011). To reduce the weight of the railway equipment, an embedded rail system, in Figure 1, originally developed for tramways and light rail systems, was proposed. This embedded rail system is 15-20% lighter than conventional systems. The application of embedded rail systems on long-span steel bridges is quite new and only limited experience is presently available (Polk *et al.*, 2011).

Another non-secondary aspect is the reduction of vibrations induced by road and railway moving loads that cross the bridge; for this reason, the viscoelastic materials that make up road pavements and railway pads must be appropriately modeled.

Recently, the interest of researchers has been devoted to the evaluation of the dynamic response of beams crossed by moving loads and resting on elastic or viscoelastic foundations (pads). In this paper, various rheological models used over the years to model both road pavements and railway pads are described starting from the crudest Winkler model (Younesian *et al.*, 2019). Subsequently, the fractional viscoelastic models that best approximate the experimental behavior of the materials, recently used in the construction of both road pavements and railway pads will be described, see Figure 2.

Finally, it is worth mentioning that the compresence of three different materials (steel, pure resin, resin with sand and chippings) not only locally reduces the induced vibrations due to moving loads, but also modifies the entire behavior of the bridge deck. It follows that the viscoelastic phenomenon has to be taken into account during the structural monitoring for capturing the reduction of vibrations due to the viscoelasticity of the multilayer resin.



Fig. 2 - Schematic view of a load  $p$  moving with velocity  $v$ : roadway system, on the left, and rail system, on the right.

### Classical models of viscoelastic materials

In materials science and continuum mechanics, viscoelasticity is the property of materials that exhibit both viscous and elastic characteristics when subjected to deformation. In the 19<sup>th</sup> century, physicists James Clerk Maxwell (1831-1879), Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906), Woldemar Voigt (1850-1919), and William Thomson, alias Lord Kelvin, (1824-1907) studied the phenomena of creep and relaxation of various materials, including glass, metals, and rubbers. It is useful to remember that creep is the evolution of the displacement that increases when a constant force is applied to the material, while relaxation is the evolution of the internal force that decreases when a constant displacement is applied (Kelvin, 1865; Boltzmann, 1876; Voigt, 1892).

Viscoelastic materials are those materials that exhibit a mechanical behaviour intermediate between those of elastic solids and viscous fluids. Elastic solids are solids which experience deformations proportional to externally applied loads through a material parameter, the modulus of elasticity, and that return to their initial configuration once the loads are removed. The elastic behaviour is represented by a spring, and the relation between the restoring force and displacement is referred to in the literature as Hooke law, see Figure 3. Any force  $F(t)$  applied to a purely elastic material immediately causes a correspondent displacement  $u(t)$ , and when the force is removed the displacement immediately disappears, as shown in Figure 3. This also

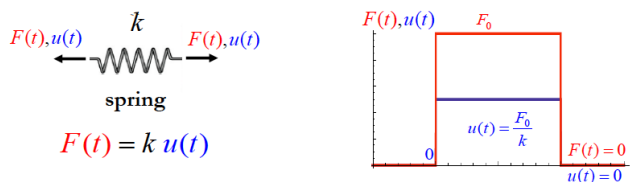


Fig. 3 - Hooke law: force-displacement relationship, on the left, and force and displacement variation over time, on the right.

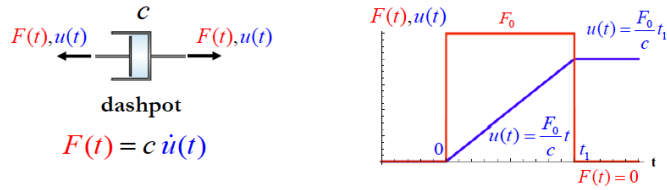


Fig. 4 - Newton-Petroff law: force-velocity relationship, on the left, and force and displacement variation over time, on the right.

means that the Hooke material is able to store the work done by external loads and give it back when the loads are removed, without any loss of energy.

Viscous fluids, instead, do not possess their own shape and are characterized by the fact that the internal stress is proportional to the displacement rate through the so-called viscosity, a parameter of the fluid itself; in particular, for Newtonian fluids the viscosity is a constant that does not depend on the velocity of deformation. The viscous behaviour is represented by a dashpot, and the relation between the applied force and displacement is referred to in the literature as Newton-Petroff law, see Figure 4. Notice that even if the relations between the force and displacement of the spring and the dashpot are similar, they describe very different behaviours. In fact, Hooke law does not depend on time. On the contrary, the Newton-Petroff model is not able to store energy and all the work done by the external load is transformed into heat. As a consequence, the viscous fluid flows and does not return to the initial configuration when the loads are removed. For this reason, this model is usually used to represent the damping or dissipation of materials, in Figure 4.

The energy dissipation that occurs during the cyclic deformation of real structures can be described within the framework of the linear theory of viscoelasticity.

In the context of beams crossed by moving loads, Emil Winkler (1835-1888) first modelled an Euler–Bernoulli beam on an elastic foundation (Winkler, 1867). This model of foundation soil is based on the hypothesis that every reaction point is proportional to the point’s displacement, and the springs are linear and independent. The main shortcoming of the Winkler model is the lack of viscoelastic behaviour and the inability to dissipate energy.

Afterwards, several models have been proposed in the literature to represent the foundation soil/pad of beams as a viscoelastic material. The first rheological models of viscoelastic materials were made up of the combination of a spring and a damper. Due to the presence of the viscous part, the mechanical behaviour of viscoelastic materials is time-dependent. Two phenomena related to the viscosity of the material which exerts its effects over time are creep and relaxation. These phenomena can be described by the creep and relaxation functions. Such functions are able to com-

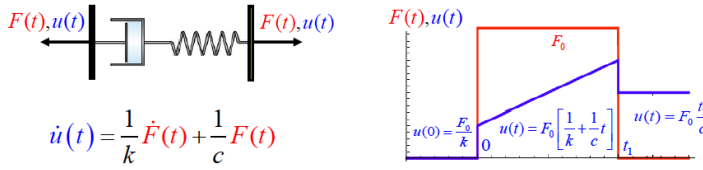


Fig. 5 - Maxwell model: force-velocity relationship, on the left, and force and displacement variation over time, on the right.

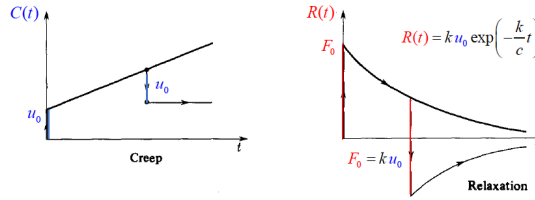


Fig. 6 - Maxwell model: creep function, on the left, and relaxation function, on the right.

pletely describe the time-dependent behaviour of viscoelastic materials and are also involved in their relation between force and displacement.

The simplest classical viscoelastic models are: the Maxwell model (spring and dashpot in series) and Kelvin–Voigt model (spring and dashpot in parallel). The Maxwell model, depicted in Figure 5, is characterised by the fact that both the spring and the dashpot experience the same force/stress, while the displacement/strain is the sum of the displacement of the spring and of the dashpot. The physical behaviour of this model is shown in Figure 5. In particular, if a displacement is applied at the initial instant  $t=0$ , the spring deforms instantaneously while the dashpot behaves like a rigid element since the incompressible fluid does not have the time to flow inside. Subsequently, the fluid inside the dashpot flows from one chamber to another of the dashpot. Since the total displacement must remain constant, the elastic deformation of the spring tends to decrease, and at the end the spring unloads. In the final state, a residual displacement remains.

