



# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)  
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)  
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)  
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)  
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)  
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

<p>IL PROGETTISTA                    Ing. E.M. Veje                  Dott. Ing. E. Pagani                  Ordine Ingegneri Milano                  n° 15408  </p>	<p>IL CONTRAENTE GENERALE                  Project Manager                  (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA                  Direttore Generale e                  RUP Validazione                  (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p>STRETTO DI MESSINA                  Amministratore Delegato                  (Dott. P. Ciucci)</p>
--	---	--	---

<p><i>Unità Funzionale</i> OPERA DI ATTRAVERSAMENTO  <i>Tipo di sistema</i> STUDI DI BASE  <i>Raggruppamento di opere/attività</i> STUDI AERODINAMICI  <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i> Generale  <i>Titolo del documento</i> Calcoli aerodinamici, Impalcato</p>	<p><b>PB0037_F0</b></p>
--	-------------------------

CODICE	C	G	1	0	0	0	0	P	C	L	D	P	S	B	S	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	F	0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	SAMI	ALN	ALN/EYA



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>Calcoli aerodinamici, Impalcato</b>		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## INDICE

INDICE .....	3
1 Introduzione .....	5
2 Relazione di sintesi .....	5
3 Stabilità aerodinamica .....	7
3.1 Metodo .....	7
3.2 Combinazioni dei modi .....	11
3.3 Risultati .....	14
3.4 Conclusioni .....	20
4 Vibrazioni indotte dai vortici .....	23
4.1 Prove sul modello sezionale .....	23
4.2 Modello oscillatore van der Pol generalizzato .....	24
4.3 Livelli di accelerazione rms verticale previsti, modello GVPO .....	27
4.4 Conclusione .....	30
5 Stabilità aerodinamica durante l'installazione .....	31
5.1 Approccio .....	31
5.2 Velocità critiche del vento .....	32
5.3 Sintesi della stabilità aerodinamica durante l'installazione .....	39
6 Riferimenti .....	39



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 1 Introduzione

La presente relazione concerne i calcoli numerici effettuati per il cassone del ponte in merito alla stabilità aerodinamica e le vibrazioni indotte da vortici. La risposta del ponte al vento turbolento, al buffeting, è trattata in una relazione separata [1].



## 2 Relazione di sintesi

La stabilità aerodinamica del cassone del Ponte sullo Stretto di Messina, è stata studiata per angoli di attacco del vento compresi fra  $-4^\circ$  e  $+4^\circ$  utilizzando un flutter 3D basato sulla teoria di Theodorsen. Questo metodo include coefficienti di forma modali e utilizza come input i derivati aerodinamici misurati mediante test in galleria del vento corrispondenti alla forma deformata del cassone. L'input strutturale è preso dal modello IBDAS v.3.3.d. Una variante della teoria di Theodorsen, chiamato metodo AMC, è stato utilizzato per calcolare la variazione dello smorzamento aerodinamico con la velocità del vento.

Dalle quattro modalità inferiori orizzontali, verticali e di torsione, sono state studiate dieci potenziali combinazioni di modalità flutter. Si è osservato che la combinazione di modalità che genera la velocità più bassa di vento flutter critica, coinvolge la modalità asimmetrica inferiore per tutti e tre i gradi di libertà.

La Figura 2.1 mostra i risultati della valutazione di smorzamento per vento orizzontale. Vengono inoltre mostrati i livelli di smorzamento a 54 m/s e 75 m/s e la velocità critica del vento ottenuta nei test di modello sezionale presso il *Force*. Come osservato, vi è un buon accordo fra i valori calcolati e quelli osservati.

Si è concluso che sia le velocità critiche del vento che i livelli di smorzamento compositi, sono sopra i requisiti SdM

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

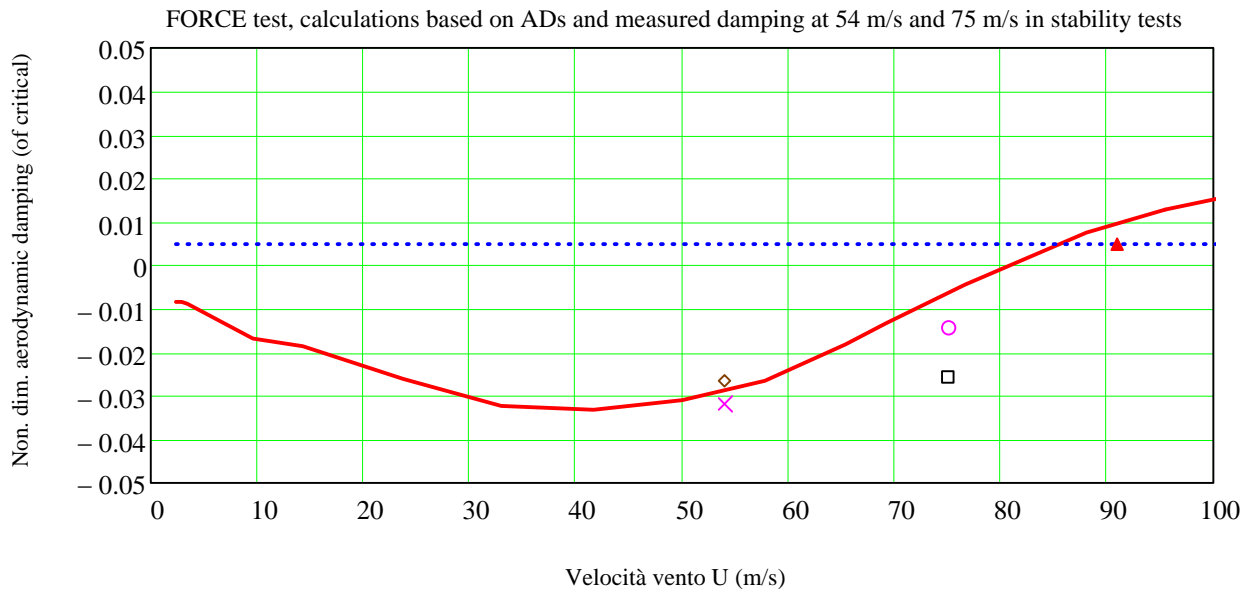




Figura 2.1 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): linea rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la linea rossa interseca la linea blu. Combinazione A, vento orizzontale. I valori di smorzamento discreti a 54 m/s e 75 m/s misurati nei test di galleria del vento Force ( "x" e cerchio) e NRC (quadrato e rombo) sono anch'essi mostrati con la velocità di vento - flutter critico corrispondente nei test di modello sezionale a vibrazione libera al Force (il triangolo pieno).

La valutazione delle vibrazioni del ponte indotte da vortice, si basa sui risultati del test del modello sezionale della risposta al distacco dei vortici estrapolata a valori di fondo scala che applicano un modello oscillatore di Van der Pol (GVPO). Questo modello permette di prendere in considerazione l'automodo (mode shape) e la massa generalizzata della reale struttura del ponte nella valutazione della risposta indotta dal vortice.

I livelli di spostamento verticale massimo, dovuti alla eccitazione da distacco dei vortici, sono stati calcolati per velocità di sincronizzazione del vento fissate fino a 15 m/s per il ponte. Si osserva che il requisito SdM, secondo il quale gli spostamenti rms dovuti all'eccitazione da distacco dei vortici devono essere inferiori a 6 mm e che accelerazioni verticali inferiori a  $0.1\text{m/s}^2$  vengono soddisfatte con velocità del vento fino a 15 m/s.

Migliori prestazioni di distacco dei vortici possono essere ottenute sistemando una griglia orizzontale aperta al 50% fra il cassone ferroviario e i cassoni stradali se ritenuto necessario sulla

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

base dell'esperienza operativa. Le prove nella galleria del vento hanno dimostrato che delle griglie orizzontali tra i cassoni ferroviario e stradali non hanno un effetto dannoso sui coefficienti di carico da vento a regime o sulla velocità critica del vento che porta all'innescio del flutter.

La velocità critica minima del vento riscontrata nelle condizioni di installazione è pari a 40 m/s (L = 1100 m) per la sezione nuda d'impalcato senza corrimano o schermi frangivento. I calcoli con tutti gli schermi ed i corrimano presenti indicano che il limite superiore è pari a 66 m/s.

### 3 Stabilità aerodinamica

La stabilità aerodinamica del cassone viene calcolata nella condizione di in-service per angoli di attacco del vento compresi fra  $-4^\circ$  e  $+4^\circ$ . Vengono considerati tre gradi di libertà: movimento verticale, movimento orizzontale e movimento torsionale. Vengono confrontati i risultati ottenuti dalle prove in galleria del vento riassunti in [2].

#### 3.1 Metodo

Viene applicato il modello di analisi flutter di Theodorsen descritto in [4] ma esteso per comprendere tre gradi di libertà e 18 derivati flutter. Questo modello genera il punto di flutter, vale a dire la velocità critica del vento e la frequenza di flutter risultante. Il modello AMC, [5], viene usato per ottenere i livelli di smorzamento residuo a 54 m/s e 75 m/s. Il modello AMC si basa sullo stesso gruppo di equazioni del metodo Theodorsen, ma invece di risolvere il determinante di flutter con due equazioni singole (una per la parte reale e una per la parte immaginaria) viene usata una sola equazione per una variabile complessa  $X (= (\omega_\sigma/\omega)^2(1+i\cdot g)$  dove  $g$  è il fattore di smorzamento e  $i$  è l'unità immaginaria). Così facendo, lo smorzamento composto viene ottenuto in funzione della velocità del vento.

Poichè i derivati di flutter vengono ottenuti dalle prove sul modello sezionale, nell'analisi di flutter si tiene conto delle forme modali effettive del cassone del ponte (ivi comprese le campate posteriori) e vengono inclusi i coefficienti modali, le masse modali generalizzate e i momenti di inerzia delle masse generalizzate. I coefficienti modali vengono dati da

$$C_{ij} = \int_{span} \varphi_i(s) \varphi_j(s) ds$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dove  $i$  e  $j = 1,2,3$  (vale a dire movimento verticale, movimento orizzontale o torsione) e  $\varphi(s)$  è la forma modale. Le masse modali generalizzate ed i momenti di inerzia delle masse modali generalizzate sono ottenuti dall'analisi automodale IBDAS del ponte completo, [3], unitamente alle forme modali e alle autofrequenze. Le forme modali vengono ottenute in aria ferma. I valori in aria deviano solo molto leggermente da quelli in aria ferma.

Il metodo è descritto in [6] per due gradi di libertà ed esteso in questo caso a tre gradi di libertà.



Le derivate aerodinamiche vengono ottenute dalle prove sul modello sezionale di Force, [2], a flusso smorzato.

Per la condizione di progetto con vento orizzontale,  $0^\circ$ , viene usata la forma deformata del cassone. Ciò significa che nell'analisi di flutter non verranno usate le derivate aerodinamiche per attacco del vento ad angolo  $0^\circ$ , bensì i valori (interpolati) corrispondenti alla forma deformata del cassone. Dall'analisi IBDAS si riscontra che ad una velocità del vento di 75 m/s (velocità limite del vento di flutter) la rotazione del cassone avviene a  $-0,3^\circ$  in corrispondenza della campata centrale (naso giù). Le prove di Force sul modello sezionale indicano che la rotazione della sezione del cassone del ponte ad una velocità del vento di 75 m/s è di ca.  $1^\circ$  naso su nel flusso smorzato.

La forma deformata del cassone per l'intera struttura del ponte dipende dall'elasticità di cavi, pendini e torri in maniera complicata come illustrato in Figura 3.1, dove le risposte medie del cassone principale ad una velocità del vento di 75 m/s vengono estratte dal modello IBDAS (v. 3.3d).

