

Una nuova definizione normativa del carico aerodinamico e del limite di stabilità al flutter per gli impalcati da ponte

Gianni Bartoli ^a, Claudio Mannini ^a, Francesco Ricciardelli ^b

^a CRIACIV/DICeA, Università degli Studi di Firenze

^b CRIACIV/DIMET, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

SOMMARIO

In questa memoria vengono presentate le analisi che sono state utilizzate come base per la stesura del capitolo delle nuove Istruzioni CNR-DT 207/2008 relativo al comportamento sotto vento degli impalcati da ponte, evidenziandone il fondamento teorico ed i limiti di applicabilità. In alcuni casi le strutture da ponte si rivelano molto sensibili al vento e il loro comportamento può essere estremamente complesso, per cui il tema richiede particolare attenzione e le conclusioni riportate in questa sede sono sicuramente rivedibili e migliorabili. I contributi in esame sono quelli relativi alla definizione del carico aerodinamico medio e del limite di stabilità per flutter, e si basano su una raccolta relativamente vasta di dati sperimentali, oltre che su risultati teorici. Per quanto riguarda il carico aerodinamico medio, le Istruzioni si prefiggono tre obiettivi principali rispetto all'Eurocodice 1: una semplificazione rispetto all'approccio troppo laborioso del documento europeo, l'eliminazione di una serie di specifiche che non sembrano essere confermate dai dati sperimentali e la correzione di quei valori che non risultano a vantaggio di sicurezza. È stato anche prudenzialmente affrontato il caso, molto complesso, degli impalcati affiancati. Per quanto riguarda la stabilità al flutter, le Istruzioni CNR tentano di colmare l'assoluto vuoto normativo lasciato dall'Eurocodice 1, con il cauto obiettivo di identificare possibili casi critici da studiare in maniera più approfondita, eventualmente con prove sperimentali in galleria del vento.

ABSTRACT

This paper discusses the approach to the response of bridge decks under wind proposed in the new CNR-DT 207/2008 Guidelines, and it underlines its background and limits. In some cases bridge structures are very sensitive to wind loads and their behaviour can be extremely complex. Therefore this subject requires particular attention and the conclusions drawn herein have to be considered as a first step towards a codifiable definition of wind loads on bridge decks. In particular, the mean aerodynamic load and the limit of flutter stability are dealt with in the CNR Guidelines. The approach suggested is based on a rather large amount of experimental data, as well as on theoretical results. Concerning the mean aerodynamic load, the CNR Guidelines have three main targets with respect to Eurocode 1: the simplification of an approach which is considered in a few cases too complex for practical application, the elimination of some provisions which seem not to be confirmed by the experimental data and a correction of some numerical values which turned out to be on the unsafe side. A first approach to the analysis of twin decks is also suggested. Concerning flutter stability, in the CNR Guidelines an attempt is made to cover a field which is not dealt with by Eurocode 1, with the purpose of identifying possible critical cases for which more investigations are needed, possibly through wind-tunnel testing.

PAROLE CHIAVE: CNR-DT 207/2008, Ponti, Coefficienti Aerodinamici, Flutter.

1. INTRODUZIONE

Gli impalcati da ponte sono strutture che possono risultare molto sensibili all'azione del vento. In particolare lo sono i ponti flessibili di luce medio-grande e le passerelle pedonali, soprattutto nei

confronti della risposta dinamica al vento turbolento, dell'eccitazione da distacco di vortici e dell'instabilità per flutter. Questi fenomeni presentano una natura molto complessa e sono difficilmente trattabili in un quadro normativo. Inoltre, la geometria di tali strutture è così varia che la definizione di una casistica esaustiva è ancora più complessa. Questo è il motivo per cui l'Eurocodice 1 (UNI EN 1991-1-4, 2005) non affronta tali problemi, suggerendo invece la consultazione di esperti o il ricorso a prove in galleria del vento. Sebbene tale cauto approccio sia giustificato, è tuttavia utile fornire al progettista degli strumenti semplici per capire quando un particolare fenomeno possa rappresentare un problema (rendendo necessaria una modifica del progetto o comunque indagini più specifiche e approfondite) oppure possa tranquillamente essere escluso, lasciando al vaglio degli esperti tutti i casi dubbi. È questo lo spirito ambizioso che anima la seconda parte di questo articolo, incentrata sulla stima del limite di stabilità per flutter.

La prima parte della memoria è invece dedicata alla ridefinizione operata nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 dei coefficienti aerodinamici medi di progetto per gli impalcati da ponte. Prendendo spunto dalla formulazione dell'Eurocodice 1 e basandosi su una raccolta relativamente ampia di dati sperimentali, sono stati perseguiti tre obiettivi principali. In primo luogo si è tentato di semplificare il laborioso approccio che caratterizza la normativa europea, che non appare giustificato data la notevole incertezza che pesa su una qualsiasi generalizzazione dei suddetti coefficienti di forza. In secondo luogo una serie di specifiche non hanno trovato alcun riscontro nei dati sperimentali e sono state eliminate. In terzo luogo, infine, sono stati modificati quei valori che non sono apparsi a favore di sicurezza. Inoltre, le Istruzioni CNR operano anche un primo cauto tentativo di proporre un metodo per il calcolo delle azioni dovute al vento nel caso estremamente complesso degli impalcati affiancati.

2. COEFFICIENTI DI FORZA

2.1. Impalcato isolato

I coefficienti aerodinamici degli impalcati da ponte dipendono fortemente dalla geometria della sezione trasversale e risultano molto sensibili a variazioni, anche modeste, di questa, così come alla presenza delle strutture di arredo quali grigliati, barriere, ringhiere, parapetti, etc.. L'attuale versione dell'Eurocodice 1 propone una definizione molto ambiziosa dei coefficienti medi di forza, che tuttavia non appare confermata dai dati sperimentali a disposizione degli autori. Per esempio, per i ponti a cassone, non appare possibile esprimere il coefficiente di forza nella direzione orizzontale C_{fx} (Fig.1) come una funzione ben definita dell'inclinazione della parete sottovento. Anche il tentativo di tenere conto in maniera quantitativa dell'angolo d'attacco dovuto alla pendenza trasversale dell'impalcato non sembra essere suffragato dai dati sperimentali. Per questo motivo, nel seguito si è preferito raggruppare tutti i dati sperimentali disponibili, provenienti da prove effettuate per angoli di attacco compresi fra -10° e $+10^\circ$.