In Figure 6, the creep function,  $C(t)$ , and relaxation function,  $R(t)$  for the Maxwell model are depicted. The first describes the evolution of the displacement over time, when a constant force is applied to the material; while the second represents the evolution of the internal force over time when a constant displacement is applied. Although the relaxation function, depicted in Figure 6, is acceptable to fit experimental data (but it is not the best possible fitting for many viscoelastic materials), the creep function disagrees with experimental evidence, because the strain increases linearly indefinitely, as it may be observed in Figure 6. For this reason,

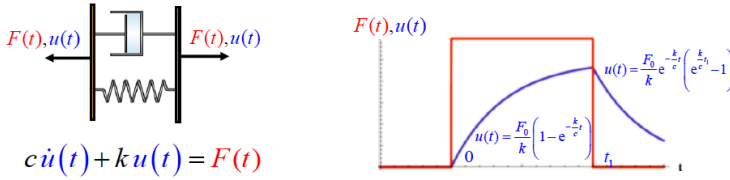


Fig. 7 - Kelvin-Voigt model: force-displacement relationship, on the left, and force and displacement variations over time, on the right.

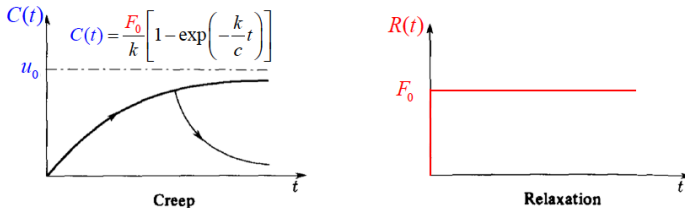


Fig. 8 - Kelvin-Voigt model: creep function, on the left, and relaxation function, on the right.

this model is not suitable to reproduce the mechanical behaviour of real viscoelastic materials.

The Kelvin Voigt model, see Figure 7, is the dual of the Maxwell one since the elements are connected in parallel. However, the physical behaviour is totally different compared to the Maxwell model. Indeed, for the Kelvin Voigt model the force in the spring and that in the dashpot are different from each other but the displacement of the two elements must be the same, as shown in Figure 7. It follows that when a force is applied the resulting displacement is not linear, and it slowly decreases to zero once the force is removed.

Differently from the Maxwell model, in this case, the creep function, depicted in Figure 8, can be considered acceptable to fit experimental data, although it is not the best choice for correct fitting. The relaxation function, instead, is totally in disagreement with experiments, because it is constant, see Figure 8.

The Maxwell and the Kelvin-Voigt models are not able to reproduce both the creep and relaxation behaviours. For this reason, other viscoelastic models composed of more elements have been developed. Indeed, by using more than two simple elements, it is possible to define viscoelastic mechanical models that are able to reproduce both the creep and the relaxation behaviour. Changing the way the springs and the dashpots are linked, different viscoelastic behaviours may be represented. The most common of these models are the three parameters Standard Linear Solid-SLS and Zener model, shown in Figure 9.

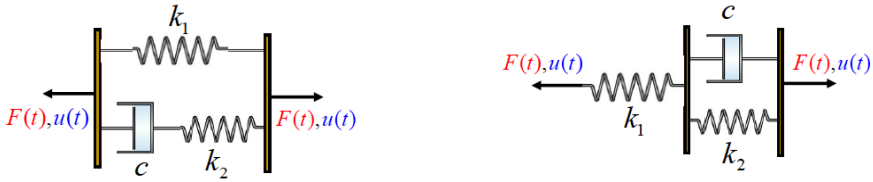


Fig. 9 - Relation between the restoring force and displacement: Standard Linear Solid model and Zener model.

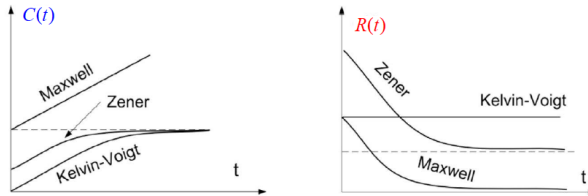


Fig. 10 - Schematic view for three models of creep function, on the left, and relaxation function, on the right.

For completeness, Figure 10 qualitatively compares the creep and relaxation functions pertaining to the Zener model with those of Maxwell and Kelvin-Voigt. Similar results are obtained for the case of the Standard Linear Solid model.

More complex models have been proposed in the literature that combine more than three elements between spring and dashpot. A complete description can be found in the paper by Younesian *et al.* (2019), where a comprehensive review of different theoretical elastic and viscoelastic foundation models in oscillatory systems is presented. Note that all classical mechanical models including various combinations of linear springs and dashpots always lead to differential equations of the integer-order. Moreover, these models show inconsistency in time-dependent properties, and also for the strong frequency-dependent of the loss factor (Praharaj and Datta, 2020).

#### Fractional models of viscoelastic materials

In engineering, mathematical models must describe a physical reality. In capturing viscoelastic behaviour, experimental tests play a fundamental role, since they allow to build up theoretical constitutive laws very useful for simulating their own behaviour. Therefore, the viscoelastic models must be able to capture the creep and relaxation functions obtained from laboratory tests, even more so when new materials must be used. Around the twenties of the 20<sup>th</sup> century, Nutting (1921) focused his attention on the study of the viscoelastic behaviour of materials. He conducted

several experiments which led him to assert that the two equations used to describe perfectly elastic solids and perfectly viscous fluids, apparently completely different, were in reality particular cases of a single general law. Furthermore, from the best-fitting of the experimental data, he realized that the deformation-time relationship was not well described by laws in which the dependence on the time variable was given by an exponential type function, as obtained by classical models, but rather the curve that interpolated the points well for every material (steel, concrete, polymers, glass etc.) must necessarily be a power law, and proposed the following law:

$$u(t) = at^n F^m \quad (1)$$

This equation expresses the law of variation of the displacement as a function of time as the applied force varies. The constants  $n$  and  $m$ , characteristic of the individual material, vary as the temperature varies. The constant  $a$  depends on the type of test. For  $n=0$  and  $m=1$ , the Hooke law is obtained, while for  $n=1$  and  $m=1$  the Newton-Petroff law is obtained. Furthermore, from the experimental results, Nutting observed that values of  $n$  ranged between 0.2 and 0.91, while those of  $m$  between 0.75 and 3.5. Values of  $n$  close to zero were characteristic of materials with solid behaviour, while values close to unity denoted behaviour more similar to the liquid state. Nutting's experiment and his observation showed how the classical models, even the most complex and elaborate ones, obtained as a combination of Maxwell and Kelvin-Voigt models, in which the relationship between the response and the time variable is of exponential type, are not adequate to simulate the real behaviour of the materials (Alotta, 2016; Colinas-Armijo, 2017). Indeed, equations involving the integer order derivative, for very long times, always lead to constant values for both the unit force and displacement imposed at the initial time. This contrasts with the physical phenomenon where the creep and relaxation functions are always monotonically increasing and decreasing, respectively.

