

# FENOMENI AEROELASTICI NEI PONTI SOSPESI E RISPOSTA AL VENTO TURBOLENTO

Marco BOZZA \*

\* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

## EVOLUZIONE DELL'IMPALCATO NEI PONTI SOSPESI

L'evoluzione della concezione dell'impalcato per ponti sospesi di grande luce, a partire dal secolo scorso, ha riguardato, sostanzialmente, tre aspetti importanti:

- *Il ruolo dell'impalcato nella risposta strutturale globale, con la propria rigidezza flessionale e torsionale: nei primi ponti, e comunque per luci decisamente inferiori a 1.000 m, tale ruolo era infatti fondamentale, mentre esso viene meno importante all'aumentare della luce, tanto da rendere dominante e fondamentale quello della rigidezza dei cavi di sospensione. Il rapporto tra le due rigidezze (geometrica dei cavi / flessionale dell'impalcato) è dell'ordine delle centinaia per luci di 1.000 m e dell'ordine delle centinaia di migliaia per luci di oltre 3.000 m.*
- *Lo studio aerodinamico dell'impalcato al fine della minimizzazione delle forze di drag, cioè delle spinte aerodinamiche che si traducono in spostamenti orizzontali sottovento, e forze orizzontali trasmesse ai cavi. Da questo studio si sono ricercati i profili aerodinamici ottimali ai fini del drag.*
- *Lo studio aeroelastico dell'impalcato al fine della stabilità aerodinamica, con particolare riguardo al controllo del flutter.*

Per quanto riguarda questa evoluzione è possibile individuare tre generazioni successive di ponti sospesi di grande luce.

### Ponti sospesi di I generazione

Comprende i numerosi ponti con impalcato reticolare, costruiti in grande numero, soprattutto negli Stati Uniti, tra la fine dell'Ottocento e la prima metà del Novecento (Brooklyn 1883, Golden Gate, 1937), e, più recentemente, in Giappone (Ohnaruto 1985, Minami-Bisan Seto 1988). Questo tipologia di ponti ha luci tipiche che vanno da alcune centinaia di metri a poco più di 1.000 m. L'impalcato reticolare contribuisce sostanzialmente con la sua grande rigidezza flessionale e torsionale alla stabilità globale dell'opera. La sua grande resistenza al vento si traduce però in pesi molto elevati di tutte le strutture, e grandi deformazioni sottovento dell'impalcato stesso. Con la realizzazione del ponte giapponese Akashi-Kaikyo (1998), si è raggiunto quello che può considerarsi il limite estremo di luce per questa generazione di ponti. Esso, infatti, con una luce di poco meno di 2.000 m sconta, tuttavia, la notevolissima freccia laterale di oltre 30 m sotto l'azione del vento di progetto.

### Ponti sospesi di II generazione

Comprende i ponti con impalcato aerodinamico a cassone singolo, che per la loro forma furono spesso chiamati alari. Costruiti nella seconda metà del Novecento, specialmente in Europa (Severn 1966, Little Belt 1970, Humber Bridge 1981, Bosforo 1973), questi ponti hanno normalmente luci comprese tra i 1.000 e i 1.600 m. L'impalcato a cassone scatolare, già concepito per l'aerodinamica, offrendo una resistenza al vento più limitata, presenta anche minori deformazioni sottovento, è più leggero ed efficiente dal punto di vista strutturale. La rigidezza torsionale della sezione resta tuttavia elevata, e questo è un aspetto importante da considerare ai fini della stabilità dinamica. La sezione a cassone unico, infatti, non è intrinsecamente stabile e presenta problemi di instabilità aeroelastica crescenti al crescere della luce libera. Per grandi luci occorre allora aumentare l'altezza del cassone per avere maggiore rigidezza (4,5 m nel caso dell'Humber Bridge). Così facendo si ottiene però un profilo più tozzo che presenta maggiore resistenza al vento, ma con lo svantaggio di avere strutture molto pesanti. Inoltre, impalcato con profili tozzi sono soggetti al fenomeno del distacco di vortici (*vortex shedding*), con tutta una serie di problematiche che ne consegue. Si presenta quindi, anche per questa generazione, un limite di circa 2.000 m per la luce massima di utilizzo, un limite nel quale il contributo dell'impalcato alla stabilità globale tende a diventare insignificante.