Il cassone viene traslato fino a 23 m in direzione del vento, ruotato col naso verso il basso (ca.  $0,55^\circ$  della campata centrale) e abbassato di quasi 1 m. In questo modo, l'effetto combinato del vento fa ruotare la sezione col naso verso l'alto per effetto del momento aerodinamico sulla forma della sezione stessa ed il complesso sistema elastico della struttura del ponte fa sì che vi sia una leggera rotazione del cassone col naso verso il basso.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento PB0037_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

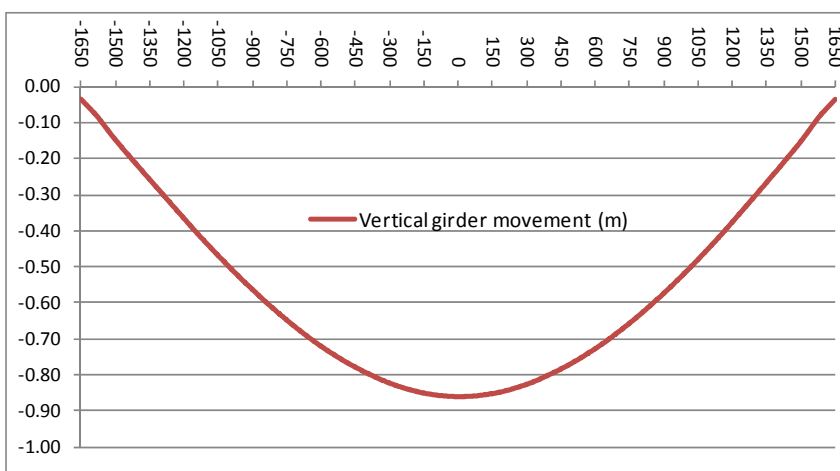
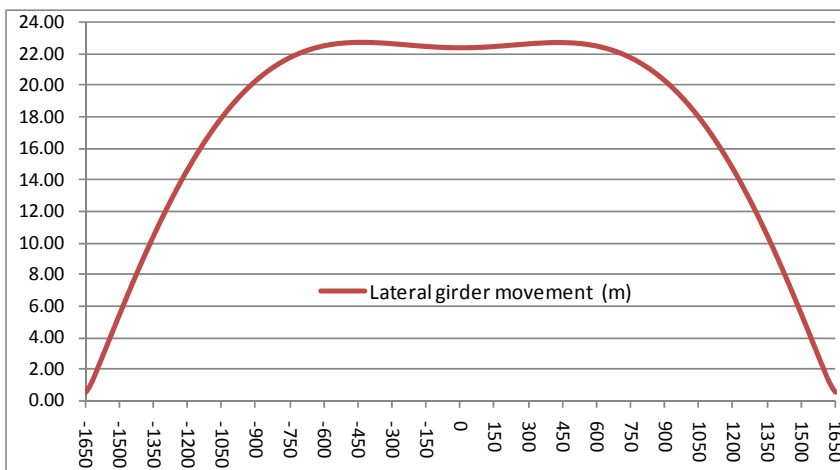
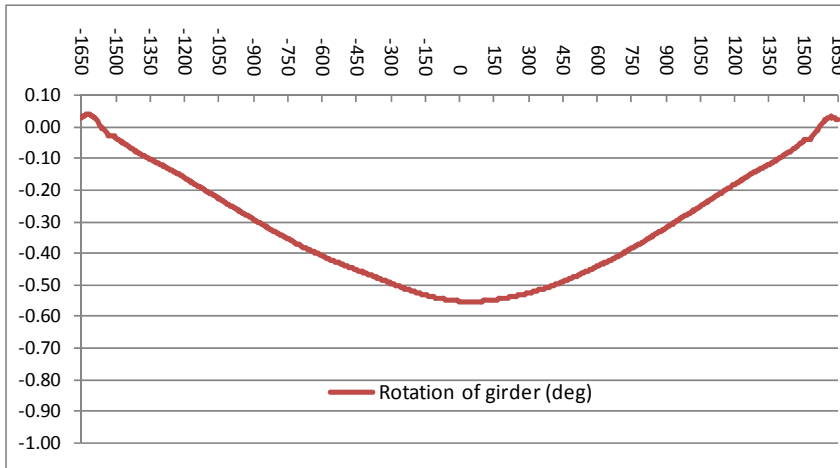




Figura 3.1 Risposta media del cassone ad una velocità del vento di 75 m/s. La campata centrale si trova a  $s=0$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>Calcoli aerodinamici, Impalcato</b>		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

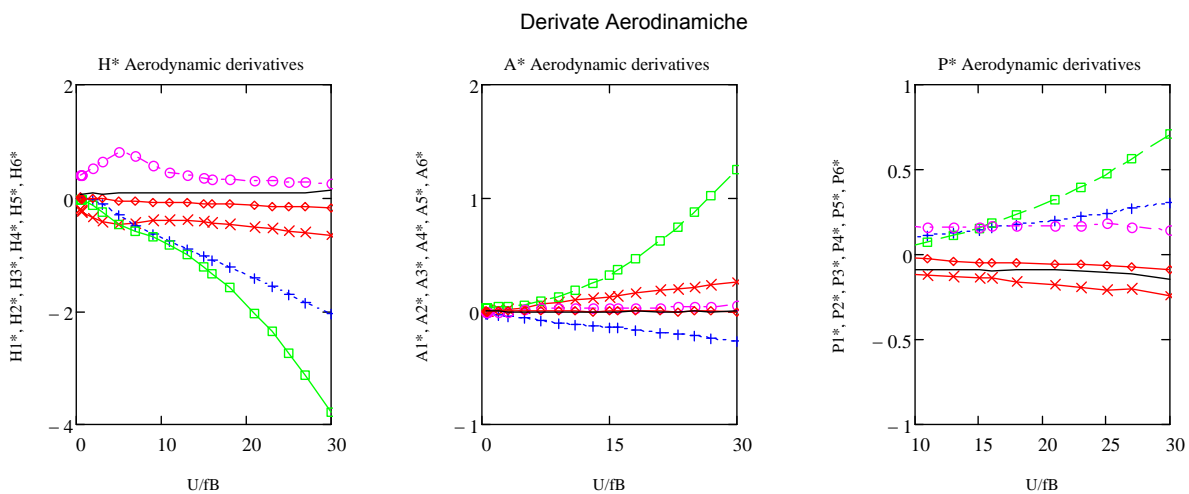
Le derivate aerodinamiche per  $-0,3^\circ$  (ottenute dall'interpolazione lineare tra i valori misurati a  $0^\circ$  e  $-2^\circ$ ) sono indicate in Figura 3.2 e ottenute secondo la formulazione di Scanlan:

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left( KP_1^* \frac{\dot{y}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 P_3^* \theta + K^2 P_4^* \frac{y}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left( KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 H_3^* \theta + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{y}}{U} + K^2 H_6^* \frac{y}{B} \right)$$



$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left( KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 A_3^* \theta + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{y}}{U} + K^2 A_6^* \frac{y}{B} \right)$$

con l'asse verticale  $h$  positiva verso il basso.  $K$  è la frequenza ridotta,  $K = \omega B/U$ ,  $U$  è la velocità del vento e  $\omega$  è la frequenza circolare.



*Figura 3.2 Derivate aerodinamiche a  $-0,3^\circ$  ottenute dalle prove in galleria del vento di Force, flusso smorzato. Croci rosse:  $H_1^*$ , croci blu :  $H_2^*$ , quadrati verdi:  $H_3^*$ , cerchi viola:  $H_4^*$ , rombi rossi:  $H_5^*$ , linea nera:  $H_6^*$ . Simile per le derivate  $A$  e  $P$ .  $B$  è la larghezza del cassone, 60,4 m*







Per gli altri ancoli di attacco del vento nella fascia esaminata tra  $-4^\circ$  e  $+4^\circ$ , le derivate misurate vengono usate direttamente in quanto questi angoli vengono inseriti per verificare la robustezza del cassone rispetto al flutter.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

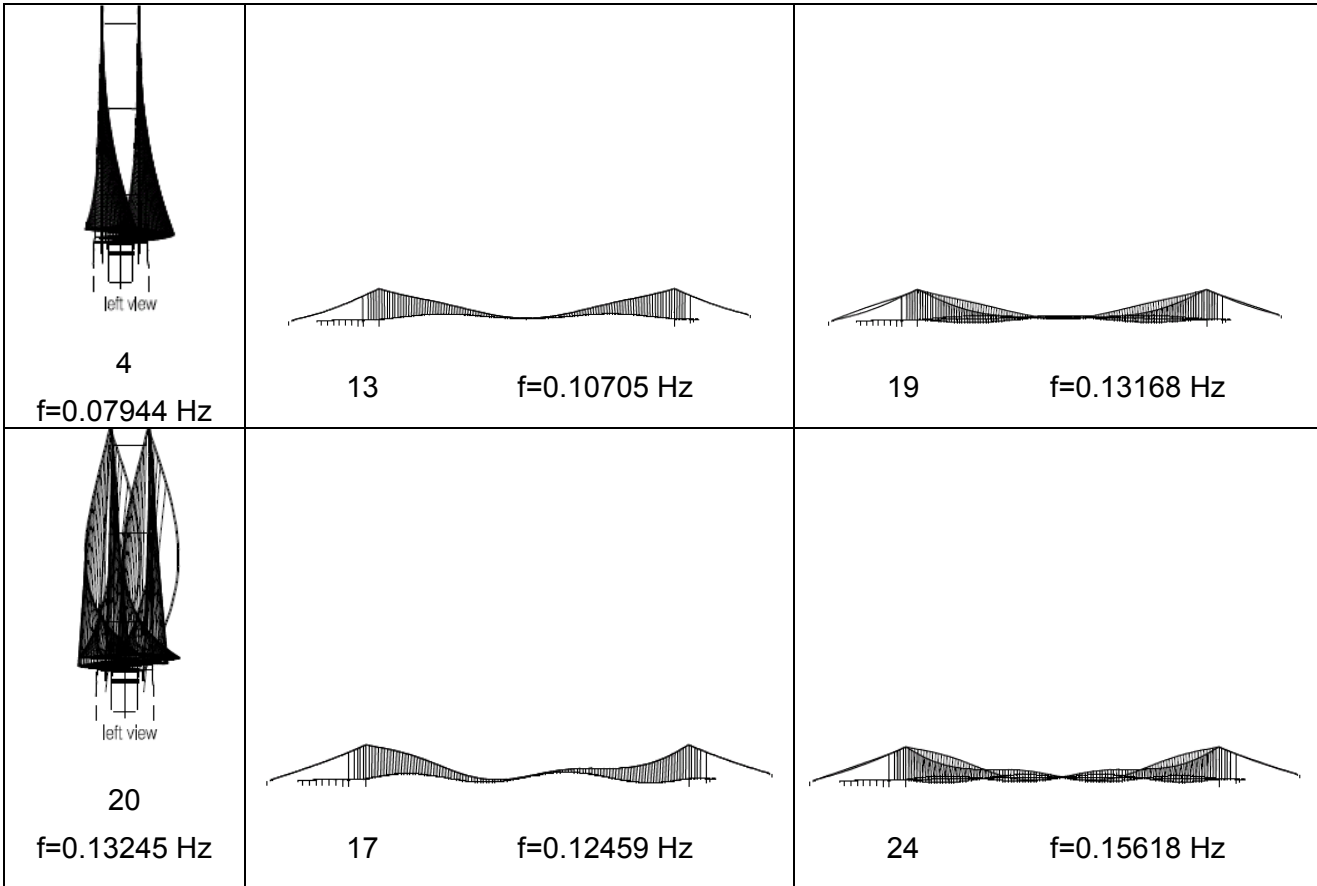
### 3.2 Combinazioni dei modi

Le quattro modalità più basse, verticale, orizzontale e torsionale, sono riportate in Tabella 3.1. Vengono indicati il numero, la frequenza e le forme di tutte le modalità.

Tabella 3.1 Le quattro modalità più basse, verticale, orizzontale e torsionale, ottenute dal modello IB DAS 3.3f [3].

Orizzontale	Verticale	Torsionale
 <p style="text-align: center;">left view</p> <p style="text-align: center;">1</p> <p style="text-align: center;">f=0.03015 Hz</p>	 <p style="text-align: center;">3</p> <p style="text-align: center;">f=0.06477 Hz</p>	 <p style="text-align: center;">8</p> <p style="text-align: center;">f=0.08079 Hz</p>
 <p style="text-align: center;">left view</p> <p style="text-align: center;">2</p> <p style="text-align: center;">f=0.05485 Hz</p>	 <p style="text-align: center;">7</p> <p style="text-align: center;">f=0.08051 Hz</p>	 <p style="text-align: center;">12</p> <p style="text-align: center;">f=0.10033 Hz</p>

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						



vista a sinistra

In Tabella 3.2 vengono indicati le masse generalizzate o i momenti di inerzia delle masse corrispondenti.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tabella 3.2 Masse generalizzate e momenti di inerzia delle masse per le modalità relative ottenuti con il modello IBDAS 3.3f [3].

Modalità globale	Massa generalizzata o momento di inerzia della massa
1	10,177,000 kg
2	52,169,000 kg
3	106,720,000 kg
4	40,551,000 kg
7	54,276,000 kg
8	54,670 Mkgm <sup>2</sup>
12	26,990 Mkgm <sup>2</sup>
13	81,464,000 kg
17	97,456,000 kg
19	40,810 Mkgm <sup>2</sup>
20	55,967,000 kg
24	48,250 Mkgm <sup>2</sup>

La torsione avrà sempre la frequenza massima in una condizione di flutter accoppiata, mentre è meno probabile che autostati di forma molto diversa si accoppino. Si è arrivati quindi alle seguenti dieci combinazioni che dovranno essere ulteriormente verificate, Tabella 3.3. Combinazione A (senza la modalità orizzontale) è quella testata nelle prove in galleria del vento [2].