Starting from the observation by Nutting, it can be proved that the creep function,  $C(t)$ , and relaxation function,  $R(t)$ , for unitary initial load and displacement, can be written respectively as:

$$C(t) = \frac{t^\beta}{C_\beta \Gamma(1+\beta)}, R(t) = \frac{t^{-\beta}}{C_\beta \Gamma(1-\beta)}; \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (2)$$

where  $\Gamma(\cdot)$  is the Euler's gamma function interpolating all factorials. In Figure 11, the creep and relaxation functions for different values of  $\beta$  are depicted. It should be emphasized that the creep and relaxation functions given in Eq. (2) do not violate the fundamental law of linear viscoelasticity (Mainardi, 2010):

$$C(s) R(s) = s^{-2} \quad (3)$$

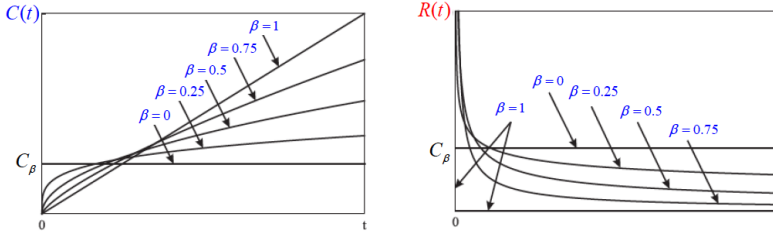


Fig. 11 - Creep, on the left, and relaxation functions, on the right, for  $C_\beta = 1$  and different values of  $\beta$  (Alotta, 2016).

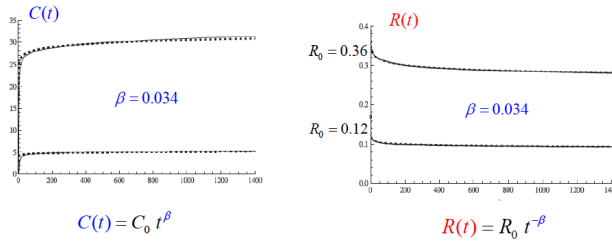


Fig. 12 - Comparison between experimental data for an elastomeric material: creep function, on the left, and relaxation function, on the right (Di Paola *et al.*, 2011).

where  $R(s)$  and  $C(s)$  are the Laplace transforms of  $R(t)$  and  $C(t)$ , respectively. On the contrary, all models that combine springs and dashpots (including the Prony series) violate it.

Di Paola *et al.* (2011) performed experimental tests for different kinds of elastomers evidencing the validity of relationships in Eq. (2). Some of these results are reported in Figure 12.

In order to derive the force-displacement relationships associated to the creep and relaxation functions given in Eq. (2), fractional calculus must be introduced (Mainardi, 2012; Alotta, 2016; Colinas-Armijo, 2017). Indeed, according to the Boltzmann superposition principle, it can be easily proved that, in the framework of linear viscoelasticity, the following force-displacement relationships are obtained:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= \frac{1}{C_\beta} {}^{RL}I_t^\beta \langle F(t) \rangle = \frac{1}{C_\beta} \left[ \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^t (t-\tau)^{\beta-1} F(\tau) d\tau \right], \quad \forall \beta \geq 0 \\
 F(t) &= C_\beta {}^C D_t^\beta \langle u(t) \rangle = \frac{C_\beta}{\Gamma(1-\beta)} \left[ \int_0^t (t-\tau)^{-\beta} \dot{u}(\tau) d\tau \right], \quad 0 \leq \beta \leq 1;
 \end{aligned} \tag{4}$$



where  ${}^{RL}I_a^{\beta} \langle \bullet \rangle$  and  ${}^cD_t^{\beta} \langle u(z,t) \rangle$  denote the Riemann-Liouville fractional integral and the Caputo fractional derivative, respectively.

In these equations, the coefficient  $C_{\beta}$  possesses anomalous dimensions  $[F t^{\beta} L^{-1}]$ . This fundamental intuition is attributed to Gemant and Scott Blair. In particular, based on further experimental data, Gemant (1936; 1938; 1950) suggested using fractional derivatives for the accurate description of the behaviour of some viscoelastic materials. Scott-Blair (1944; 1947; 1949) used the fractional calculus approach to analytically model the observations made by Nutting that the relaxation phenomenon could be described by fractional powers of time. He also noted that time derivatives of fractional order would simultaneously model the observations of Nutting on stress relaxation and those of Gemant on frequency dependence. Scott Blair and Caffyn (1949) introduced a force-displacement relationship containing the fractional derivative. Moreover, they introduced the element corresponding to this law, called springpot, which exhibits a behaviour intermediate between the spring and the dashpot, see Figure 13.

It is worth noting that, for the two limit values of  $\beta$ ,  $\beta = 0$  and  $\beta = 1$ , since the second term of Eq. (4) leads to  ${}^cD_t^0 \langle u(z,t) \rangle = u(t)$  and  ${}^cD_t^1 \langle u(z,t) \rangle = \dot{u}(t)$ , it follows that the purely elastic and the purely viscous behaviours are recovered, respectively. Thus, when  $0 < \beta < 1$ , both elastic and viscous phases are present simultaneously, and the viscoelastic behaviour is captured.

For multilayered viscoelastic materials, like the roadway pavement designed for the ‘‘Messina Strait Bridge’’, the entire cross section is composed by three different viscoelastic materials, see Figure 1: steel, pure resin and resin with sand and chipping. Even if the pure resin, due to its reduced thickness, plays a secondary role in the statics of the whole bridge it is a crucial component for the dissipation of energy when moving loads cross the bridge and when the bridge oscillates subjected to the action of wind. In the latter case, in fact, the entire volume of resin along the span of the bridge is involved.

It follows that to define the viscoelastic behaviour of the entire bridge, the various parameters  $C_{\beta}$  and  $\beta$  for all materials involved in the construction must be evaluated through creep and relaxation tests performed at different temperatures. These parameters, indeed, strongly depend on the temperature; in particular, for the sub-ballast, theoretical and experimental studies on refurbished asphalt showed that  $\beta$  increases with temperature, while  $1/C_{\beta}$  decreases significantly (Di Paola and Zingales, 2012; Colinas-Armijio, 2017). Since experimental tests at different temperatures are necessary for a correct modelling of roadway pads, the study of the dynamics of the deck and the comfort of passengers can be carried out via interval analysis by describing material parameters as interval variables bounded by the values pertaining to the maximum and minimum of the temperature.

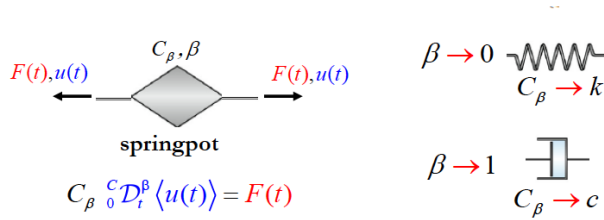


Fig. 13 - Fractional model: force-displacement relationship, on the left, and spring and dashpot elements as limit cases of the springpot, on the right.

### Conclusions

An excursus on various models to represent viscoelastic materials developed from the end of the 19<sup>th</sup> century until the last decades has been presented. In particular, it has been evidenced that the classical models, even complex ones, involving integer order derivative, are governed by exponential functions, that ensure acceptable approximation of the creep and relaxation functions, only for short times. For very long times, they always lead to constant values of creep and relaxation functions, in contrast to the physical phenomenon. It has also been highlighted that the force-displacement relationships based on fractional derivatives give a very good fitting of experimental tests even for long-time tests. Finally, it has been underlined that temperature has a fundamental role in characterizing viscoelastic materials.

