

Introduzione

Uno dei capitoli senza dubbio più belli della storia dell'ingegneria strutturale riguarda la costruzione dei ponti di grande luce, sia con schema sospeso che strallato.

La storia dei grandi ponti può farsi iniziare nel 1826, data in cui fu terminata in Inghilterra la realizzazione del ponte sullo stretto di Menai. Progettato dall'ingegnere inglese Telford, esso aveva lo scopo di collegare l'isola di Anglesey con la terra ferma e presentava una campata centrale di 176 metri. Il ponte però ebbe vita molto breve: crollò infatti poco dopo la sua inaugurazione durante una tempesta di vento.

La storia dei ponti di grande luce cominciò quindi con un insuccesso. Altri ne seguirono e tutti più o meno attribuibili agli effetti di interazione del vento con tali tipologie di strutture.

In Europa molti ponti in ferro crollarono sotto l'azione del vento: l'Union Bridge sul Tweed a Berwick; il Brighton Chain Pier; il Monstrose Bridge in Scozia; il ponte di Nassau sul Lahn in Germania; il ponte di Roche Bernard in Francia. Anche negli Stati Uniti crollò nel 1854, sempre a causa di una tempesta di vento, il primo ponte sospeso del nuovo continente: il Wheeling Bridge sul fiume Ohio, progettato da Ellet e che presentava una luce della campata centrale di circa 110 metri.

Sia in Europa che negli Stati Uniti a quei tempi nessuna indagine specifica era richiesta per tenere conto a livello progettuale degli effetti del vento sui ponti, nè c'era ancora una qualche conoscenza acquisita del problema. Fu il crollo del Wheeling Bridge che diede l'avvio negli Stati Uniti alle prime analisi di dimensionamento dei ponti di grande luce tenendo conto dell'azione del vento. Sulla base di queste esperienze Roebling progettò con successo il primo ponte sul Niagara, realizzato nel 1855, ed il ponte misto sospeso-strallato di Brooklyn, realizzato nel 1883 sull'East River tra Manhattan e Long Island.

Appartengono a questo periodo storico le prime teorie di statica dei ponti sospesi e le prime applicazioni del calcolo strutturale, le quali cominciarono così ad affiancare l'intuizione e la modellazione pratica, fino ad allora unici strumenti concreti di progettazione.

La prima teoria sulla statica dei ponti sospesi risale al 1858 e fu formulata da Rankine. A partire da questa, (sulla base della quale venne progettato e realizzato nel 1903 il ponte sospeso Williamsburgh) attraverso l'applicazione da parte di Navier della teoria dell'elasticità e grazie anche agli studi di Castigliano, numerosi sono stati gli sviluppi fino ad arrivare alla teoria di Melan del 1888 che rappresenta tuttora un caposaldo fondamentale nell'ambito della progettazione dei ponti sospesi di grande luce. Inoltre, essa ha rappresentato il punto di partenza di numerosi studi successivi, condotti, tra gli altri, da Moisseif, Timoshenko, Steinman, Bleich.

Nel contempo, con l'ingegneria aeronautica che vedeva il suo nascere concreto dopo Leonardo, cominciarono a svilupparsi i primi studi di aerodinamica e le prime gallerie del vento. Nel 1883 Reynolds pubblicò un lavoro rivelatosi poi fondamentale per la caratterizzazione dei flussi laminari e turbolenti. Nel 1904 Prandtl formulò il concetto di strato limite e nel 1912 von Kármán caratterizzò in forma analitica il campo di moto nello strato limite e formalizzò la teoria della scia.

L'applicazione dei risultati acquisiti con la teoria di Melan portò alla realizzazione nel 1931 del ponte G. Washington sull'Hudson, caratterizzato da una luce della campata centrale pari a 1066 metri, e, nel 1933 del Golden Gate (con luce della campata centrale di 1280 metri).

Grazie quindi a tecniche di progettazione strutturale sempre più raffinate i ponti assunsero un carattere via via più snello e leggero. I rapporti tra l'altezza della travata e la luce centrale, *i.e.* la cosiddetta snellezza del ponte, e tra l'altezza e la larghezza della travata, *i.e.* la snellezza laterale, divennero così sempre più piccoli. Per il Golden Gate la snellezza originaria era dell'ordine di $1/168$ mentre la snellezza laterale era $1/47$.