### Ponti sospesi di III generazione

Questa generazione è stata inaugurata con il progetto del Ponte Sospeso sullo Stretto di Messina (attualmente la struttura non è stata ancora realizzata), nel quale la concezione dell'impalcato ha consentito un ulteriore aumento della luce. La sezione dell'impalcato è composta da cassoni multipli a profilo alare, separati da superfici trasparenti all'aria e dotati di adeguati accorgimenti aerodinamici. Esso non solo presenta una modestissima resistenza al vento, ma è anche intrinsecamente stabile nei confronti dei fenomeni di instabilità aeroelastica. Tutto questo con l'obiettivo di minimizzare all'origine i fenomeni pericolosi, invece di porvi rimedio con la resistenza strutturale. La stabilità dell'opera è affidata al sistema di sospensione in grado di fornire la rigidezza necessaria alla campata centrale di 3.300 m

## **EFFETTI AEROELASTICI D'INSIEME**

La risposta di una struttura ad un'azione esterna dipende, in generale, dalla sua tipologia e dalle caratteristiche specifiche che la definiscono (materiali, vincoli, ecc). Nel caso dei ponti sospesi, la risposta al vento dipende, essenzialmente, dal comportamento aerodinamico dell'impalcato, e in misura minore da quello delle torri e dal sistema di sospensione (cavi e pendini). Come primo elemento della struttura, l'impalcato trasmette ai cavi tutti i suoi carichi (peso proprio, carichi di utenza, azione eolica), condizionandone fortemente il dimensionamento. Per questo motivo l'impalcato è l'elemento chiave del progetto sul quale si concentra gran parte dell'attività di studio teorico e sperimentale.

In tale contesto assume un'importanza fondamentale minimizzare la resistenza al vento dell'impalcato ed ottimizzare la sua stabilità aeroelastica, dalla quale dipende anche la stabilità globale del ponte sospeso. Le caratteristiche aerodinamiche sono sintetizzabili mediante i coefficienti di resistenza, di portanza e di momento, che permettono di definire le azioni aerodinamiche sulla generica sezione. Le forme di instabilità che possono generarsi dipendono dalle derivate aerodinamiche, ovvero dalle derivate dei coefficienti di portanza e di momento, rispetto all'angolo di incidenza tra vena ed impalcato, oltre che dai parametri previsti dalla *Teoria Quasi-Statica Corretta*.

### **Instabilità per Galloping**

Questa instabilità si presenta con prevalente partecipazione del modo flessionale o torsionale dell'impalcato e delle torri del sistema di sospensione, e si manifesta per profili non assimilabili ad un profilo alare, ovvero prolungato nella direzione della vena. Il galloping può manifestarsi sia per profili con grande sezione frontale, sia anche per profili alari, quando questi presentino elevati angoli di incidenza.

### **Instabilità per Flutter**

È tipica dei profili alari, ed è originata dall'accoppiamento dei due primi modi, flessionale e torsionale, con deformate simili. Le relative frequenze vengono avvicinate dall'effetto associato all'azione del vento, il quale inoltre introduce energia nel sistema. In particolare l'instabilità da flutter si manifesta, per un profilo alare, se la frequenza del modo flessionale è minore a quella del modo torsionale. La velocità critica del vento per la quale può manifestarsi questa instabilità (velocità di flutter), è tanto più bassa quanto più vicine sono le frequenze dei modi flessionale e torsionale che possono accoppiarsi, e quanto più elevate (in valore assoluto) sono le derivate dinamiche. Diagrammi polari dei coefficienti con marcate pendenze e tratti a derivata negativa prefigurano, quindi, il pericolo di flutter.

### **Distacco dei vortici (vortex shedding)**

È una forma di eccitazione aeroelastica che si manifesta per quei profili che tendono a distaccare vena, come ad esempio impalcato di tipo non alare o superfici dove si possono avere distacchi locali di vena, come le gambe delle torri. Se la frequenza di distacco dei vortici si sincronizza con una delle frequenze naturali del ponte, si possono manifestare oscillazioni che non sono tali da portare al collasso la struttura (come nel caso del flutter), ma che condizionano comunque la resistenza a fatica e le condizioni di esercizio.