### References

- Alotta G. 2016. *3D fractional viscoelasticity with applications to structural engineering*. Ph.D. thesis. University of Palermo, Italy.
- Boltzmann L. 1876. Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. *Annalen der Physik und Chemie*, 7, 624–657.
- Brancaleoni F., Diana G., Faccioli E., Fiammenghi G., Firth I.P.T., Gimsing N.J., Jamiolkowski M., Sluzka P., Solari G., Gianluca Valensise G., Vullo E. 2010. *The Messina Strait Bridge, A challenge and a dream*. Boca Roca: CRC Press/Balkema.
- Colinas-Armijo N. 2017. *Mechanical characterisation and 3D fractional viscoelastic modeling of railway sub-ballast rubberised asphalt*. Ph.D. thesis. University of Palermo, Italy.
- Di Paola M., Pirrotta A., Valenza A. 2011 Visco-elastic behavior through fractional calculus: An easier method for best fitting experimental results. *Mechanics of Materials*, 43, 799-806.
- Di Paola M., Zingales M. 2012. Exact mechanical models of fractional hereditary materials. *Journal of Rheology*, 56, 983-1004.
- Gemant A. 1936. A method of analyzing experimental results obtained from elastiviscous bodies. *Physics* 7, 311–317.
- Gemant A. 1938. On fractional differentials. *Phil. Mag.*, Ser. 7, 25, 540-549.
- Gemant A. 1950. *Frictional Phenomena*. New York: Chemical Publishing Company.

- Kelvin (Thomson W.). 1865. On the elasticity and viscosity of metals. Proceedings of Royal Society of London, 14, 75, 289-297.
- Mainardi F. 2010. *Fractional Calculus and Waves in Linear Viscoelasticity: an Introduction to Mathematical Models*. London: Imperial College Press.
- Mainardi F. 2012. An historical perspective on fractional calculus in linear viscoelasticity. *Fractional Calculus and Applied Analysis*, 15(4), 712-717.
- Muscolino G. 2014. Engineering Aspects of the Bridge. In: *A bridge to somewhere-The Tragedy of the Messina Strait Bridge* (E.P. Trani and D.E. Davis Eds.). 127-158. Manakin-Sabot: Library of Congress.
- Nutting P. G. 1921. A new general law of deformation. *Journal of the Franklin Institute*, 191, 679-685.
- Polk H., Jensen L., Serzan K.P., Yamasaki Y., *et al.* 2011. Messina Strait Bridge - Suspended Deck. In: *Taller, Longer, Lighter-Meeting growing demand with limited resources, IABSE-IASS London Symposium*.
- Praharaj R.K., Datta N. 2020. On the transient response of plates on fractionally damped viscoelastic foundation. *Computational and Applied Mathematics*, 39, 1-20.
- Scott Blair G.W., Caffyn J.E. 1949. An application of the theory of quasi-properties to the treatment of anomalous strain-stress relations. *The Philosophical Magazine*, 40 (300), 80-94.
- Scott-Blair G.W. 1944. Analytical and integrative aspects of the stress-strain-time problem. *Journal of Scientific Instruments* 21(5), 80-84.
- Scott-Blair G.W. 1947. The role of psychophysics in rheology. *Journal of Colloid Science*, 2, 21-32.
- Scott-Blair G.W. 1949. *Survey of General and Applied Rheology*. London: Pitman.
- Voight W. 1892. Uber innere reibung fester korper, insbesondere der metalle. *Annalen der Physik*, 47, 12, 671-693.
- Younesian D., Hosseinkhani A., Askari H., Esmailzadeh E. 2019. Elastic and viscoelastic foundations: a review on linear and nonlinear vibration modeling and applications. *Nonlinear Dynamics*, 97, 853-895.
- Winkler E. 1867. *Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkei*. Prag: Dominicus.

# *Spunti di riflessione per la discussione*

Mario Como

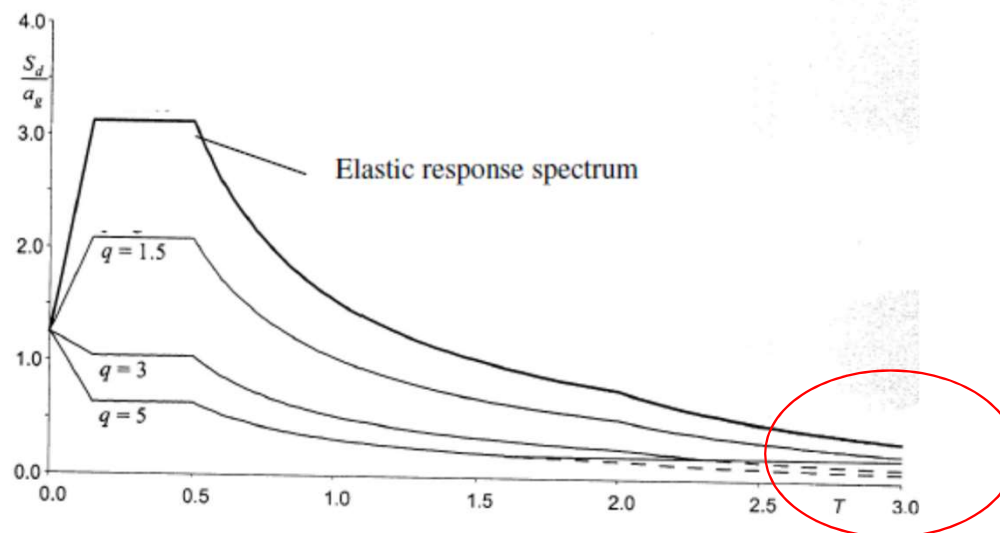
Ringrazio i professori Salvatore d'Agostino e Francesca Romana d'Ambrosio che mi hanno chiesto di esprimere le mie riflessioni sul progetto, prima presentato, del grande ponte sullo Stretto di Messina. Si tratta di un'opera straordinaria, una grande sfida dell'ingegneria civile di oggi.

Esprimerò brevemente, con semplicità, le mie riflessioni in merito illustrando i problemi risolti e quelli che, a mio avviso, richiederebbero ulteriori approfondimenti.

## Risposta al sisma del ponte

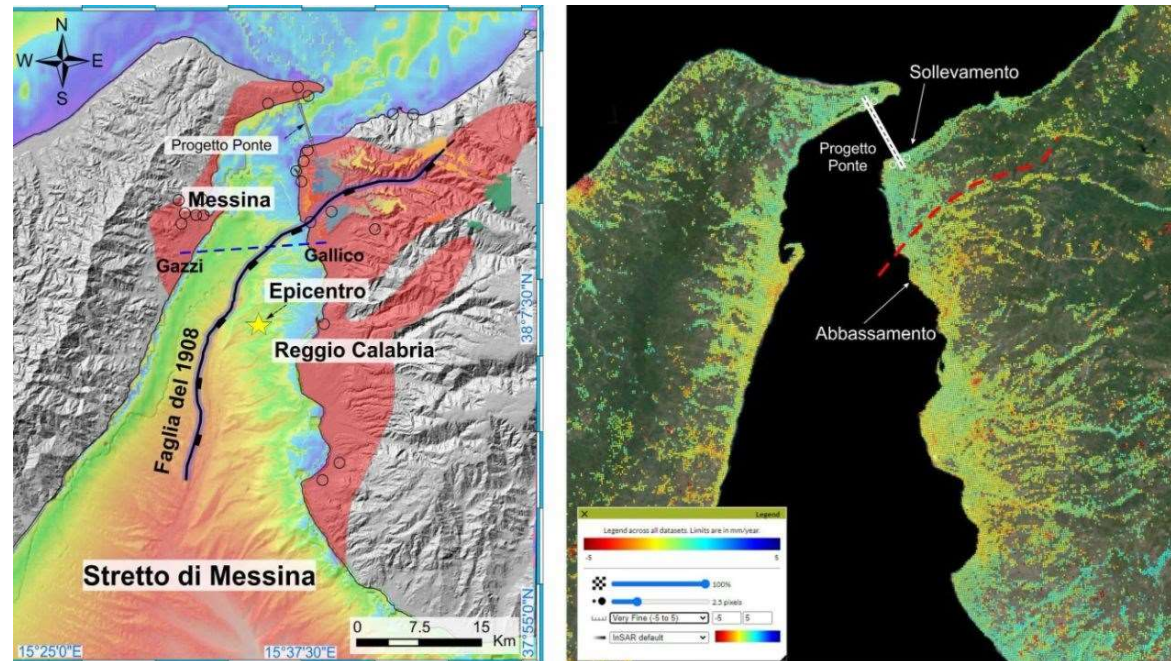
Il ponte ha periodi fondamentali di oscillazione verticale e torsionale molto elevati:  $T_v = 16,7$  s,  $T_f = 12,3$  s e quindi impegna la zona molto bassa del ramo discendente dello spettro di risposta elastico. Per questo, dal punto di vista dinamico complessivo, il ponte risente poco del sisma e sarebbe in grado di sostenere l'azione di forti terremoti.