A seguito di tali caratteristiche di leggerezza, il Golden Gate presentò in numerose occasioni oscillazioni causate dal vento che persistevano nel tempo e che raggiungevano ampiezze anche dell'ordine di due o tre metri.

Una struttura ancora più snella e flessibile fu quella del Tacoma Narrows Bridge, con luce della campata centrale sospesa di 853 metri, costruito nel 1940 sulla costa occidentale degli Stati Uniti su progetto di Moisseif. La snellezza longitudinale e laterale di questo ponte, ad una sola via di traffico e con impalcato a travi longitudinali in acciaio, erano infatti rispettivamente pari a $1/350$ e $1/72$.

La concezione strutturale del Golden Gate ed ancor più quella del successivo ponte Tacoma, opposta a quella del precedente Williamsburgh Bridge, si basava sul presupposto che la funzione primaria di sostentamento dei carichi dovesse essere affidata ai cavi. La travata flessibile, invece, aveva prevalentemente il compito di regolarizzare le deformazioni dell'impalcato.

Il ponte Tacoma era stato progettato per assorbire tutti i carichi di servizio

prevedibili, compresi quelli torsionali e laterali, questi ultimi rappresentativi, per i criteri di quel tempo, delle azioni del vento. Le deformazioni del ponte, *i.e.* gli abbassamenti e le rotazioni longitudinali e trasversali, valutate utilizzando la teoria di Melan, soddisfacevano poi gli standard dell'epoca imposti per l'esercizio stradale. Il ponte, però, non aveva la necessaria rigidità per contrastare le azioni dinamiche esercitate dal vento. La struttura, infatti, subito dopo la sua costruzione cominciò a mostrare frequenti oscillazioni verticali e dopo solo cinque mesi di servizio, durante una tempesta di vento di intensità non eccessiva (la velocità media del vento era dell'ordine di 50 km/h), cominciò improvvisamente ad oscillare torsionalmente in modo antisimmetrico con ampiezze crescenti e dopo qualche ora crollò.

Dopo tale disastro grande impulso ebbero gli studi sulla aerodinamica dei ponti. Gli studi aeroelastici compiuti per le costruzioni aeronautiche ed inerenti la dinamica dell'ala cominciarono ad inquadrarsi nell'ottica di applicazioni relative alla dinamica dei ponti di grande luce e consentirono di comprendere la natura dinamica dell'azione del vento sull'impalcato.

La travata di un ponte di grande luce, considerata la sua elevata deformabilità e leggerezza, può vedersi nei riguardi dell'azione del vento come un sottile nastro in grado di oscillare. Pertanto, oscillazioni della struttura possono aversi o per effetto della turbolenza presente nella corrente incidente o di quella che si genera a causa della struttura stessa immersa nel flusso, *i.e.* a seguito di fenomeni di scia, concreti nel distacco di vortici dal profilo dell'impalcato (fenomeno detto di *vortex-shedding*), che interagiscono con la struttura a fronte della sua deformabilità. D'altro canto, il fenomeno non stazionario più pericoloso che può occorrere per effetto di una corrente incidente è sicuramente il *flutter*. Quest'ultimo, come si puntualizzerà meglio successivamente, si verifica a seguito di una condizione di risonanza tra le forze aerodinamiche non stazionarie, prodotte dallo stesso movimento della struttura, e la struttura oscillante. Possono allora insorgere oscillazioni flessionali, torsionali o accoppiate, le quali, come nel caso del primo ponte Tacoma, possono presentare, sotto particolari condizioni di vento, ampiezza divergente.