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

*Tabella 3.3 Combinazioni di autostati per l'analisi di flutter.*

Combinazione	Modalità
A	8 + 3 + 2
B	8 + 7 + 2
C	12 + 7 + 1
D	12 + 3 + 1
E	19 + 17 + 4
F	19 + 13 + 4
G	24 + 17 + 4
H	24 + 13 + 4
I	24 + 17 + 20
J	24 + 13 + 20

### **3.3 Risultati**

I risultati per l'analisi di flutter nella condizione di vento di progetto (vento orizzontale) sono indicati in Tabella 3.4 per le dieci combinazioni di modi. Per tutti i modi si assume uno smorzamento strutturale critico dello 0,5%. Appare evidente che la combinazione A determina un'instabilità da flutter del cassone del ponte in quanto la velocità critica del vento di 85 m/s è di gran lunga inferiore a quanto ottenuto con una qualsiasi delle altre combinazioni di modi.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La

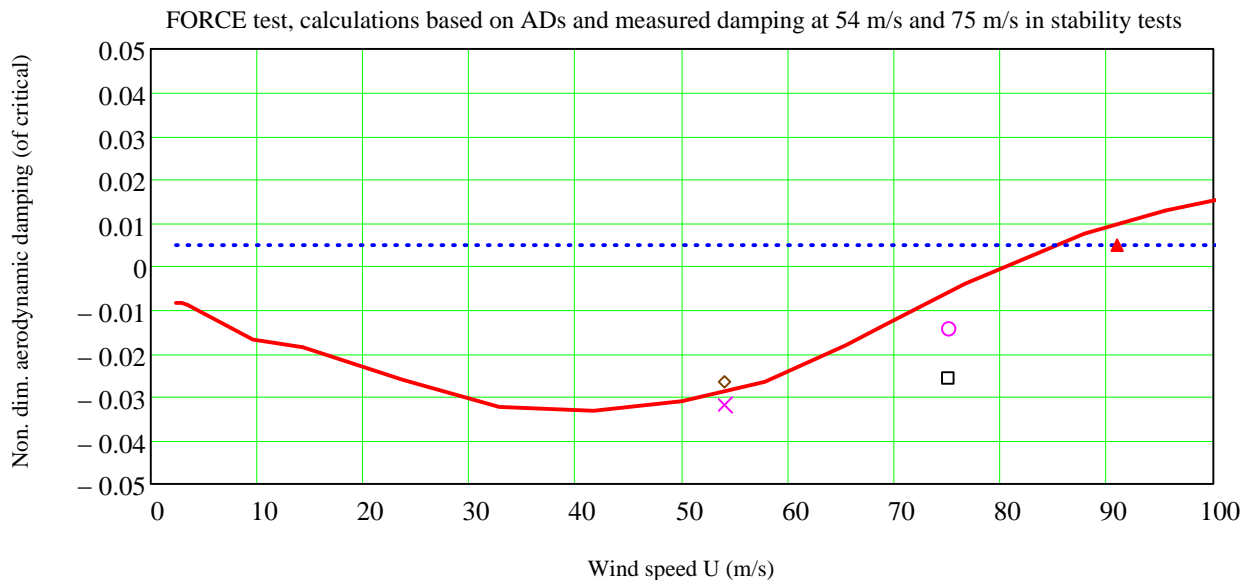




Figura 3.3 mostra il comportamento dello smorzamento aerodinamico (rispetto alla criticità) in funzione della velocità di fondo scala del vento  $U$  per la combinazione A, vento orizzontale. Vengono pure indicati i valori discreti a 54 m/s e 75 m/s misurati nella prova in galleria del vento di Force e nelle prove su larga scala NRC effettuate sulla sezione C5/45 (sub-test D2, [9]) unitamente alla velocità critica del vento flutter riscontrata nelle prove di Force sul modello sezionale a vibrazioni libere (triangolo pieno). La velocità critica del vento misurata nelle prove in scala 1:30 sulla sezione C5/45 presso NRC era superiore a 90 m/s.

Lo smorzamento residuo ad una data velocità del vento viene ottenuto dalla distanza verticale tra la curva blu e la curva rossa. A 54 m/s lo smorzamento residuo è del 3,3% , a 75 m/s dell'1,05%. I valori richiesti sono rispettivamente del 2% e dell'1%. Si nota un buon accordo tra i valori calcolati, che risultano un tantino più prudenti, ed i valori misurati direttamente. La curva di smorzamento tende allo zero per il fatto che la velocità del vento va scomparendo lasciando uno smorzamento residuo uguale allo smorzamento strutturale dello 0,5%.

Tabella 3.4 Vento orizzontale, velocità critica del vento per le dieci combinazioni di modi verificate.

Combinazione	$U_c$ (m/s)
--------------	-------------

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
		Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento PB0037_F0_ITA.doc	Rev F0

A	85
B	> 130
C	102
D	> 120
E	> 200
F	137
G	166
H	> 170
I	150
J	> 190

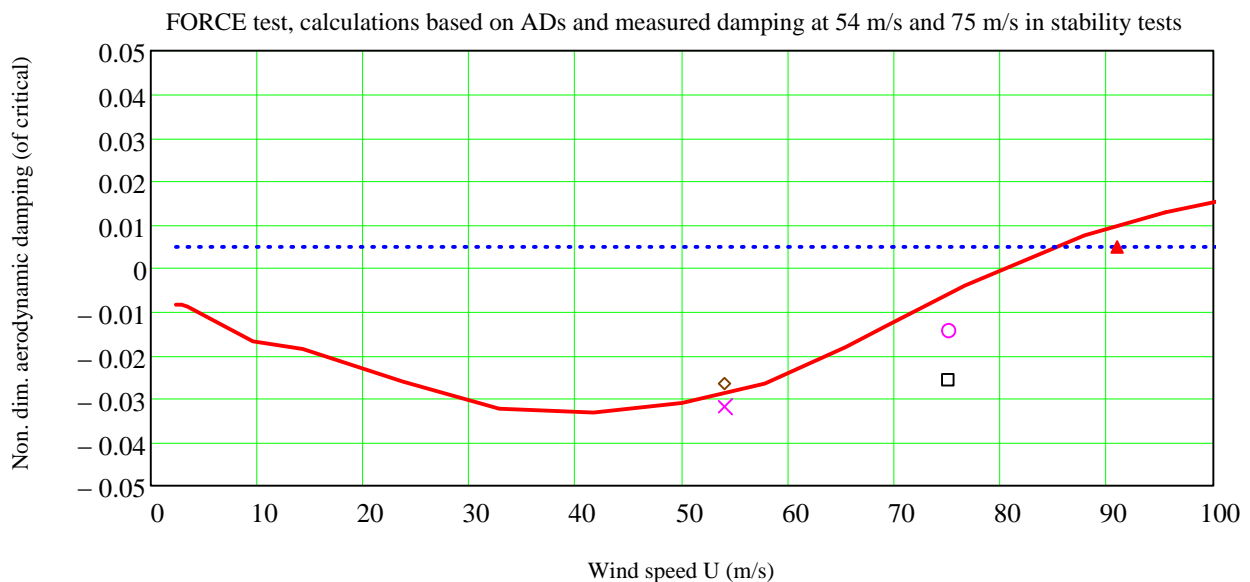




Figura 3.3 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): curva rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la curva rossa interseca la curva blu. Combinazione A, vento orizzontale. I valori di smorzamento discreti a 54 m/s e 75 m/s misurati nei test di galleria del vento Force ("x" e cerchio) e NRC (quadrato e rombo) sono anch'essi mostrati con la velocità di vento - flutter critico corrispondente nei test di



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

modello sezionale a vibrazione libera di Force (il triangolo pieno).

I risultati degli altri angoli di attacco del vento sono presentati nelle figure che seguono e in Tabella 3.5.

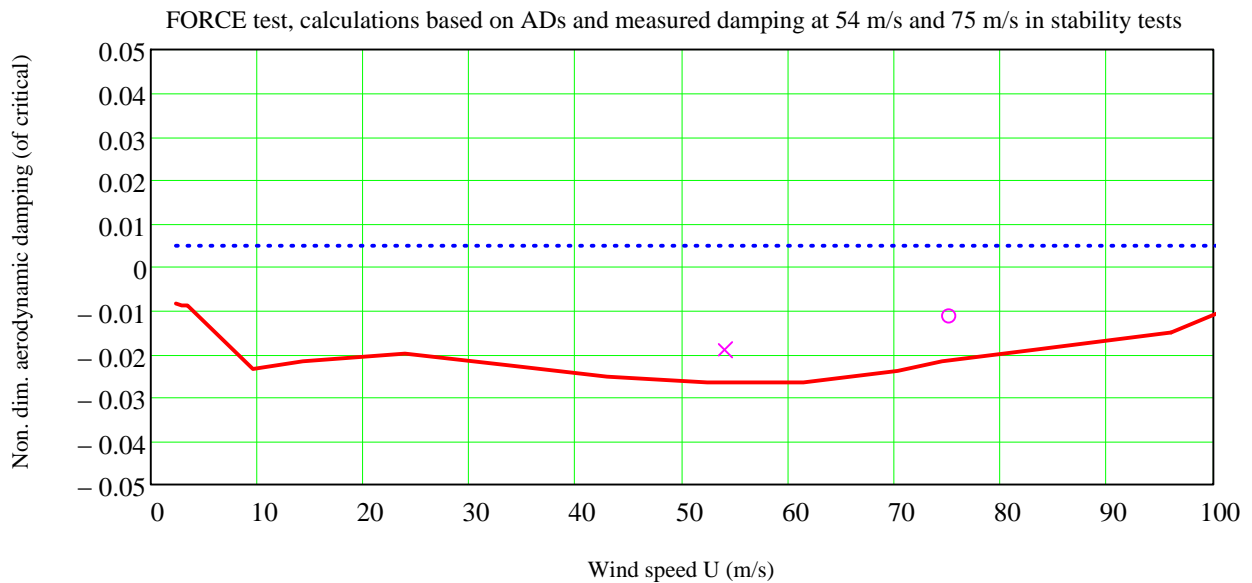




Figura 3.4 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): curva rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la curva rossa interseca la curva blu. Combinazione A, angolo del vento  $-4^\circ$ . Vengono pure riportati i valori discreti a 54 m/s e 75 m/s misurati nei test di galleria del vento Force.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

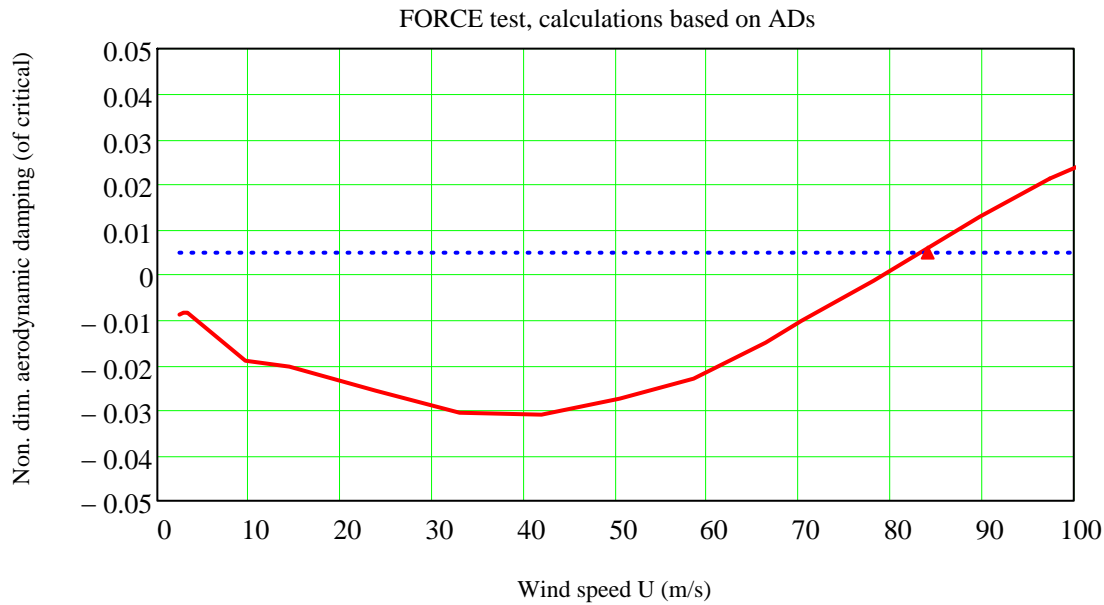
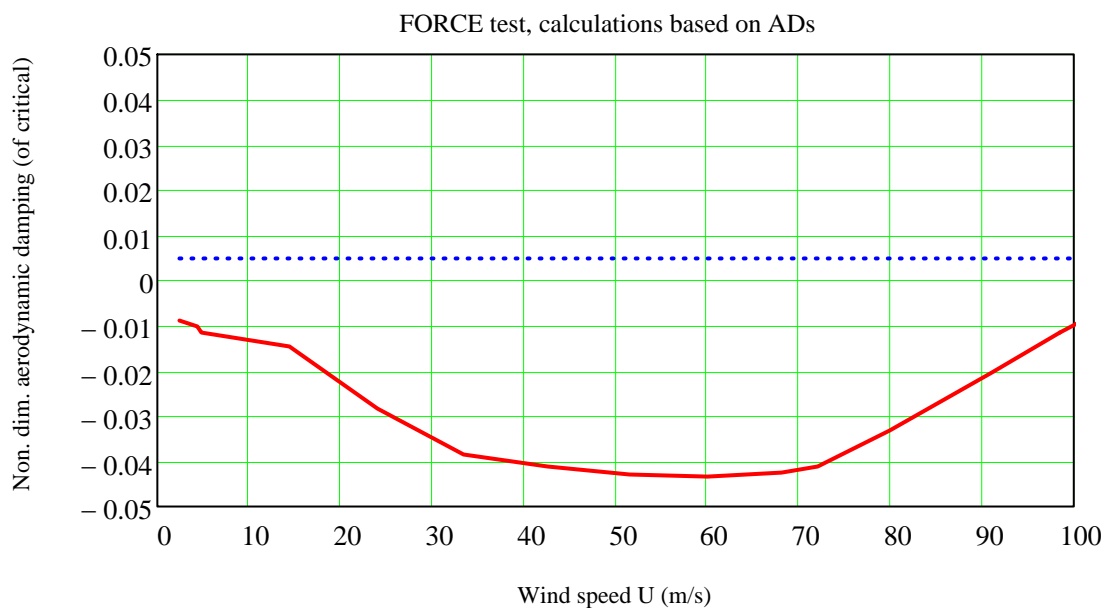


Figura 3.5 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): curva rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la curva rossa interseca la curva blu. Combinazione A, angolo del vento  $-2^\circ$ . Viene pure indicata la corrispondente velocità critica del vento-flutter ottenuta dalle prove sul modello sezionale a vibrazione libera (il triangolo pieno).