Il coefficiente di forza in direzione orizzontale C_{fx} è normalizzato nelle Istruzioni CNR rispetto alla larghezza d , invece che rispetto all'altezza totale dell'impalcato h_{tot} (Fig.1), nonostante quest'ultima scelta risulti più naturale da un punto di vista fisico. Questo è dovuto al fatto che quasi tutti i risultati sperimentali sono originariamente riferiti alla lunghezza d e che tale parametro geometrico è di più facile definizione. La normalizzazione dei tre coefficienti rispetto allo stesso parametro dimensionale, inoltre, dovrebbe limitare la possibilità di errore nel calcolo delle forze prodotte dal vento. L'Eurocodice 1 propone una normalizzazione rispetto ad un'altezza equivalente dell'impalcato, che tiene conto del numero e della porosità di barriere e parapetti, il che appare, ancora una volta, una complicazione inutile, data l'estrema complessità del problema.

In Fig.2 i dati sperimentali a disposizione degli autori, relativi sia a prove in flusso uniforme che turbolento, sono confrontati con i valori proposti dall'Eurocodice 1, suddividendoli tra configurazioni di costruzione e di servizio e differenziandoli per tipologie strutturali. Sono anche stati evidenziati quei pochi punti che fanno riferimento a prove in galleria del vento su modelli di impalcato nei quali è stato simulato anche il traffico stradale. Si vede chiaramente come le curve proposte dall'Eurocodice 1 sottostimino in certi casi in maniera marcata i coefficienti di forza misurati sperimentalmente, soprattutto per la configurazione di servizio. In Fig.3 i valori proposti nelle Istruzioni CNR vengono confrontati con quelli dell'Eurocodice 1, e con le curve riportate dalle stesse Istruzioni per le sezioni rettangolari. Risulta evidente che distinguere fra configurazione

di costruzione e di servizio è estremamente difficile, per cui si è optato per fornire un'unica curva. Le Figg.4-5 ripropongono il medesimo confronto, normalizzando però curve e dati sperimentali rispetto alla larghezza d dell'impalcato.

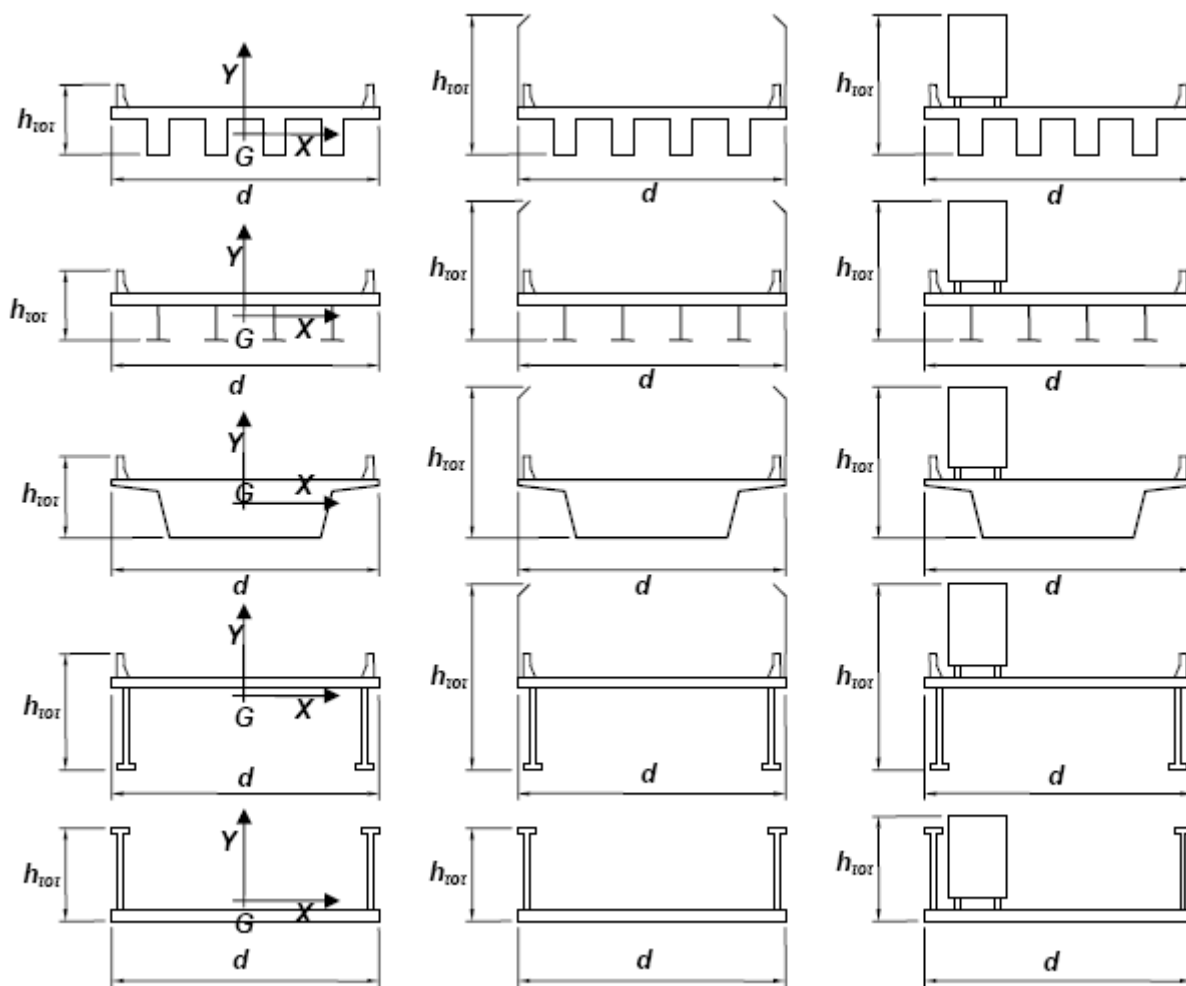


Figura 1. Tipologie di impalcati da ponte trattate nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008. I casi delle ultime due righe si riferiscono sia a travi ad anima piena sia a travi reticolari.