Un completamento delle verifiche svolte potrebbe essere quello degli effetti del sisma sulle armoniche superiori..



# PROBLEMI SISMICI LOCALI

La costruzione del ponte è effettuata nel luogo di maggior rischio sismico nazionale. Esercita perplessità la riscontrata presenza di faglie attive in prossimità della fondazione dal lato calabro della pila e degli ancoraggi



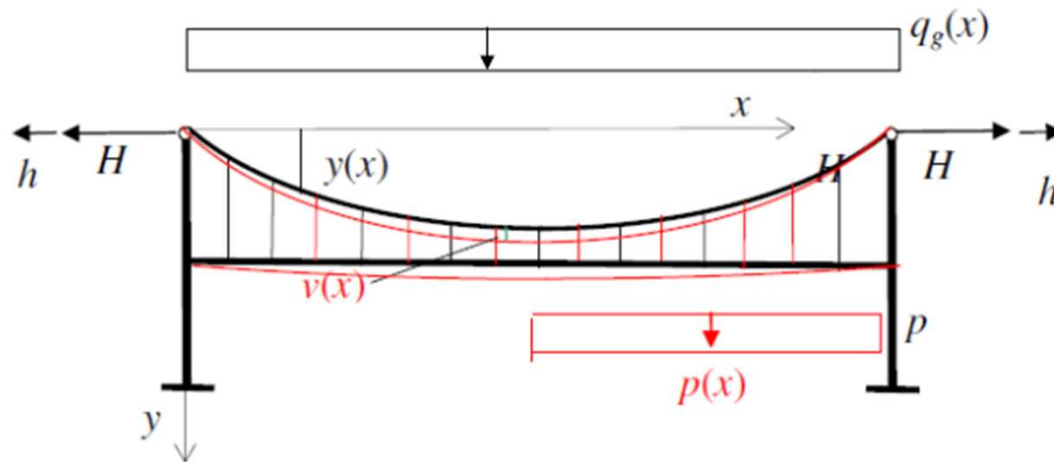
(Dal Consorzio Copernicus, dell'European Union's Space, the W fault)

## IL PROGETTO

Per discutere sulle caratteristiche del progetto del ponte occorre richiamare qualche notizia sul comportamento statico del ponte sospeso



E' la teoria statica che considera in rigore l'interazione tra travata e cavi di sospensione



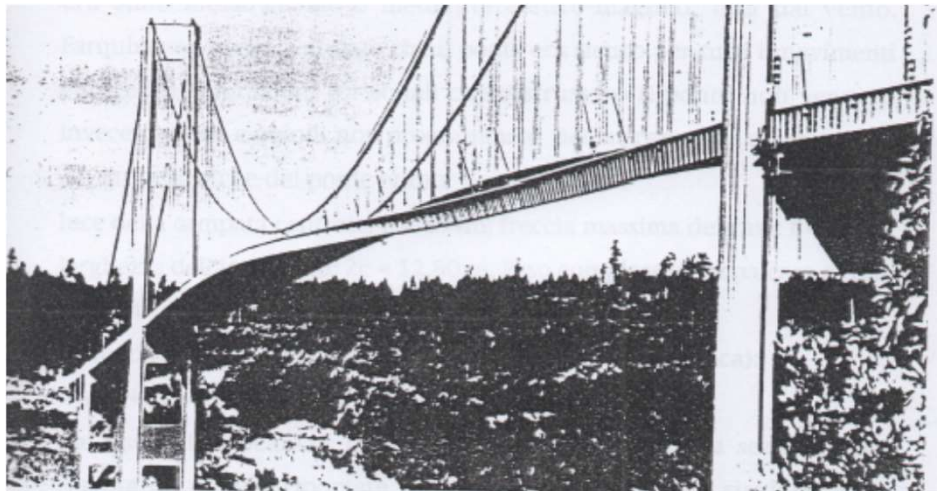
Configurazione da peso proprio  $y(x)$

Deformata aggiuntiva  $v(x)$  per effetto del carico addizionale  $p(x)$

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

**Se i cavi sono estensionalmente rigidi, o quasi, i momenti flettenti nella travata possono essere di lieve entità. La travata non richiede una forte rigidezza flessionale e quindi essere anche molto flessibile.**

I ponti costruiti dai primi del 900 al 1940 venivano progettati applicando il modello esatto di Melan. La rigidità della travata non risultava essenziale ai fini della staticità del ponte. Le travate risultavano sempre più sottili. Non si applicava l'aerodinamica allo studio del comportamento del ponte nel vento. L'azione del vento veniva assimilata a un carico statico.



$L = 840 \text{ m}$ ,  $h_{tr} = 2.40 \text{ m}$ ;  $h_r / L = 1/350$ ;  $B = 12 \text{ m}$ ;  $T_{oq} = 4.92 \text{ sec}$ ;  $T_{ov} = 6.49 \text{ s}$ ;  $F = 1.32$

# IL CROLLO DEL PONTE DI TACOMA

---



Il crollo del ponte di Tacoma fu uno shock per l'ingegneria strutturale. La teoria aerodinamica utilizzata per la progettazione delle ali degli aeroplani fu applicata ai ponti sospesi. Numerose furono le gallerie del vento realizzate ad hoc per lo studio dell'aerodinamica dei ponti di grande luce.