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>Calcoli aerodinamici, Impalcato</b>		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Figura 3.6 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): curva rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la curva rossa interseca la curva blu. Combinazione A, angolo del vento +2°.

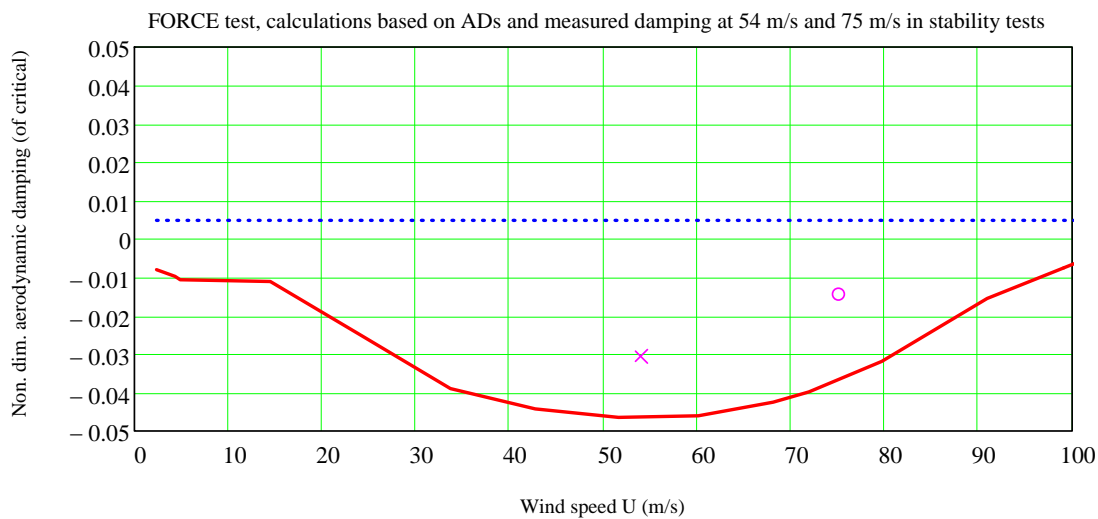


Figura 3.7 Smorzamento aerodinamico non-dimensionale (rispetto a criticità): curva rossa. Smorzamento strutturale: linea blu. L'instabilità del cassone del ponte si verifica quando la curva rossa interseca la curva blu. Combinazione A, angolo del vento +4°. Vengono pure riportati i valori discreti a 54 m/s e 75 m/s misurati nel test di galleria del vento Force.

Tabella 3.5 Velocità critiche del vento e livello di smorzamento residui per altri angoli di attacco del vento, combinazione A.

Angolo (gradi)	$U_c$ (m/s)	Smorzamento residuo a 54 m/s	Smorzamento residuo a 75 m/s
-4	137	3.4%	1.1%
-2	85	3.3%	1.1%
0 <sup>1</sup>	85	3.0%	1.0%
0 (cassone deformato, vale a	85	3.3%	1.1%

<sup>1</sup> (usando derivate a 0 gradi, non corrispondenti alla forma deformato del cassone)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dire i.e. -0,34)			
2	108	3.1%	2.7%
4	107	5.0%	4.1%
<b>Requisito SdM</b>		<b>2%</b>	<b>1%</b>

### 3.4 Conclusioni

La Tabella 3.7 mostra un confronto tra le velocità critiche del vento calcolate nella fascia verificata di angoli di attacco del vento ed i valori determinati in via sperimentale [2], per il ponte in service. Le velocità critiche del vento sono superiori ai requisiti SdM requirements.

La Tabella 3.7 mostra i corrispondenti livelli di smorzamento composti medi calcolati e misurati, [2]. I livelli di smorzamento composti sono superiori ai requisiti SdM.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



Tabella 3.6 Velocità critiche del vento, confronto con i risultati dei test in galleria del vento. Assenza di traffico.

Angolo (gradi)	Calcolo $U_c$ (m/s)	Prova Force in galleria del vento $U_c$ (m/s)	Prova BLWTL in galleria del vento $U_c$ (m/s)	Prova Force in galleria del vento $U_c$ (m/s)	Prova BLWTL in galleria del vento $U_c$ (m/s)
Condizione del flusso	Calmo			Turbolento	
-4	137	> 125 m/s	> 114 m/s	83 m/s	-
-2	85	-	-	-	-
0	85	119 m/s	> 120 m/s	81 m/s	> 99 m/s
2	108	-	-	-	-
4	107	120 m/s	84 m/s	126 m/s	-
<b>Requisito SdM</b>	<b>75 m/s</b>				

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		Codice documento PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Rev</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Data</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						

Tabella 3.7 Smorzamento composito medio a flusso calmo per la sezione di impalcato a velocità fondo scala del vento di 54 m/s e 75 m/s. Assenza di traffico.

Angolo (gradi)	Calcolo $\zeta$	Prova Force in galleria del vento $\zeta$	Prova BLWTL in galleria del vento $\zeta$
Condizione del flusso	Calmo Velocità del vento = 54 m/s		
-4	3.4%	2.4%	4.3%
-2	3.3%	-	
0	3.2%	3.65%	2.1%
2	3.1%	-	
4	5.0%	3.55%	2.4%
<b>Requisito SdM</b>	<b>&gt; 2 %</b>		
Condizione del flusso	Calmo Velocità del vento = 75 m/s		
-4	1.1%	1.55%	5.7%
-2	1.1%	-	-
0	1.1%	1.9%	3.1%
2	2.7%	-	-
4	4.1%	1.9%	2.2%
<b>Requisito SdM</b>	<b>&gt; 1 %</b>		

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 4 Vibrazioni indotte dai vortici

### 4.1 Prove sul modello sezionale

Schermi in metallo estensibili sono stati proposti per la costruzione di schermi di sicurezza ed altri schermi frangivento per il ponte di Messina a seguito di elaborate prove su larga scala (1:3) in galleria del vento presso PoliMi nel 2004 [11]. Questo tipo di schermo viene quindi previsto per l'attuale fase di Progetto Definitivo. Il sotto-test D8 ha verificato l'eccitazione da distacco dei vortici per due tipi di schermi in metallo estensibili con coefficienti di perdita di carico  $k = 2.7$  e  $k = 3.7$ . I risultati, Figura 4.1, dimostrano che le risposte minime sono garantite dallo schermo A con un coefficiente di perdita di carico  $k = 3.7$ .



Al fine di tener conto delle differenze tra la scala del modello e le caratteristiche di inerzia della sezione tipo dell'impalcato e valutare lo smorzamento necessario a raggiungere uno spostamento SdM di 0.006 m rms, il piegamento verticale massimo e la flessione ai bordi dovuta a torsione sono

stati tracciati in funzione dei numeri di Scruton per il piegamento e la torsione  $Sc_b = \delta m / \rho B^2$ ,  $Sc_t =$

$\delta I_m / \rho B^4$ . Il diagramma , Figura 4.1, indica che i numeri di Scruton di piegamento e torsione richiesti

per soddisfare il requisito SdM sono pari a  $Sc_b \approx 0.25$ ,  $Sc_t \approx 0.033$ . Il calcolo del corrispondente livello di smorzamento richiesto assumendo una massa  $m = 57.66 \cdot 10^3$  kg/m per una sezione tipo del ponte ed un momento di inerzia della massa  $I_m = 28.89 \cdot 10^6$  kgm<sup>2</sup>/m genera i livelli di

smorzamento necessari per il piegamento e la torsione  $\zeta_b = 0.31\%$ ,  $\zeta_t = 0.30\%$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		Codice documento PB0037_F0_ITA.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

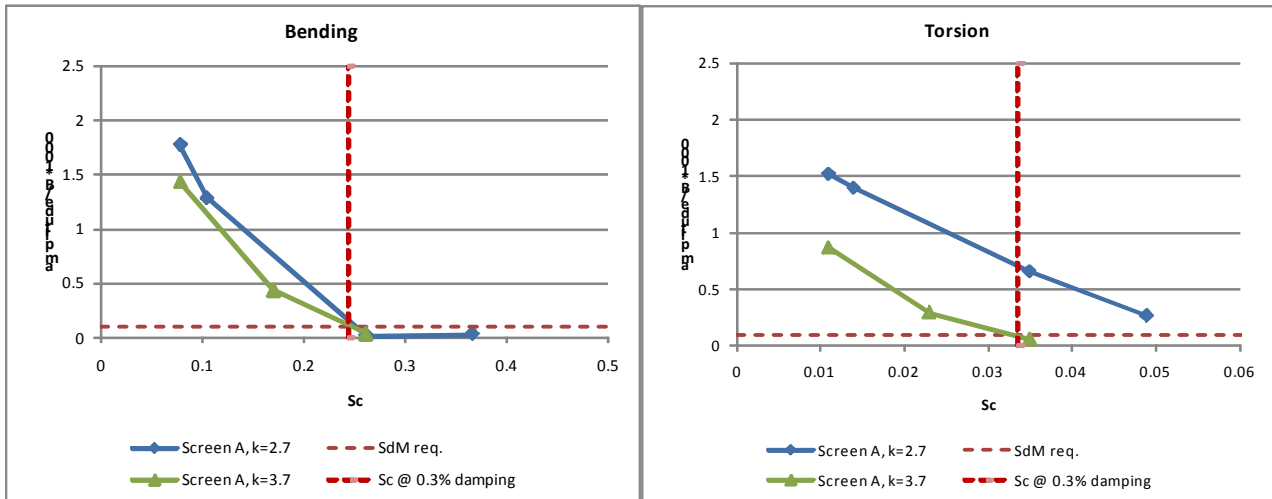


Figura 4.1 Effetto dello smorzamento strutturale espresso sotto forma di numero di Scruton sul piegamento verticale e sullo spostamento ai bordi dovuti a torsione nella configurazione C5/63 dell'impalcato con schermi di sicurezza in metallo estensibili e schermi frangivento.



## 4.2 Modello oscillatore van der Pol generalizzato

La prima valutazione delle vibrazioni indotte dai vortici del ponte si basa sui risultati del sub-test D7 sul modello sezionale riguardanti la risposta al distacco dei vortici della configurazione d'impalcato C5/63 estrapolati ai valori di fondo scala mediante applicazione del modello oscillatore van der Pol generalizzato (GVPO) sviluppato in [7]. Questo modello consente di tener conto dell'effetto dello smorzamento dipendente dalla forma modale, dalla massa generalizzata e dal modo di un ponte a piena campata nella valutazione della risposta indotta dai vortici.

Il modello van der Pol generalizzato esprime l'eccitazione aerodinamica autolimitata di un oscillatore con un grado di libertà:

$$m[\ddot{y} + 2\zeta\omega\dot{y} + \omega^2y] = \frac{1}{2}\rho U^2 (2B)Y_0 \left(1 - \epsilon \left|\frac{y}{B}\right|^{2\nu}\right) \frac{\dot{y}}{U}$$



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

dove  $m$  è la massa,  $\omega$  è la frequenza circolare,  $B$  è la dimensione caratteristica (larghezza dell'impalcato del ponte),  $\rho$  è la densità dell'aria,  $U$  è la velocità del vento e  $y$  è la risposta. Le costanti  $Y_0$ ,  $\epsilon$  e  $\nu$  definiscono l'eccitazione aerodinamica autolimitante dovuta al distacco dei vortici e sono ottenute in via sperimentale.

Assumendo che la risposta sia armonica  $y(t) = y_0 \sin(\omega t)$ , si ottiene la seguente espressione per l'ampiezza risonante in condizioni statiche (di regime):

$$y_0(\zeta) = \left[ \frac{\pi}{l(\nu)\epsilon} \left( 1 - \frac{\zeta}{\eta} \right) \right]^{\frac{1}{2\nu}}$$



dove  $\eta = Y_0 \cdot (\rho UB / 2m\omega)$  è lo smorzamento aerodinamico rispetto alla criticità e  $l(\nu) =$

$$\int_0^{2\pi} \sin(x)^2 |\cos(x)|^{2\nu} dx$$

Al fine di adeguare i parametri di risposta alle prove sul modello di sezione, le ampiezze massime rms di distacco dei vortici in presenza di flessione verticale ed ai bordi (torsione) vengono tracciate

in funzione dello smorzamento strutturale  $\zeta$  rispetto a criticità. La risposta  $y(\zeta)$  del modello GVPO

viene adeguata alle misurazioni, Figura 4.22, per generare le seguenti costanti di piegamento:  $\eta =$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

0.0035,  $\epsilon = 4.917$ ,  $\nu = 0.28$ ,  $l(\nu) = 1.826$  e di torsione:  $\eta = 0.0045$ ,  $\epsilon = 3.226$ ,  $\nu = 0.18$ ,  $l(\nu) = 2.164$