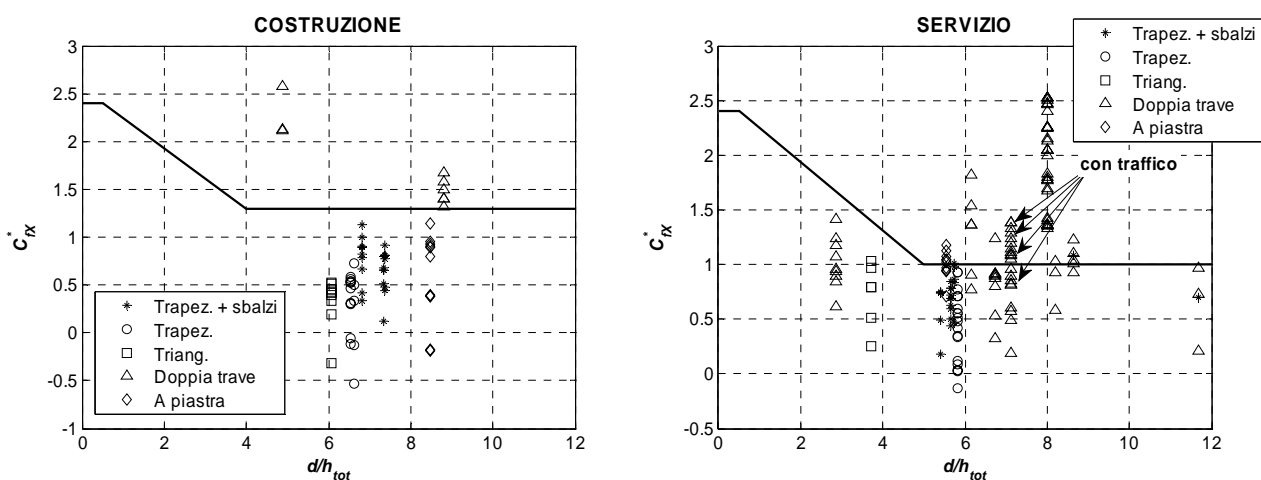


Figura 2. Confronto fra i coefficienti di forza in direzione orizzontale proposti nell'Eurocode 1 e una serie di dati sperimentali, in configurazione di costruzione e di servizio (C_{fx}^* , in accordo con l'Eurocode, è normalizzato rispetto ad una lunghezza che esprime l'altezza equivalente della sezione).

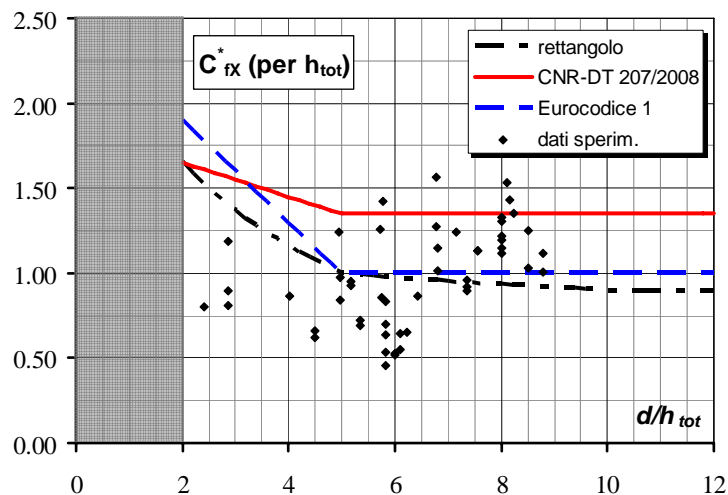


Figura 3. Confronto fra le curve riportate nell'Eurocodice 1 e quella proposta nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 per il coefficiente di forza in direzione orizzontale (C_{fx}^* , in accordo con l'Eurocodice, è normalizzato rispetto ad una lunghezza che esprime l'altezza equivalente della sezione). È riportata anche una selezione di dati sperimentali (per impalcati in configurazione di costruzione e di servizio, avendo escluso i casi meno significativi) e la curva relativa alle sezioni rettangolari.

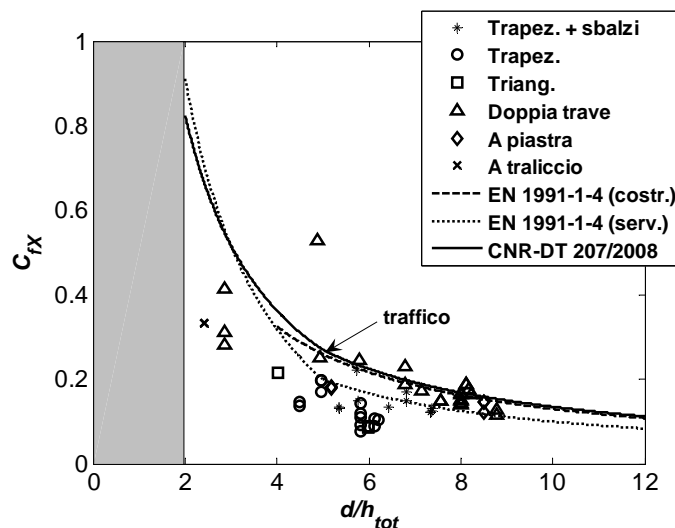


Figura 4. Coefficiente di forza in direzione orizzontale proposto nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 e confronto con una raccolta di dati sperimentali raggruppati per tipologie d'impalcato (C_{fx} è normalizzato rispetto a d).

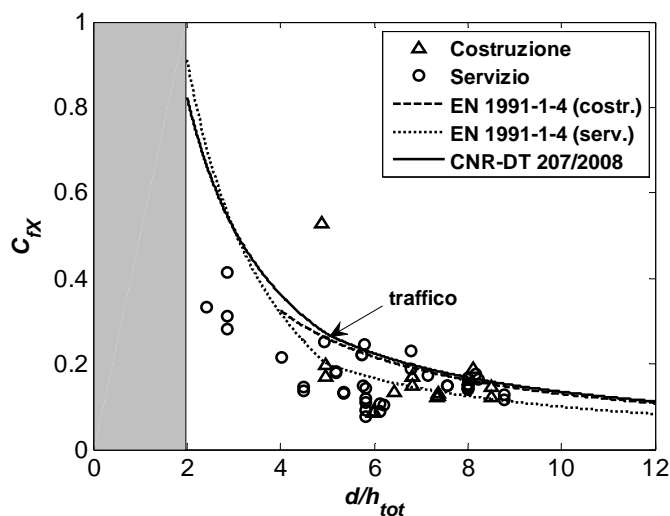


Figura 5. Coefficiente di forza in direzione orizzontale proposto nelle istruzioni CNR-DT 207/2008 e confronto con una raccolta di dati sperimentali suddivisi tra configurazione di costruzione e di servizio (C_{fx} è normalizzato rispetto a d).

La definizione del coefficiente di forza verticale (C_{FY}) fornita dall'Eurocodice 1 in funzione dell'angolo d'incidenza del vento ($0^\circ, \pm 6^\circ, \pm 10^\circ$) appare qualitativamente giustificata ma non sempre del tutto corretta dal punto di vista quantitativo, come mostra la Fig.6. In particolare, per angoli di attacco di $\pm 6^\circ$ e ancor più per angoli di $\pm 10^\circ$, i valori sperimentali in molti casi superano nettamente il limite previsto di ± 0.9 . Le Istruzioni CNR anche in questo caso semplificano le cose, fornendo una sola curva per qualsiasi angolo d'attacco e portando il suddetto limite a ± 1.2 (Fig.7). Una riduzione di tale limite è comunque prevista al variare di d/h_{tot} per valori di tale rapporto inferiori a 5.