Dopo il crollo del Tacoma Narrows Bridge, riconosciuto il ruolo fondamentale giocato dalla rigidità dell'impalcato nei riguardi dei complessi fenomeni di interazione vento-struttura, alcuni ponti già esistenti vennero rinforzati (è questo, ad esempio, il caso del Golden Gate e del G. Washington), mentre i nuovi vennero realizzati con travate molto più rigide. Tra i ponti costruiti in questo periodo si possono citare il ponte sul Tago vicino Lisbona e lo splendido ponte di Verrazzano posto all'ingresso della baia di New York. Quest'ultimo ha una campata centrale sospesa di 1298 metri, una snellezza pari a 1/180 ed una travata reticolare a sezione chiusa torsionalmente molto rigida.

Una nuova concezione progettuale, nell'ambito dei ponti sospesi di grande luce, si presentò con il ponte sul Severn, costruito in Inghilterra nel 1966 e caratterizzato da una luce centrale di 988 metri. La travata, invece che a struttura reticolare come generalmente accadeva nei ponti precedenti, fu realizzata chiusa a cassone con una sagoma molto rastremata e sottile. Pur essendo la snellezza del ponte molto prossima a quella del Tacoma, in particolare pari a $1/324$, la travata, vista la sezione a cassone, si presenta molto più rigida torsionalmente e con caratteristiche aerodinamiche tali da ridurre drasticamente le azioni trasversali di resistenza al vento. Sulla scia di tale nuova concezione vennero così di seguito progettati e realizzati il Little Belt in Danimarca nel 1970, il ponte sul Bosforo nel 1973, il ponte sull'Humber in Inghilterra nel 1981 con una luce di 1410 metri, il ponte sullo Jogyn in Cina nel 1990 con una luce di 1385 metri ed i ponti del Great Belt Link congiungenti le isole della Danimarca ed ultimati nel 1997.

Numerosi ed importanti ponti sospesi, tutti strettamente legati alla concezione classica di travata reticolare rigida e pesante, sono stati realizzati negli ultimi anni in Giappone come collegamento tra le isole Honshu e Shikoku, quali ad esempio il ponte Kanmon (con luce centrale di 712 metri) nel 1974 e quello di Hanaruto nel 1985 (con luce centrale di 876 metri). Il grande ponte Akashi Kaikyo, completato nel 1998 e con luce centrale di 1990 metri, rappresenta poi il ponte sospeso con la campata centrale attualmente più lunga al mondo.

In ritardo rispetto ai ponti di grande luce con configurazione sospesa, anche i ponti strallati hanno trovato notevole diffusione nel corso degli ultimi anni, dopo i primi tentativi effettuati prevalentemente in Inghilterra nell'Ottocento. In particolare, essi cominciarono ad essere realizzati sistematicamente solo dopo la seconda guerra mondiale e prevalentemente in Germania. Comunque, il primo moderno ponte strallato che segnò l'inizio del grande sviluppo di tale schema strutturale, è stato il ponte di Stromsund in Svezia completato nel 1956. Successivamente furono realizzati il ponte Fridrich Herbert sul Reno a Bonn (1967) e quasi contemporaneamente il ponte sul Reno a Rees.

Mirabili esempi estetici di ponti strallati, con disposizione a ventaglio degli stralli, sono il ponte di Normandia sulla Senna, il quale presenta una campata centrale con luce di 856 metri, ed in Giappone il ponte Tatara, con luce centrale di 890 metri. Quest'ultimo rappresenta attualmente il ponte strallato con la campata centrale più lunga al mondo. Per entrambi tali ponti, al fine di ridurre la resistenza trasversale della travata al vento, sono state utilizzate sezioni rastremate e sottili, con sagome praticamente assimilabili a quelle di corpi profilati.

L'ultima sfida lanciata nell'ambito della progettazione e costruzione dei ponti di grande luce è rappresentata dal ponte sullo stretto di Messina di imminente rea-

lizzazione, il cui schema progettuale prevede lo scavalco dello stretto con un'unica campata sospesa di 3300 metri.

I fenomeni di interazione vento-struttura che coinvolgono i ponti di grande luce hanno rappresentato negli ultimi anni un interessante settore di indagine e di sperimentazione. In questo contesto si inquadra il presente lavoro. In esso si propongono le generalizzazioni di alcune teorie e modelli analitici presenti in letteratura, oltre che un modello numerico in grado di caratterizzare il comportamento aerodinamico ed aeroelastico di tipiche sezioni da ponte non profilate.