### **Eccitazione aerodinamica dovuta alla turbolenza**

La turbolenza caratterizza il vento quando la sua velocità ha intensità e direzione non costanti nel tempo: essa è soggetta a fluttuazioni stocastiche attorno ad un valore medio e di entità che aumenta all'aumentare della turbolenza. Le variazioni della velocità, in modulo e direzione, generano variazioni delle forze aerodinamiche che provocano oscillazioni del ponte attorno alla deformata definita dal valore medio del vento. Quanto più l'impalcato è intrinsecamente stabile (cioè dotato di smorzamento aerodinamico), tanto minore è l'intensità di queste oscillazioni. Per il corretto dimensionamento strutturale del ponte è importante valutare l'amplificazione dinamica degli sforzi a cui è soggetto. A tal fine, un importante indice che quantifica l'effetto della turbolenza è dato dal rapporto tra lo stato di sforzo valutato in condizioni dinamiche (ponte soggetto a vento turbolento), ed il corrispondente stato di sforzo valutato in condizioni statiche (ponte soggetto a vento laminare).

## **RISPOSTA STRUTTURALE AL VENTO TURBOLENTO**

L'analisi della risposta strutturale viene valutata calcolando la deformata statica del ponte e la risposta dinamica di quest'ultimo al vento turbolento in termini di spostamenti e accelerazioni della struttura. Il calcolo delle deformazioni statiche e dinamiche permette poi la valutazione degli sforzi in condizioni statiche e dinamiche, giungendo così a definire, per ogni punto di verifica della struttura, l'amplificazione dinamica delle sollecitazioni indotte dal vento rispetto ai valori calcolati staticamente.

Per affrontare le problematiche relative alla stabilità aeroelastica ed all'analisi della risposta al vento turbolento, si adottano delle metodologie che utilizzano sia modelli matematici, sia prove sperimentali in galleria del vento. In particolare si utilizzano modelli globali del ponte e modelli sezionali dell'impalcato. I profili dell'impalcato e delle torri vengono ottimizzate dal punto di vista aerodinamico realizzando dei modelli in varie scale. Tali metodologie vengono verificate e perfezionate mediante confronti con rilievi di campagna di prove al vero effettuate su ponti esistenti. Esse si possono riassumere nei seguenti punti.

### **Modellazione della struttura**

L'intera struttura viene schematizzata mediante un modello numerico tridimensionale completo ad elementi finiti, nel quale si adottano elementi di tipo *beam* per i cassoni, i traversi e le torri e di tipo *cable* per il sistema di sospensione ed i

pendini. Una prima analisi riguarda il calcolo delle frequenze naturali dei modi principali di vibrare. Questa analisi è importante per valutare se i primi modi, flessionale e torsionale, possano favorire l'instabilità per flutter.

#### **Generazione numerica della storia temporale del vento incidente**

Viene utilizzata una procedura numerica per definire una distribuzione spazio-temporale del vento agente sulla struttura, partendo dalle caratteristiche statistiche (scale integrali, correlazioni, indici di turbolenza, ecc.) misurate al vero sul sito.

#### **Definizione delle forze aerodinamiche generalizzate**

Il calcolo delle forze agenti sugli elementi costituenti il ponte (impalcato, funi e torri) viene eseguito utilizzando la Teoria Quasi-Statica Corretta, facendo uso delle *polari statiche* e dei parametri aerodinamici definiti da prove in galleria del vento. Le azioni così calcolate sono riferite alla generica sezione del ponte, e quindi dipendono dalle componenti del vento e dal moto del ponte in quella sezione. Tali forze devono poi essere ridotte ai gradi di libertà della struttura, al fine di ottenere le forze generalizzate agenti sui nodi del modello ad elementi finiti del ponte.

#### **Risposta statica e dinamica del ponte**

Per calcolare il comportamento dinamico del ponte soggetto al vento turbolento, viene dapprima calcolata la deformata media del ponte soggetto a vento laminare costante pari al valore medio. La configurazione statica del ponte viene poi considerata come posizione iniziale per la successiva analisi dinamica al vento turbolento. Ciò consente inoltre la linearizzazione delle equazioni dinamiche, con notevole risparmio di tempo di calcolo.