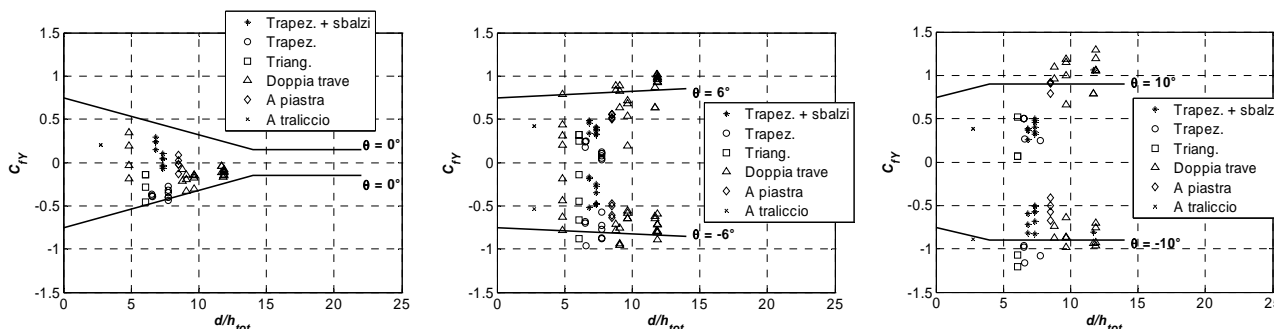


Figura 6. Confronto fra i coefficienti di forza proposti dall'Eurocodice 1 per angoli di attacco di $0^\circ, \pm 6^\circ$ e $\pm 10^\circ$ e una raccolta di dati sperimentali.

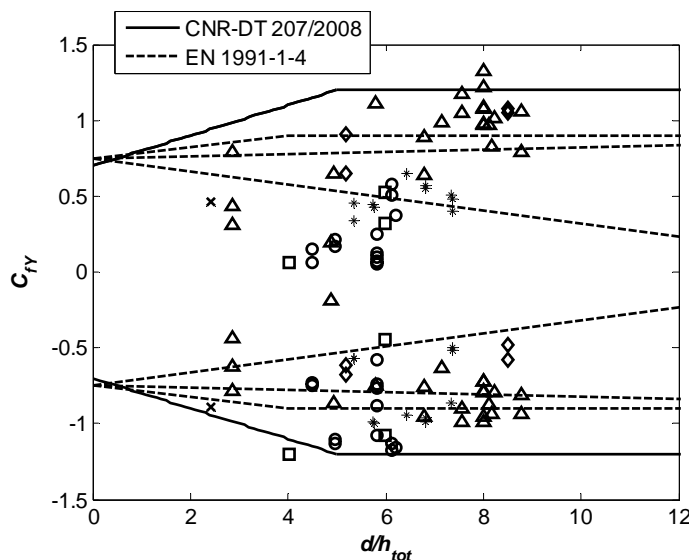


Figura 7. Coefficiente di forza in direzione verticale proposto nelle istruzioni CNR-DT 207/2008 e confronto con una raccolta di dati sperimentali (per i simboli vale la didascalia riportata in Figura 6).

Infine, risulta del tutto ingiustificata, ed in alcuni casi anche a sfavore di sicurezza, la definizione del coefficiente di momento (C_{MZ}) a partire da un'eccentricità di C_{FY} pari ad un quarto della larghezza dell'impalcato. Tale ipotesi deriva dalla teoria della lastra piana e dei profili alari sottili ma non risulta assolutamente valida per reali impalcato da ponte, come mostrano chiaramente i grafici sulla sinistra della Fig.8. Per questo motivo, nella CNR-DT i valori sperimentali dei coefficienti di momento sono stati riportati tutti assieme e si sono scelti valori costanti pari a ± 0.2 come ragionevole involucro (Fig.9).