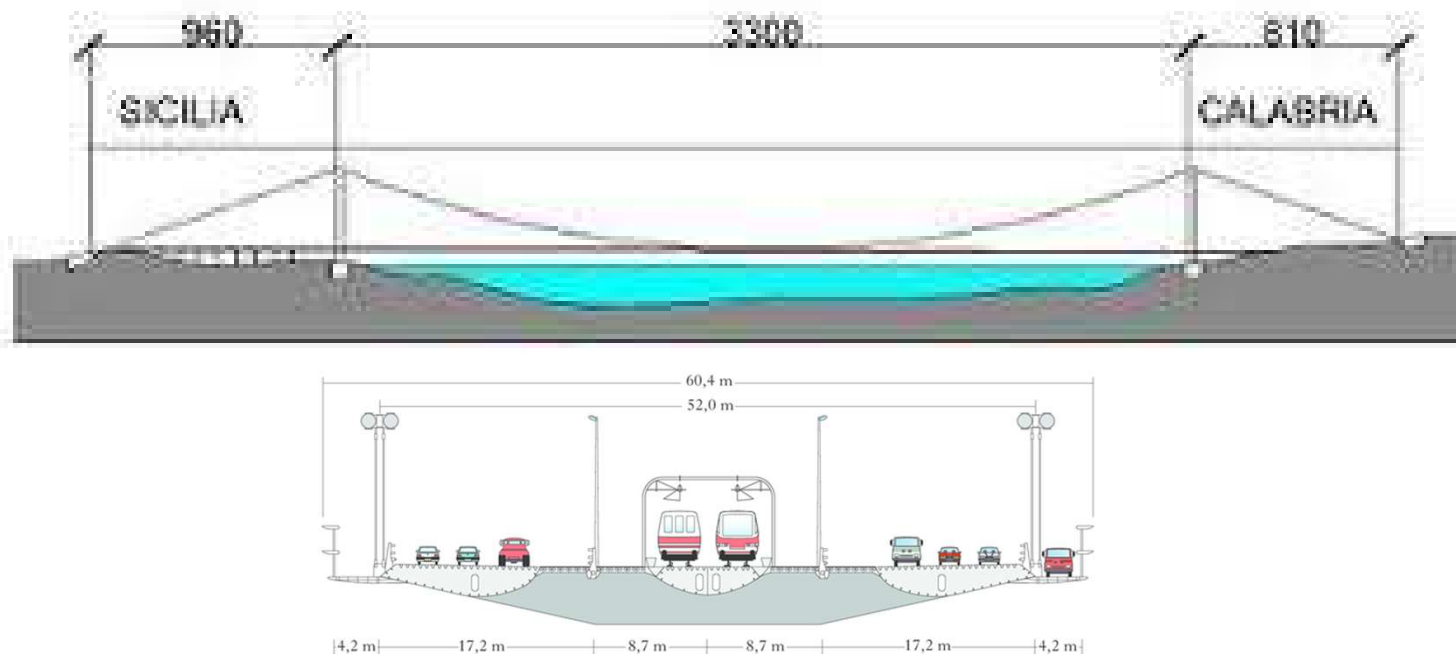
Molti dei precedenti ponti americani, quali il Golden Gate, il Whitestone ecc. furono sottoposti ad importanti lavori di rinforzo.

Il ponte di Tacoma fu ricostruito con nuovi criteri.

In Europa vennero realizzati ponti sospesi con travi sottili ma di grande rigidità torsionale

# IL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA

Il progetto (definitivo) del ponte sullo Stretto di Messina che il Governo italiano ha deciso di attuare ha luce  $L=3300$  m, altezza della travata è di circa  $2,635$  m e ha quindi un fattore snellezza pari a  $L/H = 1252$



# IL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



La travata è costituita da due lunghe strutture scatolari collegate trasversalmente da rigidi traversi. La sagoma della travata è in un certo senso trasparente al vento.



**Le prove aerodinamiche effettuate in Canada dall' Alan G. Davenport Wind Engineering Group hanno mostrato la buona resistenza al flutter della sezione della travata**

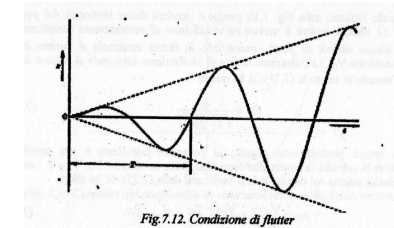
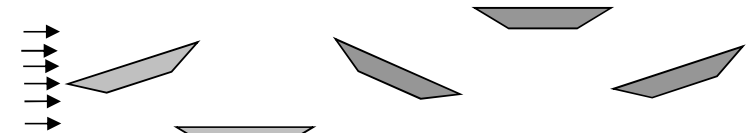
# RICERCHE SPERIMENTALI NELLA GALLERIA DEL VENTO



## Valutazione della velocità critica di flutter

Tabella 4.1 Velocità del vento critiche misurate per la sezione di impalcato in flusso calmo e turbolento. \*Per  $\eta = -4^\circ$  in flusso turbolento, le prove sono state interrotte a velocità del vento di fondo scala di 76 m/s in quanto la risposta del modello ha superato i limiti fisici di risposta fissati dalle pareti della galleria del vento.

|               |              | D1 Force            | D3 BLWTL            | D8 BMT                         |                                | D3 BLWTL                                     |                  |             |
|---------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|------------------|-------------|
|               |              | Assenza di traffico | Assenza di traffico | Assenza di traffico, schermo A | Assenza di traffico, schermo B | Treno e veicoli stradali, cassone sopravento | Veicoli stradali | Solo treno  |
| Flusso        | $\eta$ [deg] | $V_c$ [m/s]         | $V_c$ [m/s]         | $V_c$ [m/s]                    | $V_c$ [m/s]                    | $V_c$ [m/s]                                  | $V_c$ [m/s]      | $V_c$ [m/s] |
| calmo         | -4           | > 124 m/s           | > 114 m/s           | -                              | -                              | > 100 m/s                                    | > 100 m/s        | > 105 m/s   |
|               | 0            | 91 m/s              | > 120 m/s           | 108 m/s                        | > 118 m/s                      | 50 m/s                                       | > 100 m/s        | > 105 m/s   |
|               | +4           | 117 m/s             | 84 m/s              | -                              | -                              | 93 m/s                                       | 83 m/s           | 94 m/s      |
| turbolento    | -4           | 83* m/s             | -                   | -                              | -                              | -  | -                | -           |
|               | 0            | 81 m/s              | 99 m/s              | -                              | -                              | > 100 m/s                                    | > 99 m/s         | > 97 m/s    |
|               | +4           | 126 m/s             | -                   | -                              | -                              | -  | -                | -           |
| Requisito SdM |              | 75 m/s              |                     |                                |                                | 54 m/s                                       |                  |             |



# I REQUISITI DELLA SDM



In assenza di traffico:  $V_{cr} > 75$  m/s

In presenza di traffico:  $V_{cr} > 54$  m/s

Le prove in galleria e le relative valutazioni teoriche hanno confermato il rispetto del progetto delle prescrizioni richieste

Data la grande luce, nel progetto del ponte sullo Stretto il peso dei cavi è quasi equivalente a quello della travata. Ciò comporta un rapporto  $F$  tra il periodo di oscillazione verticale e quello torsionale molto basso, prossimo a 1,35, a differenza dei grandi ponti realizzati, Akashi, East River ecc. per i quali  $F > 2$

Di regola, valori bassi di  $F$  comportano bassi valori della velocità di flutter. La grande larghezza della sezione della travata e le sue studiate caratteristiche aerodinamiche hanno consentito di raggiungere gli elevati valori della velocità di flutter.

Durante le prove in galleria del vento sono state registrate forti vibrazioni indotte da distacco dei vortici

Le vibrazioni nell'impalcato registrate alla galleria del vento per distacco dei vortici hanno indotto gli stessi sperimentatori a suggerire l'inserimento di lunghe maglie perforate orizzontali tra il cassone ferroviario ed i cassoni stradali, allo scopo di trovare una configurazione degli schermi frangivento ottimale.

Sorge spontanea la domanda se tali lamiere perforate, da disporre lungo tutto il tratto compreso tra il cassone centrale di sostegno dei treni e quello laterale di sostegno dei veicoli, possano alterare la risposta della travata al flutter e peggiorare la risposta aerodinamica della sezione.