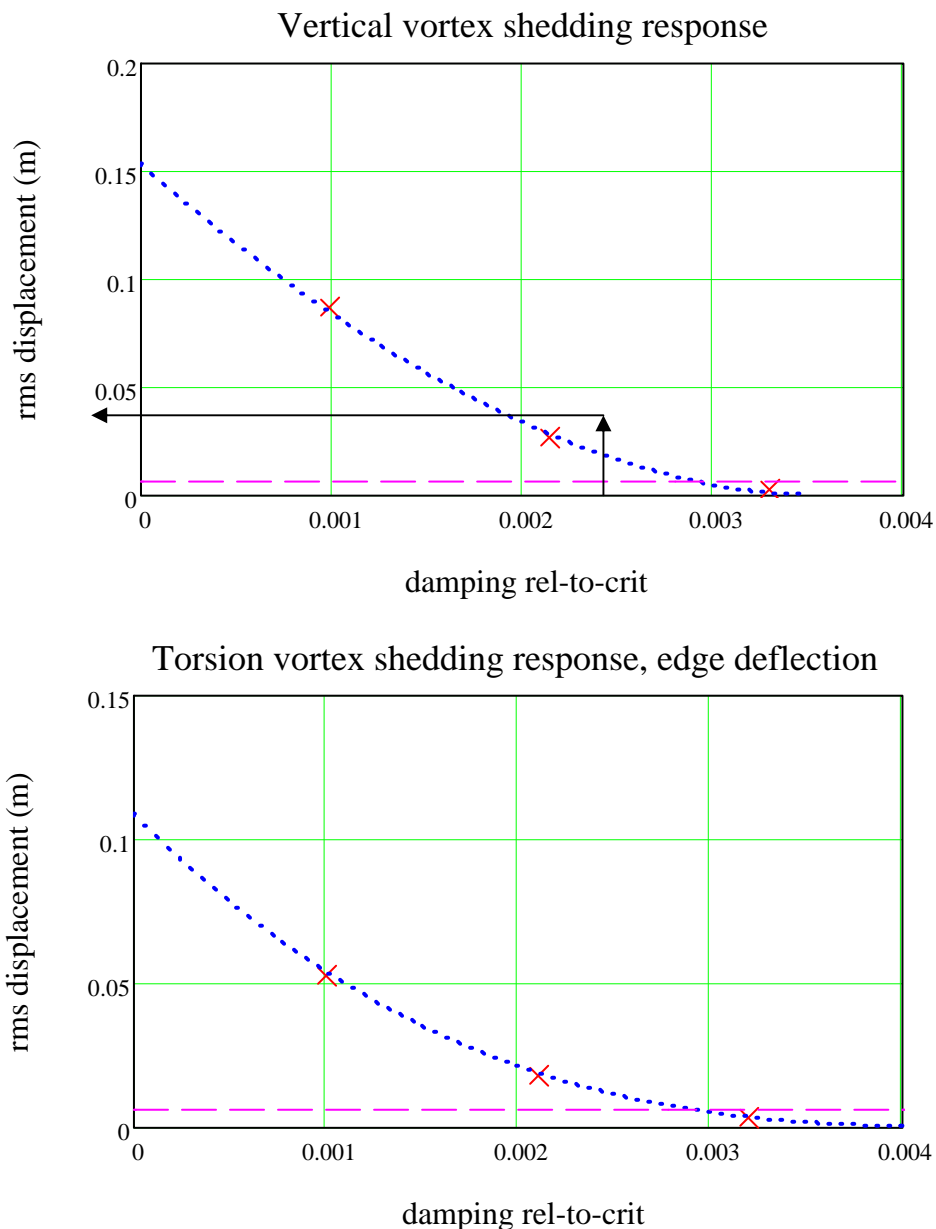




Figura 4.22 Adeguamento del modello GVPO ai dati del modello di sezione nella configurazione C5/63 dell'impalcato dotata di schermi A,  $k=3.7$ . Risposte rms massime di piegamento verticale ed

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						



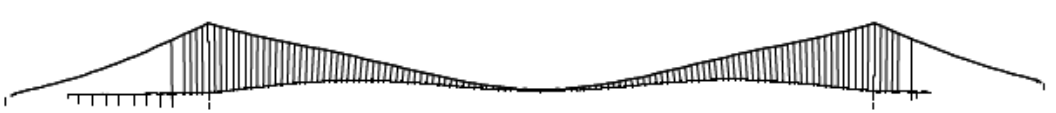
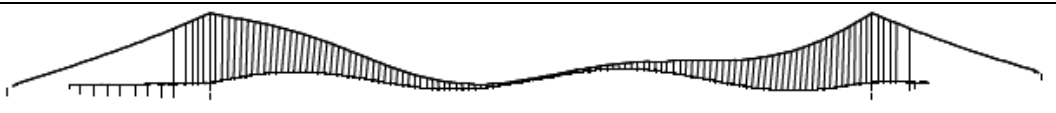


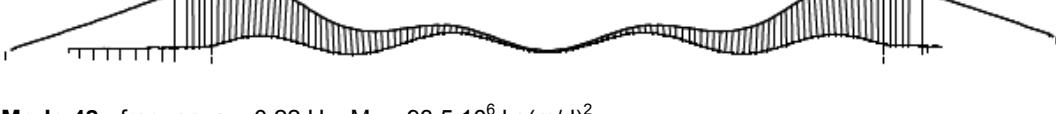
ai bordi di 0,0048 m e 0,0051 vengono riscontrate per un livello di smorzamento strutturale  $\zeta = 0.003$  rispetto alla criticità.

Seguendo l'adattamento dei parametri del modello GVPO si può ora calcolare la risposta rms verticale massima del ponte a condizione che sia noto un livello di smorzamento. Lo smorzamento strutturale dei ponti sospesi non può essere valutato sulla base di studi analitici, bensì dalle misurazioni dello smorzamento sulle strutture esistenti. Prendendo i dati di smorzamento disponibili dai moderni ponti sospesi a cassoni, il ponte di Storebælt e i due ponti sul Bosforo, viene suggerito un valore medio  $\zeta = 0,003$  rispetto alla criticità.

### 4.3 Livelli di accelerazione rms verticale previsti, modello GVPO

L'applicazione della procedura succitata ai modi verticali previsti dal modello strutturale 3.3f genera uno spostamento rms verticale massimo e spostamenti rms ai bordi (torsione) di 0,0048 m e 0,0051 m. I corrispondenti livelli di accelerazione rms vengono stimati moltiplicando lo spostamento rms con le relative frequenze circolari al quadrato e riportati nella Tabella 4.1 seguente per velocità del vento di sincronizzazione fino a 15 m/s.

*Tabella 4.1 Relazione tra modi di piegamento verticali, velocità del vento e livelli massimi di accelerazione rms indotti ad un livello di smorzamento  $\zeta = 0,003$  rispetto alla criticità*



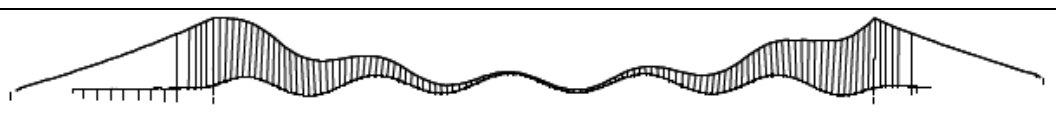
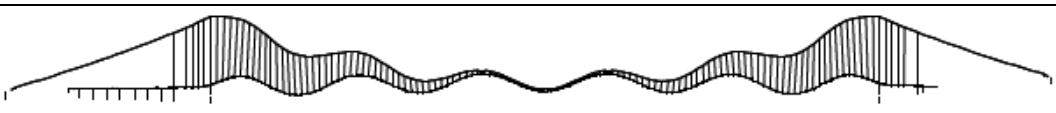
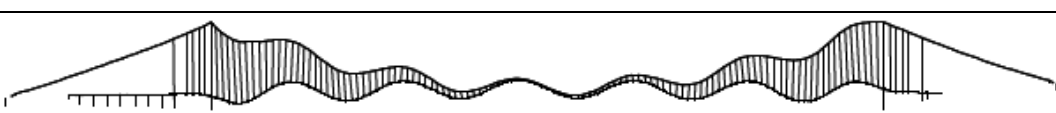
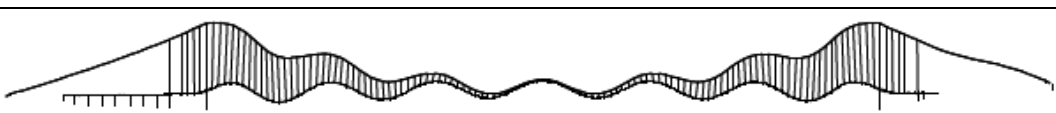
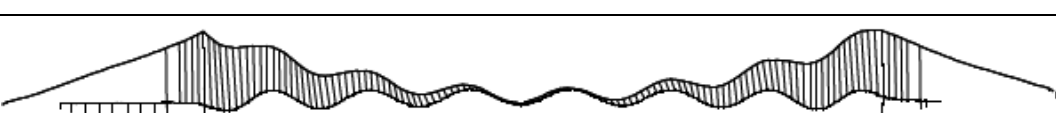
Forma del modo	U [m/s]	rms acc. [m/s <sup>2</sup> ]
 <b>Modo 3:</b> frequenza = 0.06 Hz, $M_g = 106.7 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	1.9	0.001
 <b>Modo 7:</b> frequenza = 0.08 Hz, $M_g = 54.3 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	2.3	0.001
 <b>Modo 13:</b> frequenza = 0.11 Hz, $M_g = 81.5 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	3.1	0.002
 <b>Modo 17:</b> frequenza = 0.12 Hz, $M_g = 97.5 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	3.6	0.003
 <b>Modo 25:</b> frequenza = 0.16 Hz, $M_g = 95.6 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	4.6	0.005
 <b>Modo 39:</b> frequenza = 0.19 Hz, $M_g = 97.1 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	5.4	0.007
 <b>Modo 48:</b> frequenza = 0.22 Hz, $M_g = 93.5 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	6.3	0.009

Calcoli aerodinamici, Impalcato





Codice documento  
PB0037\_F0\_ITA.doc

Rev  
F0

Data  
20/06/2011

Forma del modo	U [m/s]	rms acc. [m/s <sup>2</sup> ]
 <b>Modo 54:</b> frequenza = 0.25 Hz, $M_g = 94.2 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	7.2	0.012
 <b>Modo 63:</b> frequenza = 0.28Hz, $M_g = 86.7 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	8.1	0.015
 <b>Modo 69:</b> frequenza = 0.31 Hz, $M_g = 88.2 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	8.9	0.018
 <b>Modo 81:</b> frequenza = 0.34 Hz, $M_g = 79.3 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	9.8	0.022
 <b>Modo 85:</b> frequenza = 0.37 Hz, $M_g = 80.4 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	10.6	0.026
 <b>Modo 93:</b> frequenza = 0.39 Hz, $M_g = 73.5 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	11.4	0.029
 <b>Modo 103:</b> frequenza = 0.42 Hz, $M_g = 72.0 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	12.2	0.033

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, Impalcato	<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Forma del modo	U [m/s]	rms acc. [m/s <sup>2</sup> ]
 <b>Modo 110:</b> frequenza = 0.45 Hz, $M_g = 71.6 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	13.0	0.038
 <b>Modo 121:</b> frequenza = 0.48 Hz, $M_g = 60.7 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	13.8	0.044
 <b>Modo 130:</b> frequenza = 0.50 Hz, $M_g = 43.9 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	14.5	0.047
 <b>Modo 135:</b> frequenza = 0.53 Hz, $M_g = 54.1 \cdot 10^6 \text{ kg(m/d)}^2$	15.2	0.053
<b>SdM requirement</b>		<b>0.1</b>

#### 4.4 Conclusione

Sono stati calcolati per il ponte i livelli di spostamento verticale massimo dovuti ad eccitazione da distacco dei vortici assumendo che le forze di eccitazione si accollino i valori ottenuti dalle prove sul modello sezionale a flusso calmo. In natura, sarà quasi sempre presente della turbolenza nel flusso, che sulla base dell'esperienza ridurrà le risposte indotte dai vortici. Esiste inoltre un'assunzione intrinseca secondo la quale la correlazione della formazione dei vortici lungo la campata del ponte è simile alle prove del modello sezionale. Ciò non sarà certamente quasi mai vero in quanto la correlazione tende a diminuire con la lunghezza della campata e tenderà anche a ridurre le risposte tipo del ponte.

Migliori prestazioni di distacco dei vortici nel piegamento verticale possono essere ottenute sistemando una griglia orizzontale aperta fra il cassone ferroviario e i cassoni stradali [8]. L'effetto

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

di tali griglie non ha alcuna implicazione significativa per i coefficienti di stabilità aerodinamica o di carico da vento medio. Si suggerisce inoltre di verificare la risposta del distacco dei vortici con prove su scala 1:30 da eseguire presso la NRC in quanto l'effetto del numero di Reynolds sul flusso attraverso schermi metallici estensibili non può essere facilmente quantificato. La decisione di prevedere delle griglie orizzontali per mitigare l'eccitazione da distacco verticale dei vortici potrà essere presa sulla base dell'esperienza in servizio attualmente mancante .

## 5 Stabilità aerodinamica durante l'installazione

Il presente capitolo contiene un'analisi della stabilità aerodinamica della campata principale durante l'installazione.

### 5.1 Approccio

L'approccio viene descritto qui di seguito.