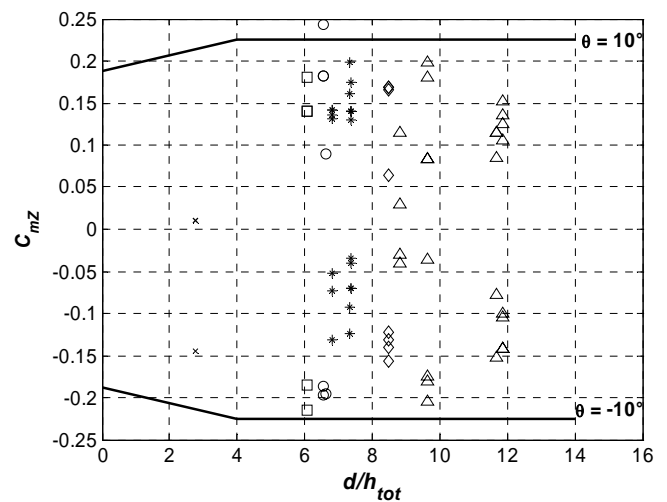
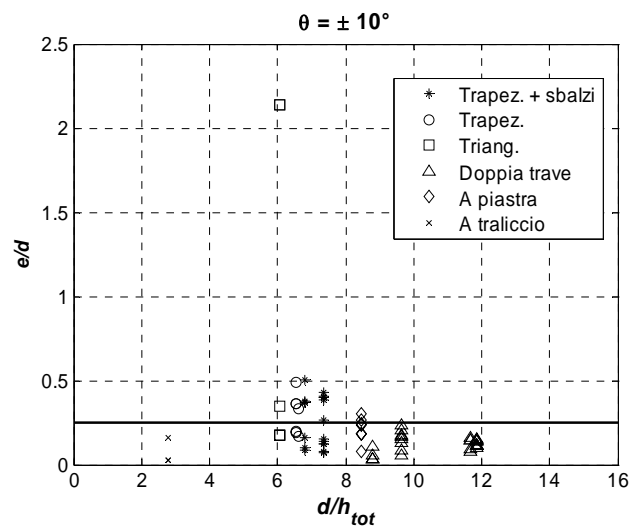
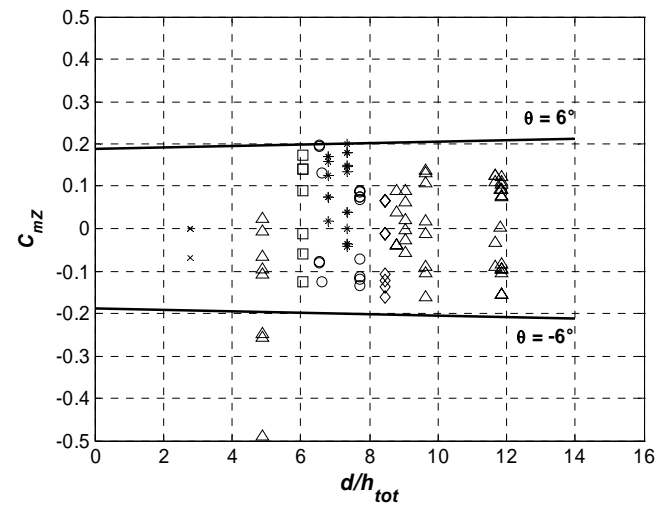
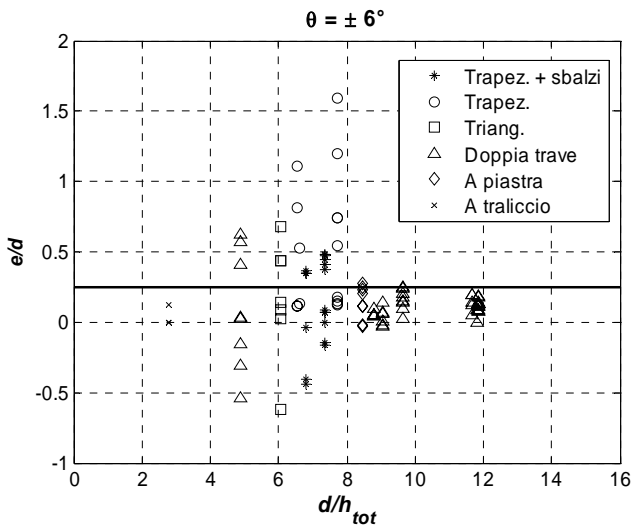
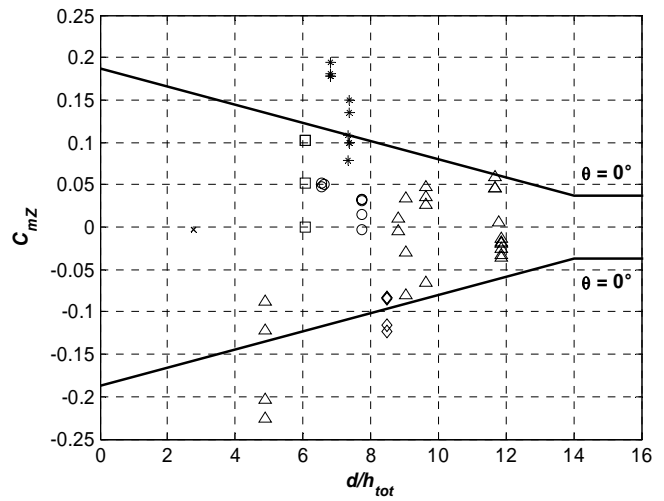
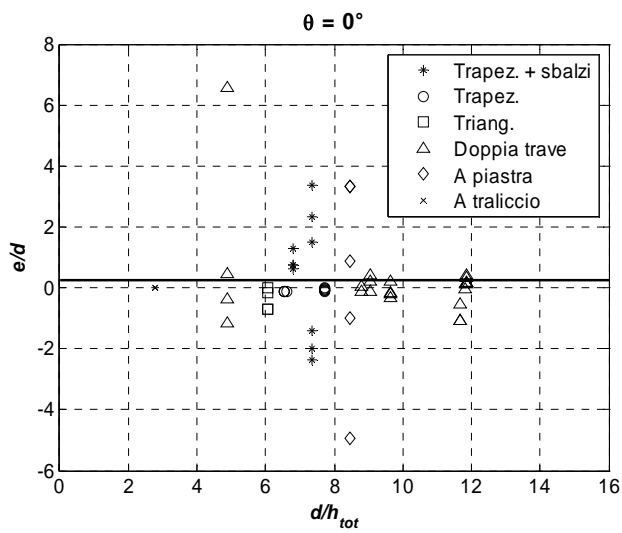


Figura 8. Confronto fra l'eccentricità della forza aerodinamica verticale (a sinistra) o il coefficiente di momento risultante (a destra), proposti dall'Eurocode 1, e una raccolta di dati sperimentali.

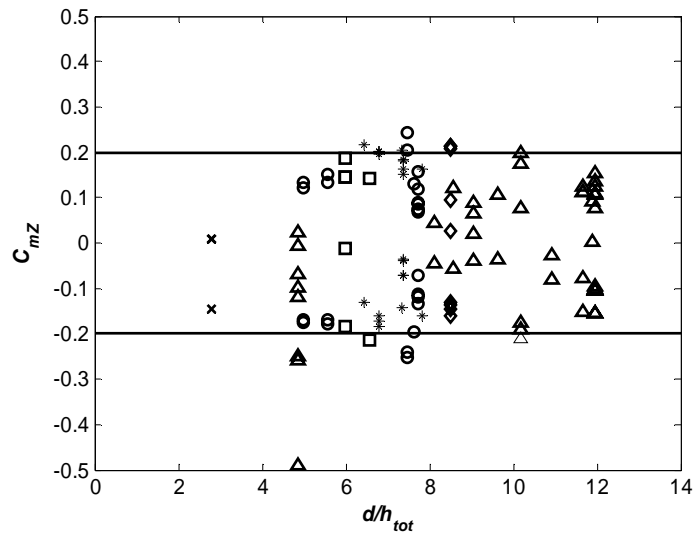


Figura 9. Coefficiente di momento aerodinamico proposto nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 e confronto con una raccolta di dati sperimentali (per i simboli vale la didascalia riportata in Fig. 8).

La Fig.10 riassume le curve proposte dalla CNR-DT per il calcolo dei coefficienti aerodinamici medi, mentre le Eqq.1-3 riportano le relative espressioni analitiche. Si noterà come per impalcati estremamente tozzi ($d/h_{tot} < 2$), data la totale assenza di dati sperimentali, il documento indica di far riferimento ai valori forniti per le sezioni rettangolari.

In ultima istanza, deve essere sottolineato il fatto che, mentre l'ingombro della sagoma fittizia dei convogli ferroviari è assunta nelle Istruzioni CNR pari a 4 m, esattamente come nell'Eurocodice, quella dei veicoli stradali è prevista pari a 3 m, invece dei 2 m specificati dal documento europeo.

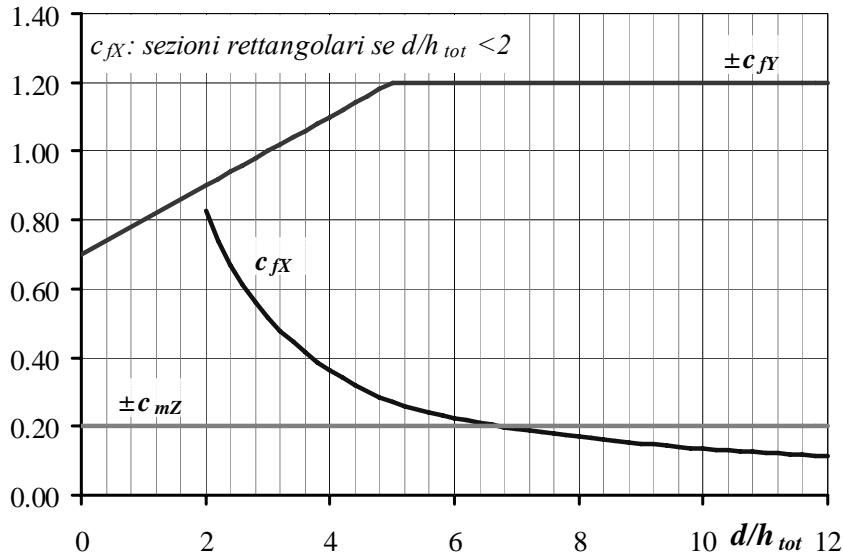


Figura 10. Diagramma riassuntivo dei coefficienti aerodinamici proposti nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 (i coefficienti sono tutti normalizzati rispetto alla larghezza d dell'impalcato).