**Tale punto richiede necessari approfondimenti**



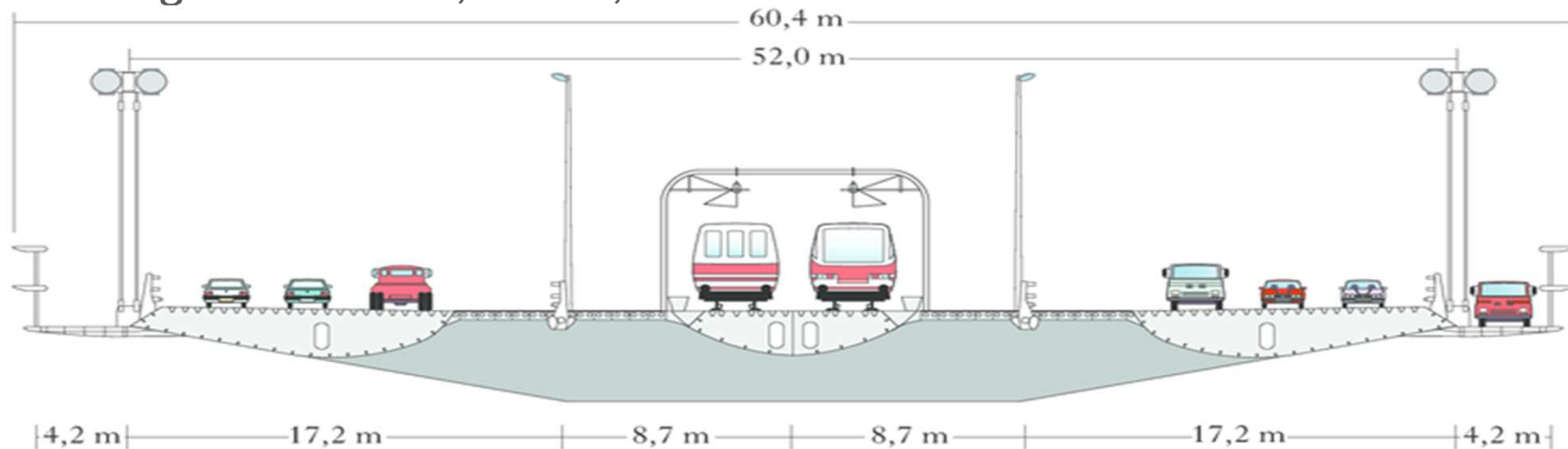
# PROVE AERODINAMICHE SUI CAVI ACCOPPIATI



Il ponte è sostenuto da due coppie di cavi portanti principali. Le prove di stabilità aerodinamica sono state effettuate su di un modello di cavi accoppiati in scala 1/33, presso la Galleria del Vento del laboratorio DLR (GERMANIA).

Le caratteristiche dei cavi accoppiati sono le seguenti:

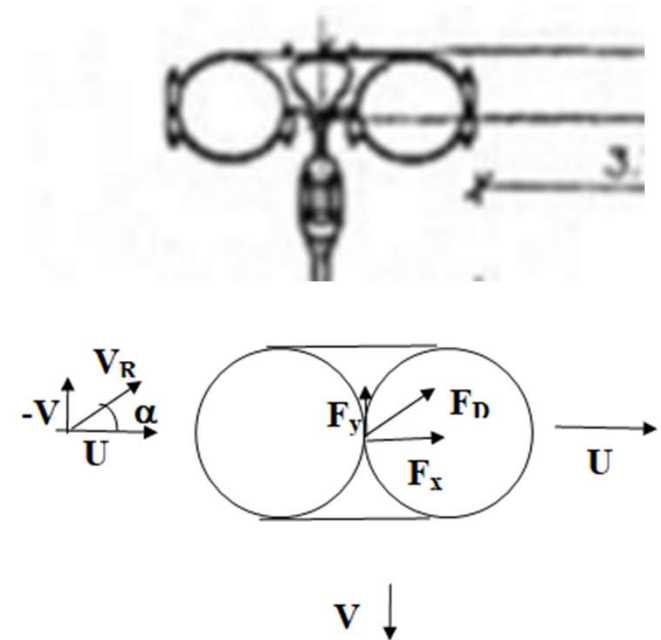
n. 347 funi/cavo - n. 127 fili/fune,  $\Phi = 5,4$  mm - sez. resistente 1 cavo portante,  $A=1,015$  m<sup>2</sup> - ingombro cavo,  $\Phi = 1,263$  m.



# PROVE AERODINAMICHE SUI CAVI ACCOPPIATI

Dall'elaborato pertinente risulta che in galleria del vento sono state registrate vibrazioni del cavo sottovento a causa del verificarsi del **galloping**, vibrazioni tanto gravi da richiedere l'interruzione della prova. Per ridurle, è stata solo ventilata la possibilità dell'inserimento di opportuni smorzatori senza alcuna specifica indicazione.

Il **galloping** è un caso di flutter ancora oggi poco studiato che impegna particolarmente i fili di trasmissione delle linee elettriche, particolarmente se ricoperti di ghiaccio. Sulla geometria circolare di un singolo cavo gli effetti del **galloping** sono poco rilevanti ma su geometrie più complesse, come quelle delle due sezioni circolari accoppiate, gli effetti del **galloping** si sono rilevati **estremamente elevati**



# PROVE AERODINAMICHE SUI CAVI ACCOPPIATI

---

I lunghissimi cavi accoppiati, del diametro di 1,26 m, che discendono dalla testa della pila, e quindi dalla altezza di circa 400 m, fino ad agganciarsi alla travata - investiti dal vento che, a quell'altezza, anche in giorni ordinari, può essere di forte intensità - sarebbero soggetti ad un fortissimo logoramento a fatica per il verificarsi del fenomeno del **galloping**.

Nel Novembre del 1972 un pilone del ponte strallato, il Lodemann Brucke, crollò a causa del **galloping** (Mahrenholtzm O., Bardowicks , H.,. Eroelastic Problems at masts and chimneys, Journal of Industrial Aerodynamics, 4, 261.272, 1979).

Le due coppie di cavi portanti , aventi la lunghezza di oltre 5 km, costituiscono la componente strutturale più rilevante del ponte. Evitare con certezza il prodursi del galloping costituisce un problema di non semplice soluzione. **Esso costituisce pertanto una seria criticità del progetto.**

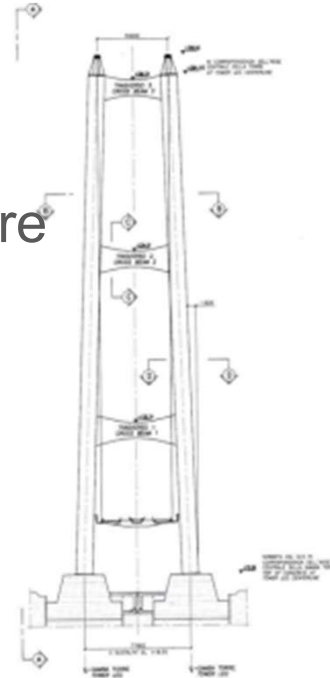
# PROVE DI STABILITÀ AERODINAMICA SULLE TORRE: H = 399 m



Le prove di stabilità aerodinamica sono state effettuate su modelli di torre realizzati e testati presso le gallerie del vento dei laboratori BMT (UK) e BWTL (Canada).

Le prove hanno individuato il manifestarsi del fenomeno di instabilità aerodinamica per distacco di vortici nel modello della Torre a scala 1:200, con lo sviluppo di forti vibrazioni. E' stata ipotizzata la necessità di progettare ed installare ben 16 smorzatori per ciascuna Torre, e di dover testare, in sede di Progetto Esecutivo, un ulteriore e nuovo modello a scala 1:100.

**Anche questo risultato costituisce una seria criticità del progetto e richiede ulteriori studi di approfondimento fino alla definizione della nuova soluzione progettuale.**



# IL PROBLEMA DELLA PERCORRIBILITÀ FERROVIARIA



E' un problema che ha sempre preoccupato i progettisti.