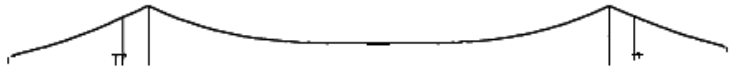
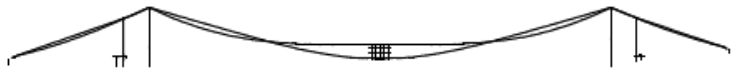


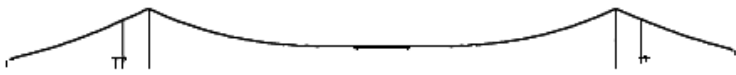


- Il modello IBDAS è stato usato per individuare le forme del modo verticale e torsionale, le frequenze proprie ed i contributi generali di masse. Per i calcoli è stata usata la versione 3.3d del modello IBDAS.
- Le derivate aerodinamiche della sezione del cassone relative alla costruzione sono state ricavate dalle prove sul modello di sezione in galleria del vento eseguite durante la fase costruttiva presso Force, [2]. Poichè le prove parallele condotte presso BLWTL non coprono una gamma abbastanza ampia di velocità del vento, si è ritenuto di usare i dati di FORCE.
- I valori strutturali ed aerodinamici sopra indicati sono stati raggruppati nell'analisi flutter AMC al fine di determinare la stabilità aerodinamica di una fase costruttiva in presenza di una data combinazione di forme di modo verticale e torsionale. Le differenze delle forme dei modi sono state prese in considerazione usando dei coefficienti di correzione modale come per il ponte finito.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato	Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011	

## 5.2 Velocità critiche del vento

Tabella 5.1 contiene le forme di modo e le frequenze proprie usate nei calcoli di flutter. La tabella contiene inoltre delle velocità critiche del vento,  $U$ , riscontrate per le combinazioni verificate di forme di modo verticale e torsionale.

Tabella 5.1 Forme di modo e velocità critiche del vento,  $U$

Modo	Forme di modo	Freq. [Hz]	Modi	$U$ [m/s]
<b>Fase 210, <math>L = 150</math> m</b>				
3 Verticali asimmetriche		0.063	3 + 10 9 + 10	> 100 67.7
9 Verticali simmetriche		0.081	3 + 18 9 + 18	> 100 > 100
10 Torsionali simmetriche		0.087		
18 Torsionali simmetriche		0.113		
<b>Fase 230, <math>L = 390</math> m</b>				
3 Verticali asimmetriche		0.064	3 + 10 9 + 10	> 100 63.5
9 Verticali simmetriche		0.080	3 + 11 9 + 11	> 100 61.5
10 Torsionali simmetriche		0.088		
11 Torsionali simmetriche		0.088		



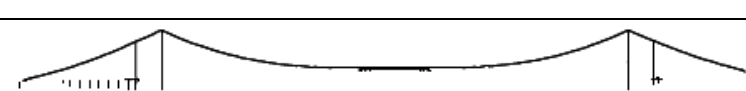



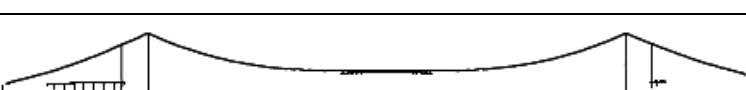
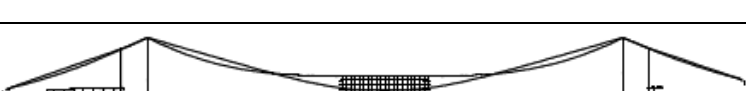


Calcoli aerodinamici, Impalcato

Codice documento  
PB0037\_F0\_ITA.doc

Rev  
F0

Data  
20/06/2011




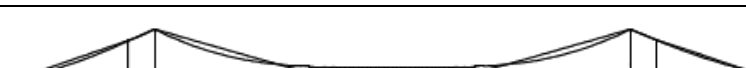




Modo	Forme di modo	Freq. [Hz]	Modi	U [m/s]
<b>Fase 240, L = 510 m</b>				
3 Verticali assimmetriche		0.064	3 + 7	52.6
7 Torsionali assimmetriche		0.068	9 + 11	60.0
9 Verticali simmetriche		0.079		
11 Torsionali simmetriche		0.089		
<b>Fase 250, L = 630 m</b>				
3 Verticali assimmetriche		0.065	3 + 7	50.7
7 Torsionali assimmetriche		0.069	3 + 11	> 100
9 Verticali simmetriche		0.079	9 + 11	60.7
11 Torsionali simmetriche		0.090		

Calcoli aerodinamici, Impalcato







Codice documento  
PB0037\_F0\_ITA.doc

Rev  
F0



Data  
20/06/2011

Modo	Forme di modo	Freq. [Hz]	Modi	U [m/s]
<b>Fase 270, L = 870 m</b>				
3 Verticali assimmetriche		0.064	3 + 7	47.2
7 Torsionali assimmetriche		0.070	9 + 12	59.2
9 Verticali simmetriche		0.079		
12 Torsionali simmetriche		0.092		
<b>Fase 340, L = 1710 m</b>				
3 Verticali assimmetriche		0.059	3 + 7	41.9
7 Torsionali assimmetriche		0.072	9 + 14	58.1
9 Verticali simmetriche		0.080		
14 Torsionali simmetriche		0.098		

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

Modo	Forme di modo	Freq. [Hz]	Modi	U [m/s]
<b>Fase 400, L = 2430 m</b>				
4 Verticali asimmetriche		0.057	4 + 5  10 + 15	40.0
5 Torsionali asimmetriche		0.072		57.2
10 Verticali simmetriche		0.079		
15 Torsionali simmetriche		0.098		
<b>Fase 1100, L = 3300 m</b>				
3 Verticali asimmetriche		0.065	3 + 8	46.0
8 Torsionali asimmetriche		0.081		

In Figura 5.1 le velocità critiche del vento,  $U$ , vengono illustrate in funzione della lunghezza totale dei cassoni nella campata principale,  $L$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

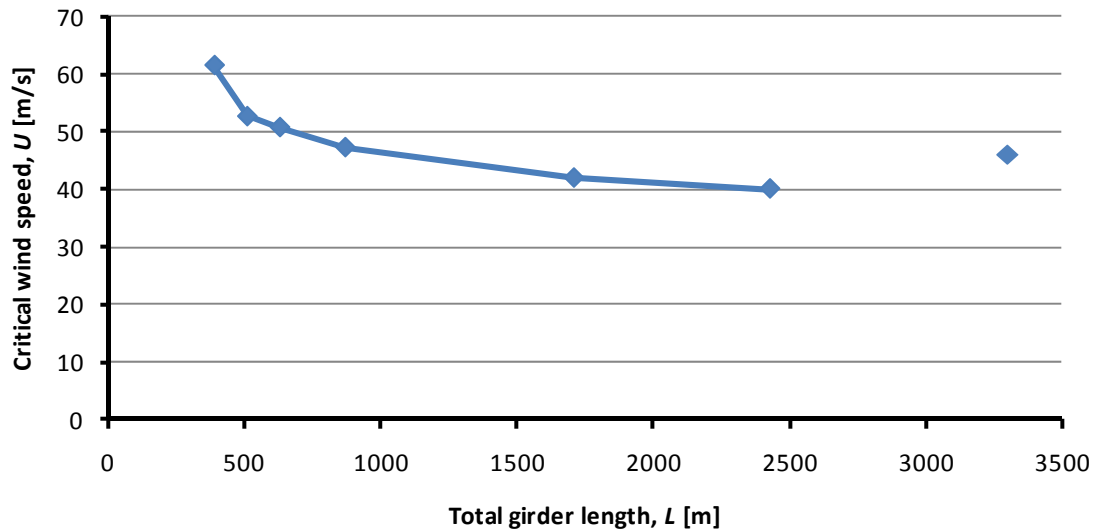


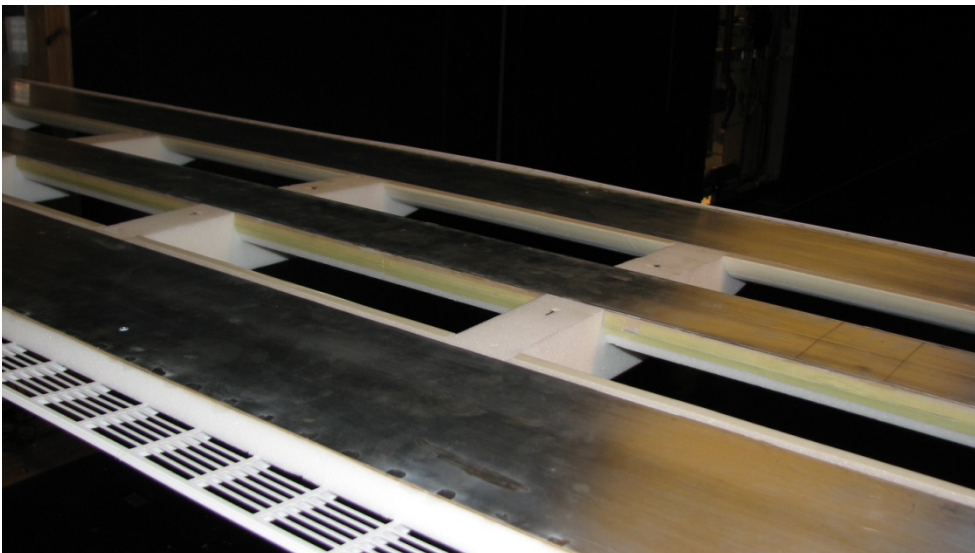
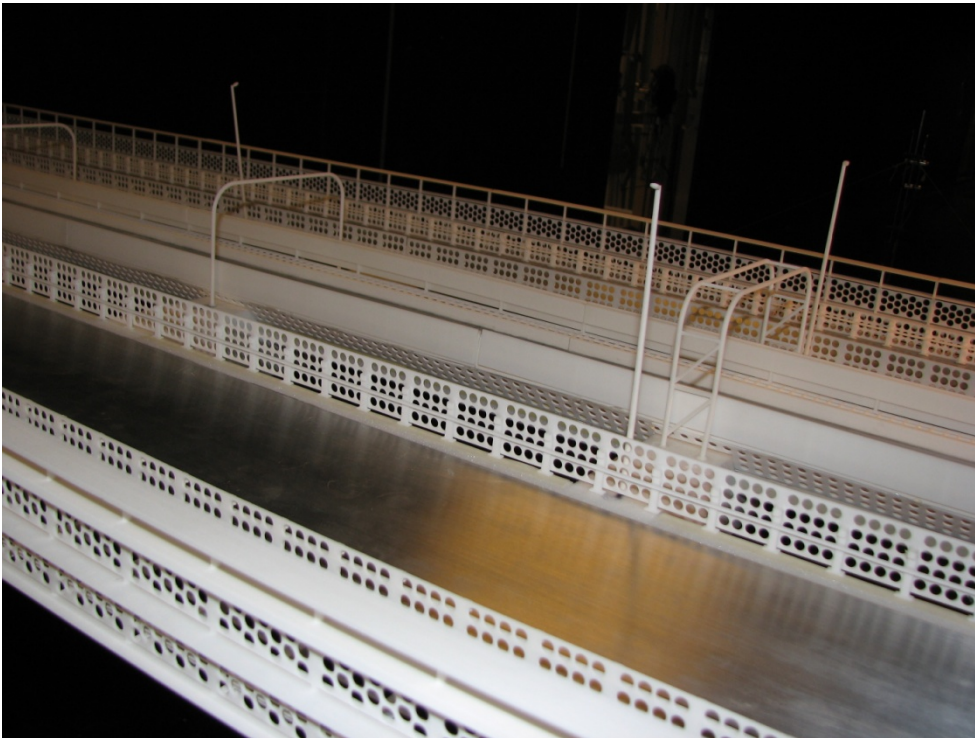


Figura 5.1 Velocità critiche del vento per le fasi costruttive selezionate.



Tutti i calcoli sopra citati si riferiscono alla nuda sezione di installazione priva di schermi frangivento, corrimano o barriere guardavia sull'impalcato. Sarà previsto tuttavia un certo tipo di corrimano di sicurezza montati durante l'installazione che andranno ad aggiungersi alla stabilità aerodinamica. Un limite superiore di aumento della velocità critica del vento può essere calcolato usando le derivate aerodinamiche misurate per l'impalcato finito insieme alle caratteristiche strutturali della fase di installazione.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						



*Figura 5.2 Foto del modello di sezione dell'impalcato presso Force con e senza schermi e corrimano.*

Ciò è stato fatto per la fase di installazione 400, dove è stata riscontrata una velocità critica del vento di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, Impalcato		Codice documento <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

$U_{cr} = 66.8 \text{ m/s}$  (con tutti gli schermi ed i corrimano)