$$c_{fX} = \begin{cases} \frac{1.85}{d/h_{tot}} - 0.10 & 2 \leq d/h_{tot} \leq 5 \\ \frac{1.35}{d/h_{tot}} & d/h_{tot} > 5 \end{cases} \quad (1)$$

$$c_{fY} = \begin{cases} \pm \left(0.7 + 0.1 \frac{d}{h_{tot}} \right) & 0 \leq d / h_{tot} \leq 5 \\ \mp 1.2 & d / h_{tot} > 5 \end{cases} \quad (2)$$

$$c_{mZ} = \pm 0.2 \quad (3)$$

2.2. Impalcati affiancati

Nel caso di impalcati affiancati di forma simile, nelle Istruzioni CNR si distinguono due casi a seconda dell'entità della spaziatura tra gli impalcati rispetto alla loro larghezza. Infatti, con riferimento alla nomenclatura di Fig.11, se:

$$\frac{d_0}{\max \{d_1, d_2\}} \geq \frac{1}{4} \quad (4)$$

allora ciascun impalcato può essere trattato come se fosse isolato. Qualora l'Eq.4 non sia soddisfatta, è necessario distinguere tra il caso di impalcati strutturalmente indipendenti (a meno di collegamenti in corrispondenza di pile o spalle) e quello di impalcati collegati strutturalmente (per esempio tramite traversi). Nel primo caso, come riportato nelle Eqq.5-7, si deve assumere la condizione più gravosa fra quella per gli impalcati supposti isolati (f_{X1}, f_{Y1}, m_{Z1}) e quella derivata dall'ipotesi di avere un unico impalcato di larghezza totale D (f_{X2}, f_{Y2}, m_{Z2}):

$$f_X = \max \begin{cases} f_{X1} \\ 0,75 \cdot f_{X2} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_Y = \pm \max \begin{cases} |f_{Y1}| \\ 0,5 \cdot |f_{Y2}| + \frac{|m_{Z2}| - |m_{Z1}|}{D_G} \end{cases} \quad (6)$$

$$m_Z = m_{Z1} \quad (7)$$

Infine, nel caso in cui sia presente un collegamento strutturale fra i due impalcati, f_Y e m_Z possono essere calcolati considerando l'insieme dei due impalcati come fosse un unico impalcato di larghezza D , mentre la forza f_X deve essere determinata come il massimo fra quella determinata in quest'ultima maniera e quella ottenuta considerando il solo impalcato sopravvento come isolato.

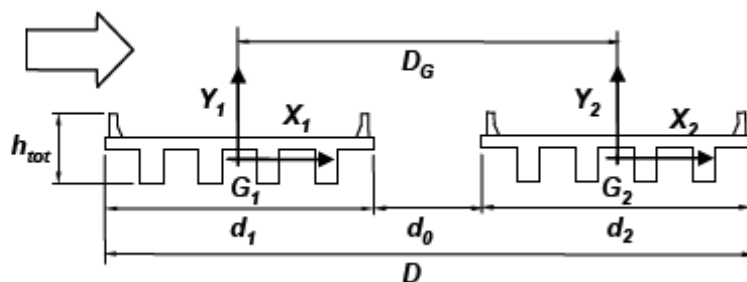


Figura 11. Dimensioni di riferimento per la valutazione delle forze aerodinamiche agenti su impalcati affiancati.

3. INSTABILITÀ PER FLUTTER

Nelle Istruzioni CNR-DT 207/2008 è stata inserita una sezione relativa alla verifica nei confronti dell'instabilità aeroelastica per flutter degli impalcati da ponte con luce fino a 200 m, il che costituisce una novità rilevante in campo normativo. Sulla base delle analisi discusse in Mannini (2006) e Bartoli & Mannini (2008) è stato possibile individuare dei limiti ai valori della velocità ridotta critica e del rapporto tra le frequenze suscettibili di accoppiamento entro cui il flutter a due gradi di libertà ed il flutter torsionale possano essere esclusi. In particolare, il flutter torsionale ad un grado di libertà può essere escluso qualora sia verificata la disuguaglianza:

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,l}}{d \cdot n_{1,M}} \leq 3 \quad (8)$$

dove $v_{m,l}$ è la velocità media del vento per un periodo di ritorno pari a dieci volte quello di riferimento e $n_{1,M}$ è la frequenza propria del primo modo di vibrare torsionale dell'impalcato. Tale specifica trova le sue ragioni nel fatto che difficilmente la velocità ridotta critica è inferiore a 3, anche nel caso di sezioni soggette al flutter torsionale, come si può vedere negli esempi riportati in Tab.1, dove h è l'altezza dell'impalcato al netto degli arredi, ζ_M indica lo smorzamento rispetto al critico del modo di vibrare torsionale, v_{cr} è la velocità critica e $v_{cr,red}$ è la velocità ridotta critica (ossia il rapporto tra v_{cr} ed il prodotto $d \cdot n_{1,M}$). I parametri dinamici per il modello sezione "Modello 2" sono riportati in Righi (2003) mentre per le altre strutture da ponte l'insieme dei dati è reperibile in Mannini (2006) e Bartoli & Mannini (2008). Infine, le derivate di flutter ("Aerodinamica") per il Tacoma Narrows Bridge sono state prese da Scanlan & Tomko (1971) mentre quelle relative alle sezioni rettangolari R10 e R5 possono essere trovate in Matsumoto (1996).

Tabella 1. Velocità critiche e velocità critiche ridotte per impalcati da ponte soggetti a flutter torsionale. Vengono combinate le proprietà aerodinamiche (derivate di flutter) delle sezioni specificate nella prima colonna con quelle dinamiche riportate nelle colonne successive.