Partendo dall'introduzione delle grandezze che definiscono il vento ed il suo carattere in generale turbolento (capitolo 1), si analizzano prima di tutto gli aspetti peculiari dell'aerodinamica dei corpi non profilati (capitolo 2) e successivamente quelli inerenti la risposta di strutture quali i ponti di grande luce e le relative condizioni critiche di stabilità nei riguardi del vento (capitoli 3 e 4).

In dettaglio, alla luce delle teorie di aerodinamica classica sviluppate in ambito aeronautico e brevemente richiamate, si analizzano, generalizzandoli al caso delle sezioni da ponte, gli approcci adottati nell'ambito dell'aerodinamica dei corpi tozzi. L'usuale approccio aeroelastico quasi-stazionario è generalizzato sia nel caso della formulazione indiciale che di quella nel dominio della frequenza, attraverso approssimazioni al secondo ordine sia rispetto al campo di moto del corpo che rispetto alle componenti turbolente di velocità del vento. In questo modo si caratterizzano termini aeroelastici di interazione fra le diverse componenti di spostamento della struttura, termini di interazione fra le componenti turbolente di velocità oltre che termini mutui fra gli effetti aeroelastici e quelli di *buffeting*. Utilizzando poi la conseguente caratterizzazione delle azioni aerodinamiche ed aeroelastiche agenti per effetto del vento su una struttura a prevalente carattere monodimensionale, quali sono i ponti di grande luce, se ne identificano le condizioni di instabilità dinamica (capitolo 3). In particolare, al fine di introdurre i differenti fenomeni di instabilità statica (divergenza) e dinamica (*flutter*) che possono occorrere a seguito dei processi di interazione vento-struttura, dapprima si considera il caso semplice di struttura monodimensionale rigida ed elasticamente vincolata, e successivamente si analizza attraverso un approccio multi-modale il caso di strutture a nastro, *i.e.* deformabili. Per queste ultime l'usuale approccio adottato, sia per identificare le condizioni di *flutter* che la risposta alle azioni di *buffeting*, è generalizzato tenendo conto della variabilità lungo l'asse della struttura delle derivate di *flutter*.

Partendo poi dalla caratterizzazione del comportamento flesso-torsionale dei ponti di grande luce sospesi e strallati (secondo modelli integro-differenziali ottenuti rispettivamente a partire dalla teoria di Melan e dal modello continuo di Como, Grimaldi e Maceri), si identificano le condizioni di instabilità di divergenza e di *flut-*

ter sia nei riguardi dei parametri fondamentali che caratterizzano la struttura, sia rispetto alle condizioni di velocità del vento incidente (capitolo 4). Dette condizioni sono generalizzate tenendo conto della variabilità delle derivate di *flutter* lungo l'asse dell'impalcato e nel caso in cui le derivate alla Scanlan di tipo H_4^* e A_4^* abbiano un effetto non trascurabile. Nell'ipotesi semplificatrice di sezione dell'impalcato di tipo profilato si presenta inoltre una analisi di sensibilità delle condizioni critiche di vento nei riguardi dei parametri costruttivi di inerzia del ponte.

Infine, con l'intento di ridurre e/o supportare l'analisi sperimentale, generalmente condotta in galleria del vento e necessaria per l'estrazione dei dati aerodinamici che consentono di utilizzare i modelli analitici detti, si presenta un modello numerico basato su una formulazione bidimensionale ai volumi finiti del problema fluido relativo alla zona circostante una sezione da ponte. Tale modello consente di simulare le azioni del vento stazionarie e non agenti sulla struttura e di valutare le corrispondenti derivate di *flutter* (capitolo 5). L'ottimo accordo dei risultati numerici ottenuti con i dati sperimentali e con le altre soluzioni numeriche disponibili in letteratura, sia per ciò che concerne prove di validazione su sezioni a geometria semplice che simulazioni condotte su sezioni reali da ponte (alcune sezioni dei ponti del Great Belt Link e le sezioni di progetto del ponte di Normandia), conferma che il modello detto può rappresentare un utile strumento di analisi nella progettazione dei ponti di grande luce.