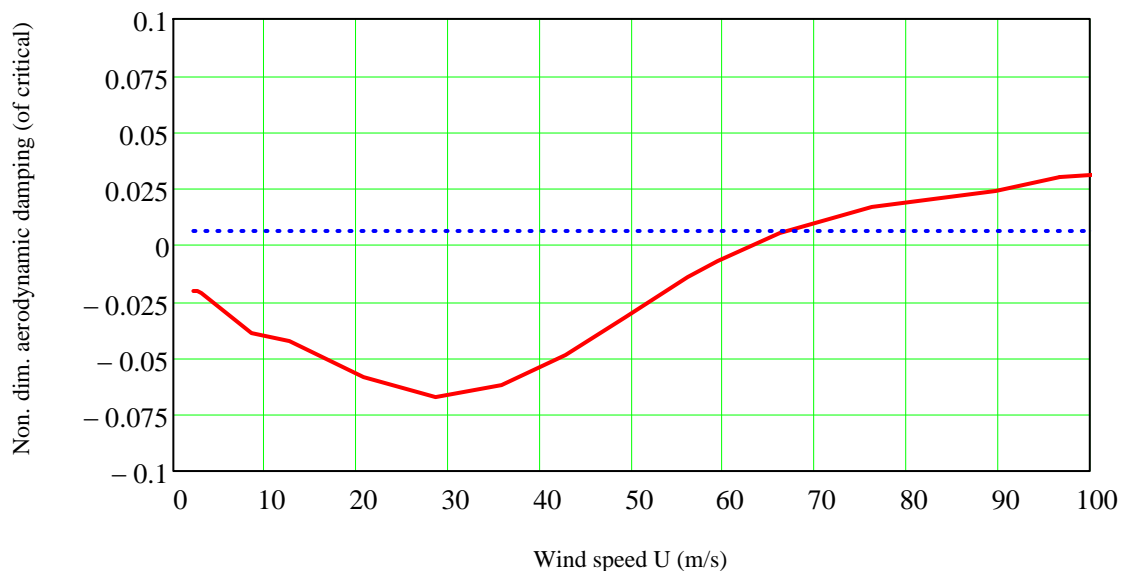
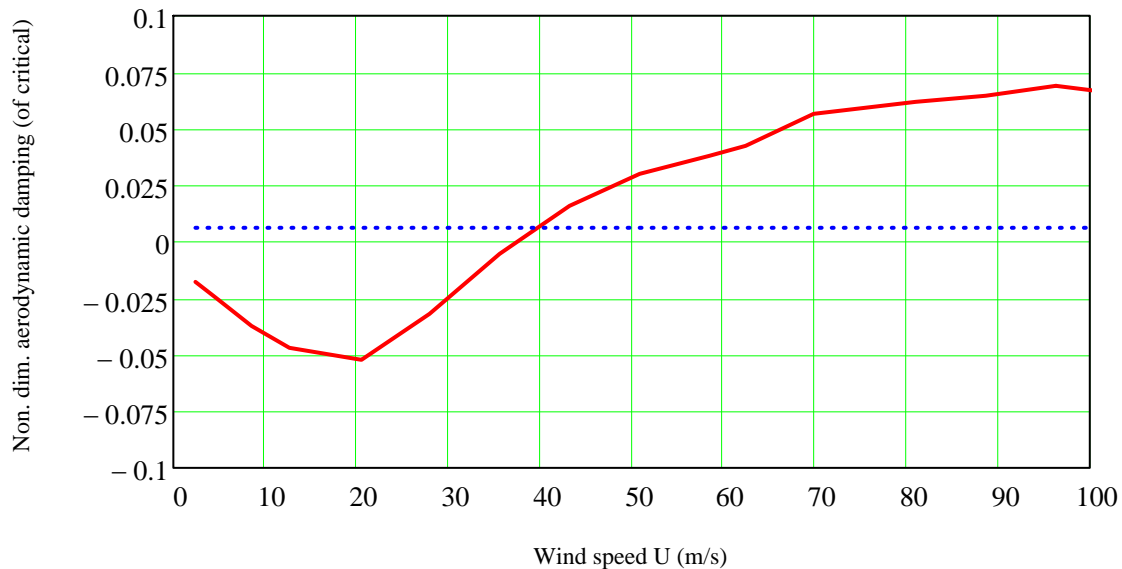


Figura 5.3 Velocità critica del vento per la fase di installazione 400, superiore: impalcato nudo, inferiore: con tutti gli schermi presenti. Derivate misurate durante le prove di Force.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, Impalcato		<i>Codice documento</i> PB0037_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

### 5.3 Sintesi della stabilità aerodinamica durante l'installazione


Tabella 5.2 contiene un prospetto delle velocità critiche del vento calcolate,  $U$ . Il numero di fase si riferisce ai calcoli IBDAS e  $L$  la lunghezza totale dei cassoni nella campata principale. La fase 1100 rappresenta il ponte finito ma ancora privo di schermi e corrimano.

Tabella 5.2 Velocità critiche del vento,  $U$ , per fasi costruttive selezionate.

Phase	L [m]	U [m/s]
210	150	67.7
230	390	61.5
240	510	52.6
250	630	50.7
270	870	47.2
340	1710	41.9
400	2430	40.0
400 (all screens)	2430	66.8
1100	3300	46.0

## 6 Riferimenti

- 1 EUROLINK S.C.p.A. CG1000-P-CL-D-P-SB-S3-00-00-00-00-03, Rev. B/ 2011-03-07, Calcoli aerodinamici, buffeting. 2011.
- 2 EUROLINK S.C.p.A. CG1000-P-RG-D-P-SB-S3-00-00-00-00-02, Rev. B/ 2011-03-07, Prove in Galleria del Vento, Cassone. 2011.
- 3 EUROLINK S.C.p.A. CG1000-P-RG-D-P-SV-SV-00-00-00-00-01, Rev. A/ 2010-12-10, Descrizione del modello GLOBAL IBDAS. 2010.
- 4 Simiu & Scanlan. Wind Effects on Structures, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley Interscience.
- 5 Fung, Y.C. An Introduction to the Theory of Aeroelasticity. Dover Phoenix Editions, 1993.
- 6 Federal Highway Administration. State-of-the-art methods for calculating flutter, vortex-induced, and buffeting response of bridge structures. Report no. FHWA/RD-80/050. April 1981.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>Calcoli aerodinamici, Impalcato</b>		<i>Codice documento</i> <i>PB0037_F0_ITA.doc</i>	<i>Rev</i> <i>F0</i>	<i>Data</i> <i>20/06/2011</i>

- 7 Larsen, A. A generalized model for assessment of vortex-induced vibrations of flexible bridges. Vol.I, pp. 383-392. 7th U.S. National Conference on Wind Engineering. UCLA 1993.
- 8 BMT Fluid Mechanics. Messina Strait Crossing Deck Wind Tunnel Testing, Section Model Studies. Report no. 431185rep1v4, December 2010.
- 9 NRC Aerodynamics Laboratory. Wind Tunnel Investigations on a 1:30 Scale Sectional Model of the Deck of the Proposed Messina Strait Bridge, Italy. Report no. LTR-AL-2010-0072, November 2010.
- 10 Larsen, A. A 1999 view on aeroelastic stability - A driving force in bridge aerodynamics. In: Wind Engineering into the 21st Century, Larsen, Larose and Livesey (eds.), Vol. 1, pp. 55-66. 1999.
- 11 Politecnico di Milano. Approfondimento del comportamento aerodinamico e aeroelastico dell'impalcato III Fase. March 2004.
- 12 BMT Fluid Mechanics. Messina Strait Crossing, Italy, Deck -Tests D8, Section Model Studies. Report no. 431185rep2v3, 11 May 2011.



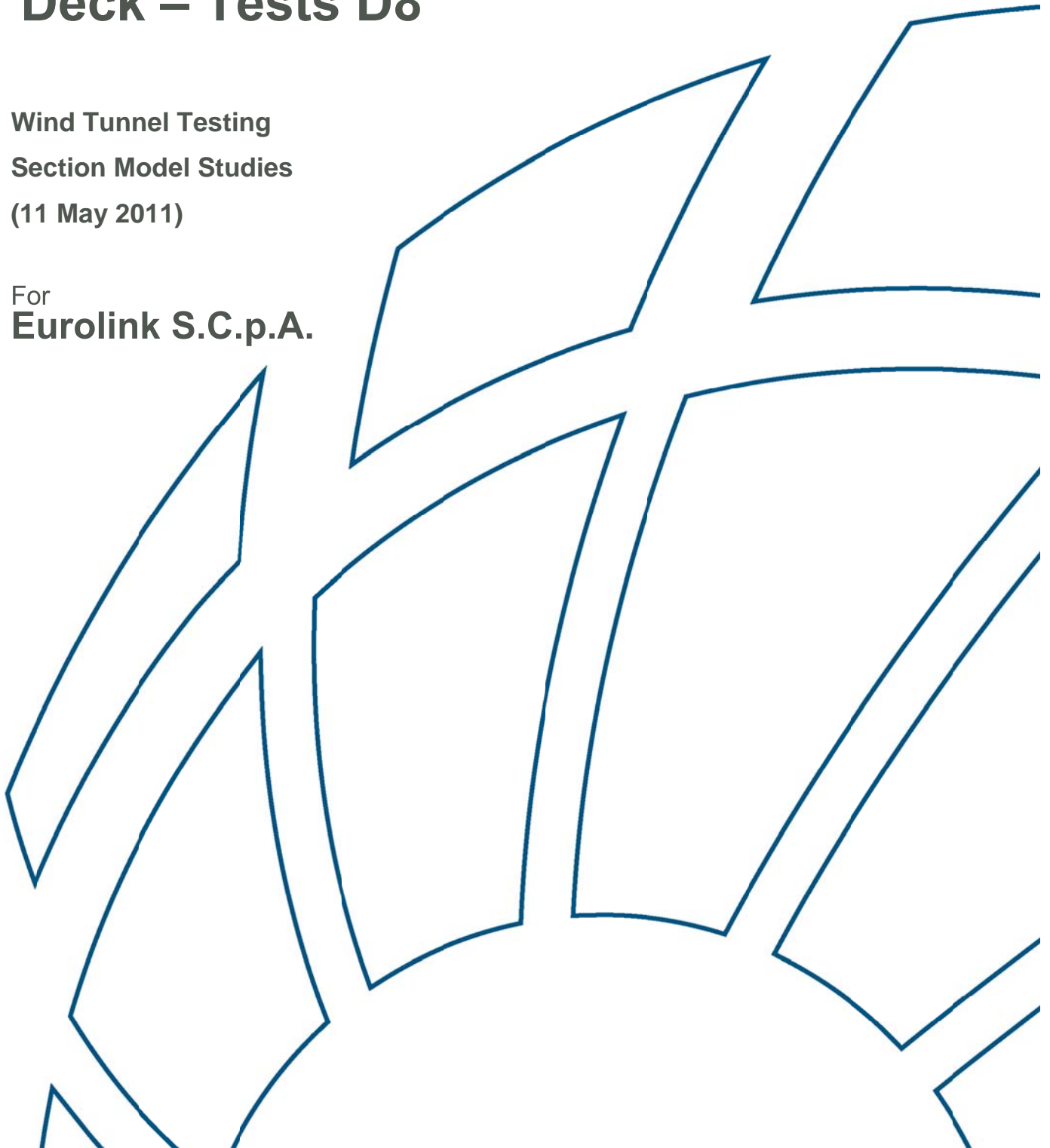
# **Project No. 431185/10**


## **Messina Straits Crossing, Italy**

### **Deck – Tests D8**

Wind Tunnel Testing  
Section Model Studies  
(11 May 2011)

For  
**Eurolink S.C.p.A.**



<b>Report Title</b>	<b>Messina Straits Crossing Deck – Tests D8 Wind Tunnel Testing, Section Model Studies</b>		
<b>Client:</b>	<b>Eurolink S.C.p.A.</b>		
<b>Document No:</b>	<b>431185rep2v3</b>	<b>Release: 3</b>	<b>Copy No:</b>
<b>Status</b>	<b>Final</b>		
<b>Report Date:</b>	<b>11<sup>th</sup> May 2011</b>		
<b>Holds:</b>			
	<b>Name:</b>	<b>Signature:</b>	<b>Date:</b>
<b>Prepared by:</b>	<b>Ms Y Kaneko</b>		<b>11/05/11</b>
<b>Checked by:</b>	<b>Mr S Cammelli</b>		<b>11/05/11</b>
<b>Approved by:</b>	<b>Mr A Wyatt</b>		<b>11/05/11</b>
<b>Distribution:</b>	<b>Copy no. to Client</b>		
	<b>Copy no. to BMT Records</b>		
<b>Previous Release History:</b>	<b>Release No:</b>	<b>Status:</b>	<b>Date:</b>
<b>431185rep2v1</b>	<b>1</b>	<b>Draft Report for Internal Review</b>	<b>20 April 2011</b>
<b>431185rep2v1</b>	<b>1</b>	<b>Draft Report for Client Review</b>	<b>21 April 2011</b>

# Messina Straits Crossing

## Deck – Tests D8

### Wind Tunnel Testing

### Section Model Studies

#### Contents

1. Introduction .....	6
1.1. Background.....	6
1.2. Structure Details.....	6
1.3. Requirements for Wind Tunnel Study .....	6
1.4. Methodology .....	7
2. Results.....	10
2.1. Static Wind Loading .....	10
2.2. Flutter .....	10
2.3. Vortex Shedding Results .....	11
3. Discussion of Results.....	12
APPENDIX A. Structural and Dynamic Properties .....	23
A.1. Structural and Dynamic Properties .....	23
APPENDIX B. Model Design And Construction.....	23
B.1. Models Design and Construction .....	23
B.2. Pressure Drop Coefficient – Measurement & Analysis .....	27
B.3. Model Approval .....	30
APPENDIX C. Static Wind Loading Studies.....	31
C.1. Model Mounting & Instrumentation .....	31
APPENDIX D. Dynamic Response Studies .....	31
D.1. Model Mounting & Instrumentation .....	31
D.2. Experimental Conditioning.....	32
D.3. Model Calibration.....	34
D.4. Damping Devices.....	34
D.5. Turbulent Flow Set Up .....	34
APPENDIX E. Full Set of Results.....	35

# EXECUTIVE SUMMARY

---

## **Background**

This document has been prepared by BMT Fluid Mechanics Limited (BMT) for COWI, acting on behalf of Eurolink S.C.p.A. to summarise the results of section model testing commissioned to study the wind effects relevant to the design of the deck of the Messina Straits Crossing in Italy.

The wind tunnel studies were carried out to derive a detailed quantification of the static wind loading and aerodynamic stability of the bridge deck by way of section model wind tunnel testing.