Aerodinamica	Dinamica	d/h	h [m]	$n_{1,M}$ [Hz]	ζ_M [%]	v_{cr} [m/s]	$v_{cr,red}$
Tacoma	Modello2	0.208	0.2	7.700	0.55	6.9	4.5
Tacoma	Tacoma	0.208	12.0	0.200	0.50	11.5	4.8
R10	Modello2	0.100	0.2	7.700	0.55	12.1	7.9
R10	Tacoma	0.100	12.0	0.200	0.50	17.3	7.2
R5	Modello2	0.200	0.2	7.700	0.55	6.8	4.4
R5	Tacoma	0.200	12.0	0.200	0.50	10.0	4.2
R5	Tsurumi	0.200	38.0	0.486	0.50	58.4	3.2
R5	Tsurumi	0.200	38.0	1.020	0.00	124.0	3.2
R5	Tsurumi	0.200	38.0	1.020	1.00	128.3	3.3
R5	Guamà	0.200	14.2	0.649	0.80	49.5	5.4
R5	Guamà	0.200	14.2	1.655	0.00	101.0	4.3
R5	Guamà	0.200	14.2	1.655	1.00	132.4	5.6

Nel caso, invece, del flutter classico (flutter accoppiato a due gradi di libertà), la velocità critica può essere calcolata tramite la nota formula di Selberg (1961). Questa si basa sulle proprietà dinamiche dell'impalcato ma considera il comportamento aerodinamico di una lastra piana, corretta tramite un coefficiente β_F , detto parametro di efficienza aerodinamica (cfr. Selberg, 1961; Frandsen, 1966; Gimsing, 1997; Dyrbye & Hansen, 1997; Righi, 2003; Bartoli & Righi, 2004; Bartoli & Righi, 2006), che tiene conto dell'effettiva geometria della sezione da ponte. Nel dettaglio, le Istruzioni

CNR richiedono che siano soddisfatte le seguenti condizioni per poter escludere l'instabilità per flutter classico:

$$\frac{n_{1,M}}{n_{1,L}} \geq 1.5 \quad (9)$$

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,l}}{d \cdot n_{1,L}} \leq 20 \quad (10)$$

$$\frac{1.2 \cdot v_{m,l}}{d \cdot n_{1,M}} \leq 2.5 \cdot \beta_F \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{n_{1,L}}{n_{1,M}}\right)^2\right]} \cdot r \cdot \mu \quad (11)$$

dove i parametri adimensionali di massa r e μ sono definiti nella maniera seguente:

$$r = \sqrt{\frac{I}{m \cdot d^2}} \quad \mu = \frac{2 \cdot m}{\rho \cdot d^2} \quad (12)$$

Nelle precedenti equazioni $n_{1,L}$ è la frequenza propria del primo modo di vibrare di flessione verticale, m e I indicano rispettivamente la massa e l'inerzia di massa per unità di lunghezza dell'impalcato e ρ la densità dell'aria.

Tabella 2. Confronto fra i parametri di efficienza aerodinamica β_{reale} calcolati per varie strutture da ponte (vengono combinate le proprietà aerodinamiche delle sezioni specificate nella prima colonna con quelle dinamiche riportate nelle colonne successive) e quelli stimati con le Istruzioni CNR (β_F). Δ indica la differenza percentuale. $\gamma_\omega = n_{1,M}/n_{1,L}$ è il rapporto fra le frequenze dei due modi di vibrare considerati, mentre ζ_L e ζ_M rappresentano i loro smorzamenti rispetto al critico.

Aerodinam.	Dinamica	d/h	h [m]	$n_{1,L}$ [Hz]	γ_ω	ζ_L [%]	ζ_M [%]	β_{reale}	β_F	Δ [%]
R12.5	Tsurumi	0.080	38.0	0.204	2.38	0.50	0.50	0.861	0.60	-30%
R12.5	Tsurumi	0.080	38.0	0.204	5.00	0.50	0.50	0.858	0.60	-30%
R12.5	Guamà	0.080	14.2	0.331	1.96	0.00	0.00	0.801	0.60	-25%
R12.5	Guamà	0.080	14.2	0.331	5.00	0.00	0.00	0.783	0.60	-23%
R12.5	Guamà	0.080	14.2	0.331	1.96	1.00	1.00	0.697	0.60	-14%
R12.5	Guamà	0.080	14.2	0.331	5.00	1.00	1.00	0.678	0.60	-12%
R12.5	Modello1	0.080	0.38	5.870	1.41	0.18	0.28	0.864	0.60	-31%
R12.5	Modello2	0.080	0.20	3.900	1.97	0.16	0.55	0.819	0.60	-27%
Tsurumi	Tsurumi	0.096	38.0	0.204	2.38	0.50	0.50	0.930	0.52	-44%
Tsurumi	Indiano	0.096	22.4	0.573	2.06	0.20	0.20	0.997	0.52	-48%
R14.3F	Tacoma	0.070	12.0	0.130	1.54	0.50	0.50	0.981	0.63	-36%
R14.3F	Bosforo	0.070	28.0	0.161	2.29	0.50	0.50	1.015	0.63	-38%
R20	Normandia	0.050	23.8	0.220	2.27	0.20	0.50	0.965	0.70	-27%
R20	Modello1	0.050	0.38	5.870	1.41	0.18	0.28	0.879	0.70	-20%

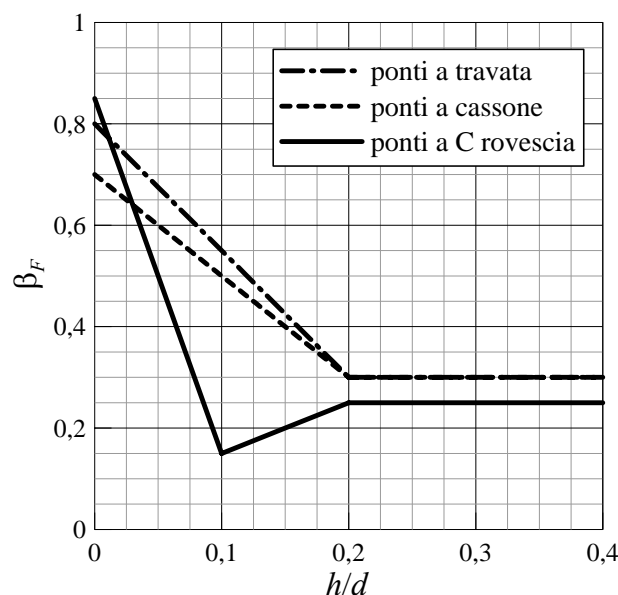


Figura 13. Valori proposti per il parametro di efficienza aerodinamica β_F .

L'Eq.11 rappresenta la formula di Selberg corretta con il parametro di efficienza aerodinamica β_F , mentre l'Eq.9 impone la condizione che il rapporto fra le frequenze dei modi suscettibili di accoppiamento non sia troppo vicino a uno: infatti, è ben noto che questa formula, così come altre simili (Bartoli & Mannini, 2008), ha validità solo nel caso di una sufficiente separazione fra le frequenze. Inoltre, un rapporto fra le frequenze molto vicino all'unità identifica una condizione di particolare suscettibilità al flutter classico, che richiede di essere studiata con attenzione. La condizione imposta dall'Eq.10, infine, richiede che per il sito e la struttura in esame non sia possibile raggiungere velocità ridotte particolarmente alte, il che costituisce una situazione di particolare vulnerabilità nei confronti di tale fenomeno di instabilità aeroelastica.