Qualche esempio

Il ponte sull'Humber (UK)



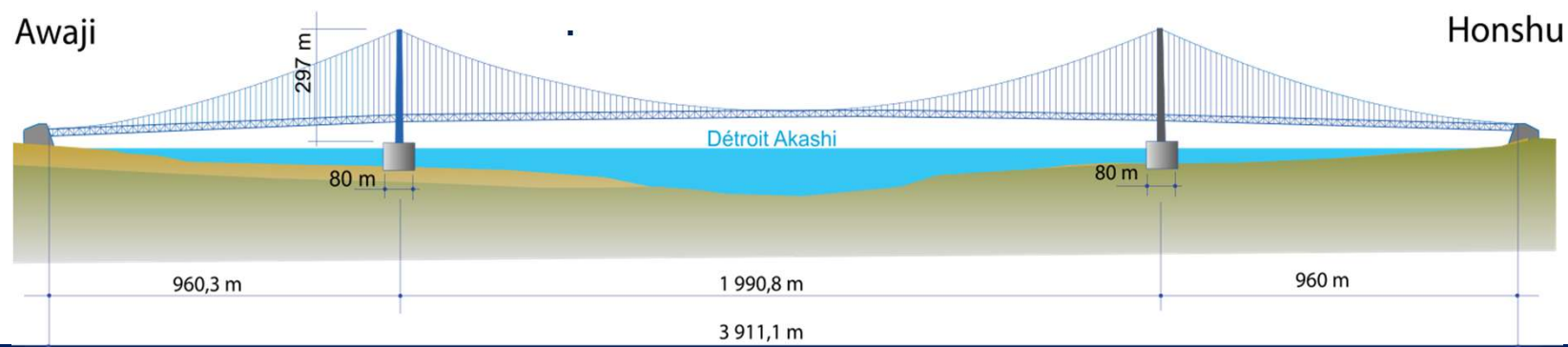
Il ponte sull'Humber (UK), con campata centrale  $L = 1410$  m, adibito a solo traffico veicolare, resta chiuso vari giorni all'anno e determina notevoli vincoli al passaggio di furgoni e camion di largo ingombro. Il ponte non è d'altra parte adibito, come detto, al traffico ferroviario.

# IL PROBLEMA DELLA PERCORRIBILITÀ FERROVIARIA

Il grande ponte sull' Akashi, in Giappone



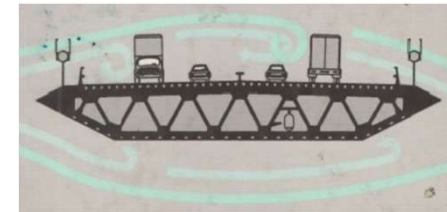
Il grande ponte sull' Akashi era stato inizialmente progettato per essere adibito sia al traffico stradale che a quello ferroviario con passaggio di questo all'interno della sezione reticolare, molto rigida, della travata. **A completamento dell'opera, i treni non sono stati fatti passare sul ponte ma su un tunnel eseguito sotto lo stretto, soluzione impossibile per lo Stretto di Messina.**



# IL PROBLEMA DELLA PERCORRIBILITÀ FERROVIARIA



Il ponte East Bridge sullo Store Belt in Danimarca



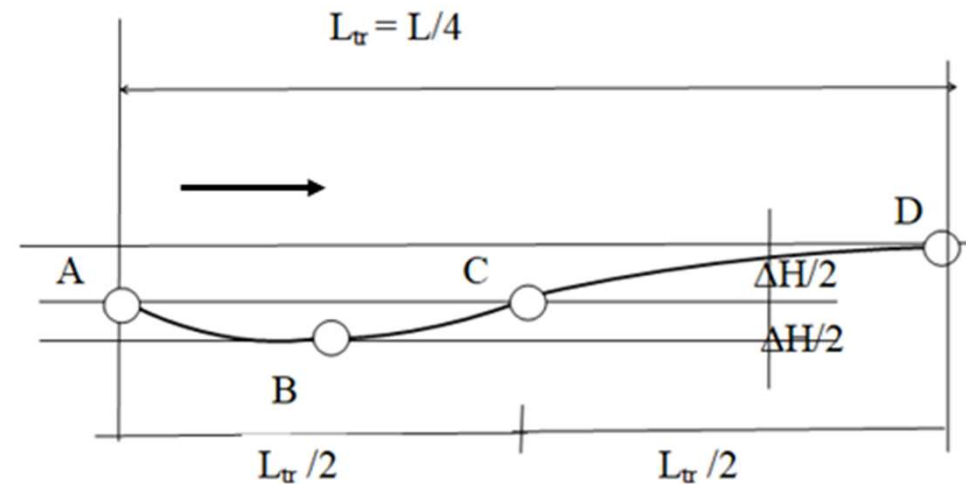
$L = 1624$  m,  $H$  sezione = 4,34 m, fattore snellezza  $L/H = 374$

**Sul ponte sospeso viene convogliato solo il traffico automobilistico, mentre i treni vengono deviati e spediti in un tunnel profondo scavato sotto il livello del mare.**

La verifica della percorribilità ferroviaria sul ponte: è effettuata considerando che il treno si muove sulla travata deformata.

Quando il treno passa sulla travata, si forma, davanti ad esso, un avvallamento ABCD, con una prima parte simmetrica ed una seconda parte tutta in risalita. I punti A e C sono alla stessa quota. La distanza verticale tra D e B è la freccia massima  $f = \Delta H = 10,5 \text{ m}$  (caso più critico). Il tratto AD è all'incirca pari alla lunghezza del treno, pari ad  $1/4$  della lunghezza di campata del ponte.

Nel percorrere il tratto incurvato della travata da A a C, della lunghezza di  $L_{tr}/2$ , i tratti in discesa e in salita si equivalgono e c'è quindi bilancio di energia. Per giungere in D, il treno deve salire lungo CD di  $\Delta H/2$ . La pendenza del tratto è uguale a:  
 $(f/2)/L_{tr}/2 = (f/2)/L/8 = (10,5\text{m} \times 4)/(3300\text{m}) = 1,27\text{‰}$ .  
 La pendenza in discesa è il doppio di quella in salita e vale  $2,54\text{‰}$ . Il carico stradale viene considerato uniforme su tutta la travata che quindi non si deforma.





## I limiti di deformabilità sui ponti delle Ferrovie italiane

---

Le Istruzioni Ferroviarie Italiane (RFI) indicano i limiti di deformabilità vigenti a dicembre 2011: l'inflessione ( $f$ ) non deve superare  $1/600 = 1,7\%$  della luce  $L$  ( $f < L/600$ )

Indicano anche delle deroghe per alcuni casi particolari.

La verifica, salvo deroghe, non risulterebbe soddisfatta

**L'analisi svolta è molto approssimata. Occorrerebbe perfezionarla e verificarla più approfonditamente.**

Pendenze trasversali

In generale un treno può stare fermo con pendenza trasversale del 10%.

Nel progetto, considerando la possibile rotazione trasversale della travata per effetto del vento, le pendenze trasversali risultano inferiori al 10%..

# CONCLUSIONI



Le criticità del progetto riguarderebbero a mio avviso:

- 1) **Sisma**: occorrerebbe approfondire l'esame dei rischi dovuti alla presenza di faglie attive in prossimità della fondazione della pila calabra.
- 2) **Distacco di vortici da tutte le zone aperte della travata.**
- 3) Il proposto inserimento di lamiera perforate per eliminare tale distacco potrebbe determinare la modifica del comportamento al flutter della sezione della travata e richiede quindi ulteriore studio.
- 4) **Verifica del comportamento al galloping dei cavi di sospensione. E' una criticità grave e va particolarmente approfondita.**
- 5) **Verifica del distacco di vortici dalle pile.**
- 6) **Verifica del criterio adottato per la valutazione della pendenza longitudinale che incontra il treno.** Il carico stradale andrebbe poi considerato distribuito anche a tratti sulla travata