I valori proposti per il parametro di efficienza aerodinamica sono riportati in Fig.13 per alcune comuni tipologie di impalcato, in base al rapporto fra l'altezza e la larghezza della sezione h/d , in parziale analogia con quanto reperibile nel documento dell'ECCS (1987), che si distingueva per una sorprendente audacia in materia di comportamento aeroelastico dei ponti. La validità dei valori proposti è testata in Tab.2, dove è riportato l'effettivo parametro di efficienza aerodinamica rispetto al caso della lastra piana per una serie di sezioni da ponte, associate a diversi valori dei parametri dinamici, e poi confrontato con i valori riportati dalle Istruzioni CNR. Questi ultimi risultano essere sempre inferiori e quindi a vantaggio di sicurezza. In particolare, le derivate di flutter per le sezioni rettangolari R12.5 e R20 sono reperibili in Matsumoto (1996), quelle per lo Tsurumi Fairway Bridge in Singh et al. (1995) e quelle per la sezione rettangolare con carenature semicircolari R14.3F in Chowdhuri & Sarkar (2004). I parametri dinamici per i modelli sezione "Modello 1" e "Modello 2" sono stati presi da Righi (2003), mentre quelli per le altre sezioni da ponte sono riportati in Mannini (2006) e in Bartoli & Mannini (2008).

4. CONCLUSIONI

Questa memoria mira a chiarire le motivazioni e lo spirito delle scelte operate nella stesura delle Istruzioni CNR-DT 207/2008 in materia di aerodinamica ed aeroelasticità degli impalcati da ponte. In particolare, sono stati messi in risalto i limiti dell'Eurocodice 1 riguardo alla definizione delle forze aerodinamiche medie e i tentativi fatti per superarli. Ciononostante, la definizione data dei coefficienti di forza dovuti al vento è ben lungi dall'essere ottimale e definitiva. Questa infatti si fonda su una raccolta relativamente ampia e sfaccettata di dati sperimentali, relativi sia a prove in flusso uniforme che turbolento, che però non è ancora sufficiente a consentire la messa a punto di approcci più raffinati (ad esempio l'utilizzo di formulazioni diverse per le diverse tipologie di impalcato). Inoltre, la maggior parte dei dati attualmente disponibile è relativa a strutture di luce medio-grande, le uniche ad essere regolarmente sottoposte a test in galleria del vento. Viceversa, il documento si rivolge principalmente ai ponti di luce medio-piccola, per i quali è molto difficile

reperire dati sperimentali. Per colmare questa distanza e migliorare la qualità delle disposizioni normative in tema di forze aerodinamiche sugli impalcati da ponte, in futuro sarà necessario realizzare una vasta campagna sperimentale su sezioni tipiche di strutture di luce medio-piccola, nonché approfondire la tematica molto particolare degli impalcati affiancati.

Un incremento dei dati sperimentali a disposizione relativi a prove di natura aeroelastica porterebbe invece un notevole beneficio alla definizione del limite di stabilità per flutter (Mannini, 2006; Mannini et al., 2007), consentendo una definizione più articolata del parametro di efficienza aerodinamica e delle condizioni definite dalle Eqq.8-11.

RINGRAZIAMENTI

La ricerca i cui risultati vengono qui presentati è stata in parte svolta all'interno delle attività del Gruppo di Studio del CNR, coordinato dal Prof. Giovanni Solari, con il compito di predisporre un documento relativo alle *Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni* (CNR-DT 207/2008). Gli autori desiderano inoltre ringraziare il Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) di Nantes, Francia, e in particolare Olivier Flamand e Gérard Grillaud, per il gran numero di dati sperimentali messi a disposizione.

BIBLIOGRAFIA

- Bartoli G., Mannini C. (2008). A simplified approach to bridge deck flutter, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 96 (2), pp. 229-256
- Bartoli G., Righi M. (2004). Flutter optimization of bridge decks: experimental and analytical procedures. In Bontempi F. (Ed.), *Proc. II International Conference on Structural and Construction Engineering*, Vol. 3, pp. 2375-2381, Roma, Balkema
- Bartoli G., Righi M. (2006). Flutter mechanism for rectangular prisms in smooth and turbulent flow, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 94 (5), pp. 275-291
- Chowdhury A.G., Sarkar P.P (2004). Identification of eighteen flutter derivatives of an airfoil and a bridge deck, *Wind and Structures*, Vol. 7 (3), pp. 187-202
- Dyrbye C., Hansen S. (1997). *Wind Loads on Structures*, John Wiley & Sons, New York
- ECCS (1987). *Recommandations pour le calcul des effets du vent sur les constructions*, seconda edizione, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Comité Technique 12 "Vent"
- Frandsen A.G. (1966). Wind stability of suspension bridges. Application of the theory of "thin airfoils", *Proc. International Symposium on Suspension Bridges*, pp. 609-627, Lisbona, Portogallo
- Gimsing N.J. (1997). *Cable Supported Bridges – Concepts and Design*, second edition, John Wiley & Sons, New York
- Mannini C. (2006). *Flutter Vulnerability Assessment of Flexible Bridge Decks*. Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Firenze – TU Braunschweig, Germania. Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germania, 2008 (ISBN: 978-3-639-01509-6)
- Mannini C., Bartoli G., Flamand O., Grillaud G. (2007). A simplified method of flutter assessment: first steps towards flutter derivative generalization, *Proc. XII International Conference on Wind Engineering*, pp. 2343-2350, Cairns, Australia
- Matsumoto M. (1996). Aerodynamic damping of prisms, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 59 (2-3), pp. 159-175
- Righi M. (2003). *Aeroelastic stability of long span suspended bridges: flutter mechanism on rectangular cylinders in smooth and turbulent flow*. Tesi di Dottorato. Università degli Studi di Firenze
- Scanlan R.H., Tomko J.J. (1971). Airfoil and bridge deck flutter derivatives, *J. Eng. Mech. Div.*, Vol. 97, pp. 1717-1737
- Selberg A. (1961). Oscillation and aerodynamic stability of suspension bridges. In *Acta Polytechnica Scandinavica, Civ. Eng. and Build. Constr.* Series n°13, Oslo, Norvegia
- Singh L., Jones N.P., Scanlan R.H., Lorendeaux O. (1995). Simultaneous identification of 3-dof aeroelastic parameters, *Proc. IX International Conference on Wind Engineering*, pp. 972-981, New Delhi, India, Wiley Eastern Ltd
- UNI EN 1991-1-4 (2005). *Eurocodice 1: Azioni sulle strutture. Parte 1-4: Azioni in generale – Azioni del vento*.