The wind tunnel tests were carried out in BMT's aeronautical wind tunnel using a 2-dimensional, 1:65 scale section model of the bridge deck. The tests were conducted for the 3 bridge deck configurations characterised by different porous screens on the wind shield and crash barriers, as follows:

- 1) Screen A – stretched metal screen/ pressure drop of 2.7 on wind shields and crash barriers
- 2) Screen A+H - stretched metal screen / pressure drop of 3.7 on wind shields and crash barriers and stretched metal screen between the road decks and railway deck
- 3) Screen B – etched brass screen / pressure drop of 2.7 on wind shields and crash barriers

Tests were conducted for the above configurations to derive the static wind loads, divergent responses and vortex shedding responses. For the vortex shedding tests additional screen configurations were tested to assess the sensitivity of the responses to the type of screen used (stretched metal / etched metal).

## **Results**

The main results of the wind tunnel testing are as follows:

### ***STATIC WIND LOADING***

- Static load coefficients were measured for configurations 1, 2 and 3 for wind angles in the range  $\pm 10^\circ$  in  $1^\circ$  increments
- The static load coefficients, measured for Reynolds number of  $\sim 1.8 \times 10^6$  based on the width of the section (60.4m at full scale) at  $0^\circ$  wind incidence, are as follows:

Screen	$C_D$	$C_L$
A (D7)	0.09	-0.07
A (D8)	0.10	-0.06
A+H	0.10	-0.06
B	0.09	-0.06

### ***FLUTTER***

The divergent response of the bridge deck was measured for configurations 1, 2 and 3 at  $0^\circ$  wind angle. The deck was stable for all configurations tested well above the design wind speed of 75m/s. Flutter instabilities were observed for the configuration with Screen A at a reduced wind speed of  $\sim 21$  (based on the torsional frequency of the deck).

### ***VORTEX SHEDDING RESPONSE***

The vortex shedding response of the bridge deck was measured for a range of configurations, characterised by a different layout and pressure drop of the wind shields and crash barriers.

The maximum vortex shedding response is observed in both the vertical and torsional modes of the bridge for all configurations, at reduced wind speeds of  $\sim 0.5$  for bending and torsion and 1 for torsion.

The strength of the responses and its sensitivity to structural damping varies with the type of screens considered.

The horizontal screen H has a mitigating effect on the bending vortex shedding responses.

# Messina Straits Crossing

## Deck – Tests D8

### Wind Tunnel Testing

---

## 1. Introduction

### 1.1. Background

This document has been prepared by BMT Fluid Mechanics Limited (BMT) for COWI, acting on behalf of Eurolink S.C.p.A. to summarise the results of section model testing commissioned to study the wind effects relevant to the design of the deck of the Messina Straits Crossing in Italy.

### 1.2. Structure Details

The Messina Straits Crossing is a suspension bridge linking the Island of Sicily with mainland Italy, and has a total length of ~3300m. Two twin-leg towers, 399m tall, support the suspension cables. The bridge has a triple deck configuration; a rail deck in the centre, with two traffic/pedestrian decks on either side. The total width of the deck is 60.4m, including the 2 gaps of 8.0m between the rail deck and traffic deck. Figure 1.1 shows the arrangement of the deck and the relevant geometrical features.

### 1.3. Requirements for Wind Tunnel Study

The main requirements of the studies are as follows:

- Provide an assessment of the static wind loading for three proposed arrangements of the bridge deck.
- Provide an assessment of the vortex shedding and divergent responses for three proposed arrangements of the bridge deck.

## 1.4. Methodology

### 1.4.1. Structural and Dynamic Properties

The structural properties of the proposed Messina Bridge section were supplied by COWI and are detailed in Appendix A.

### 1.4.2. BMT's Aeronautical Wind Tunnel & Flow Conditions

The section model tests have been conducted in BMT's aeronautical wind tunnel facility. The tunnel has an octagonal cross section test section, which is 2.74 m wide x 2.14 m high. The controllable wind speed range is between 0.2 m/s - 65 m/s. The wind tunnel tests were conducted in smooth flow. The maximum level of turbulence inherent in smooth flow in the wind tunnel is below 0.5%.

Two test cases were also run in turbulent flow. Details of the turbulence simulation are given in Appendix D.

### 1.4.3. Wind Tunnel Model

A rigid model of the bridge deck made in high-modulus carbon-fibre at a scale of 1:65 was used for the studies. The model was built for the D7 tests based on drawing information supplied by COWI. Further details on model design & construction are provided in Appendix B.

The following photograph shows the wind tunnel model:



### 1.4.4. Model Configurations and Test Matrix

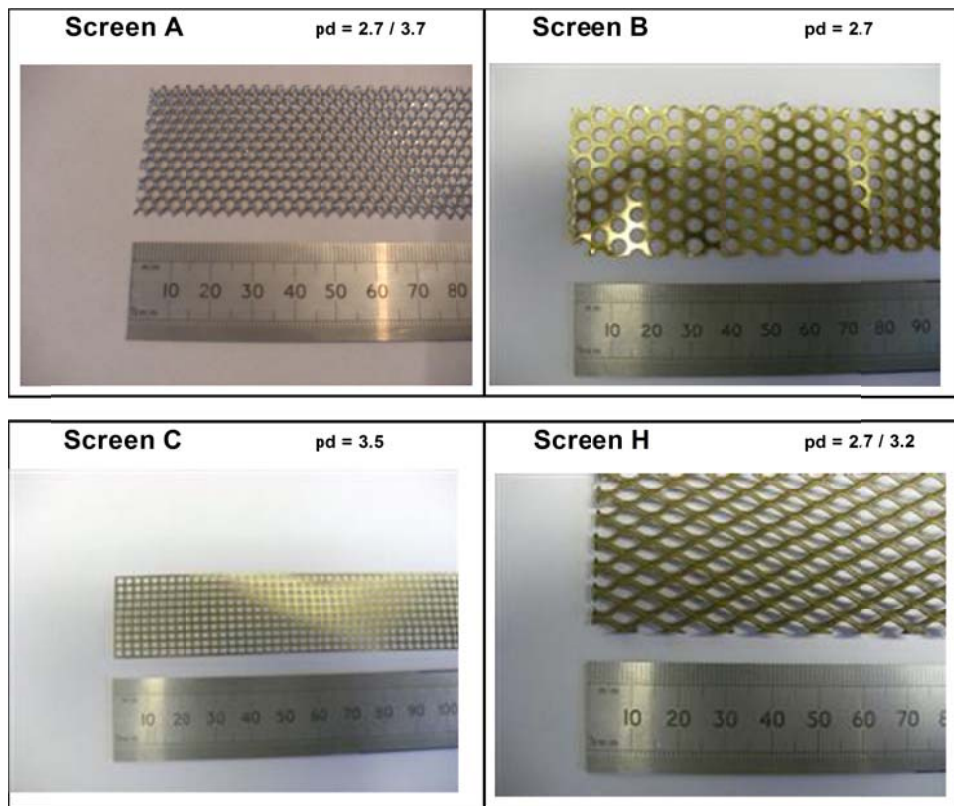
The deck section was tested for configuration C5/63 of the lower side panel of the rail deck. The following configurations of screens for the wind shields and crash barriers were tested

- 1) Screen A – stretched metal screen / pressure drop of 2.7 on wind shields and crash barriers

- 2) Screen A+H - stretched metal screen / pressure drop of 3.7 on wind shields and crash barriers and stretched metal screen between the road decks and railway deck
- 3) Screen B – etched brass screen / pressure drop of 2.7 on wind shields and crash barriers

It is noted that Screen A was found to be directional and having a pressure drop of 2.7 or 3.7 depending on which side of screen would face the incoming wind. As a result vortex shedding tests were also conducted for screen A facing the wind for the direction with pressure drop of 3.7. Additional vortex shedding tests were also conducted for an etched metal screen of pressure drop of 3.5 (Screen C).

The following Table shows the mesh used to modelled the screen and indicates the pressure drop. Further details on the pressure drop measurements are provided in Appendix B.





The complete test matrix including basic and additional tests undertaken by BMT is as follows.

Configuration	Pressure drop on outer wind screens	Pressure drop on inner crash barriers	Flow	Static Wind Loading	Flutter	Aerodynamic Damping	Vortex Shedding
<b>BASIC STUDIES</b>							
Screens A	2.7	2.7	SMOOTH	YES	YES	YES	YES
Screens A + H	3.7	3.7	SMOOTH	YES	YES	YES	YES
Screens B	2.7	2.7	SMOOTH	YES	YES	YES	YES
<b>ADDITIONAL STUDIES</b>							
Screens A + H	2.7	2.7	TURBULENT	NO	YES	NO	NO
Screens A	3.7	3.7	SMOOTH	NO	NO	NO	YES
Screens B (model rotated 180°)	2.7	2.7	SMOOTH	NO	NO	NO	YES
Screens B + H	2.7	2.7	SMOOTH	NO	NO	NO	YES
Screens B	2.7	2.7	TURBULENT	NO	NO	NO	YES
Screens Ai - wind shields with alternating pressure drop	2.7 & 3.7	2.7	SMOOTH	NO	NO	NO	YES
Screens Aii - wind shields with 3.7 pressure drop	3.7	2.7	SMOOTH	NO	NO	NO	YES
Screens C	3.5	3.5	SMOOTH	NO	NO	NO	YES

#### 1.4.5. Details of Measurements and Analysis

For the pressure drop tests, details of the experimental set-up, instrumentation and results are included in Appendix B.

For the static wind loading tests, details of the experimental set-up and instrumentation are included in Appendix C.

For the dynamic response tests, details of the experimental set-up and instrumentation are included in Appendix D.

## 2. Results

### 2.1. Static Wind Loading

Static wind loads were measured in terms of the mean lateral force, mean normal force and pitching moment about the centre of rotation of the deck and are reported as static wind load coefficients in wind axis ( $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ ) defined as follows:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2}$$

where  $D$ ,  $L$  and  $M$  are the wind axis along force, across wind force and pitching moment respectively.  $U$  is the mean wind speed,  $\rho$  is the density of air and  $B$  is the reference dimension (Full Scale deck width  $B=60.4\text{m}$ ).

Figure 2.1 details the sign convention adopted for the data presentation.

The static load coefficients were measured for the following configuration:

1. Screen A
2. Screen A+H
3. Screen B

The measurements were taken for a Reynolds numbers of  $1.8 \times 10^6$  in  $1^\circ$  increments covering an angle range of  $-10^\circ$  to  $10^\circ$ .

In addition, drag coefficients were also plotted against Reynolds Number for  $0^\circ$  wind incidence.

Results are presented in form of:

- Variation of drag, lift and moment coefficients with wind angle in smooth flow for all configuration tested (including a comparison with the results of tests D7) - **Figure 2.2**
- Variation of drag coefficient with Reynolds numbers in smooth flow for all configuration tested - **Figure 2.3**

### 2.2. Flutter

The objective of the tests was to investigate the divergent response of the bridge deck up to and above the wind speed of  $75\text{m/s}$ . Dynamic responses were measured in terms of bending and torsion for a level of structural damping  $\sim 0.1\%$  of critical.

The responses were measured for the following configurations:

1. Screen A
2. Screen A+H
3. Screen B

The measurements were taken for 0° wind incidence.

Results are presented in form of:

- Variation of model scale RMS bending and torsion acceleration ( at the edge of the deck) with reduced wind speed (  $U/ f_v B$ , where  $f_v$  is the torsion frequency and  $B$  is the width of the deck) - **Figure 2.4**

### 2.3. Vortex Shedding Results

The objective of the tests was to investigate the vortex shedding response of the bridge deck in bending and torsion. Dynamic responses were measured for a range of damping levels and deck configurations for 0° wind incidence.

Results are presented in form of variation of model scale RMS bending and torsion acceleration (at the edge of the deck) with reduced wind speed ( $U/ f_v B$ , where  $f_v$  is the vertical frequency and  $B$  is the width of the deck) in the following figures:

- 1 Screen A (pressure drop = 2.7) **Figure 2.5a**
- 2 Screen A (pressure drop = 3.7) **Figure 2.5b**
- 3 Screen A + H (pressure drop = 3.7) **Figure 2.5c**
- 4 Screen B (pressure drop = 2.7) **Figure 2.5d**
- 5 Screen B, model rotated of 180° (pressure drop = 2.7) **Figure 2.5e**
- 6 Screen B + H (pressure drop = 2.7) **Figure 2.5f**
- 7 Screen Ai (pressure drop alternating 2.7+3.7 on wind screens & 2.7 on crash barriers) **Figure 2.5g**
- 8 Screen Aii (pressure drop = 3.7 on wind shields and 2.7 on crash barriers) **Figure 2.5h**
- 9 Screen C (pressure drop = 3.5) **Figure 2.5i**
- 10 Screen B (pressure drop = 2.7) – Turbulent Flow **Figure 2.5j**

In the Figures the Scruton Number of each test configuration is provided. The Scruton Number for bending and torsion responses are defined as follows:

#### Bending

$$Sc = \delta \cdot M / (\rho_a \cdot B^2)$$

Where:

$\delta$  is the structural damping [logdec]

$M$  is the mass [ $\text{kgm}^{-1}$ ]

$\rho_a$  is the density of air [ $\text{kgm}^{-2}$ ]

$B$  is the reference dimension [m] taken as 60.4m

**Torsion**

$$Sc = \delta \cdot MMI / (\rho_a \cdot B^4)$$

Where:

$\delta$  is the structural damping [logdec]

MMI is the mass moment of inertia [ $\text{kgm}^2\text{m}^{-1}$ ]

$\rho_a$  is the density of air [ $\text{kgm}^{-2}$ ]

B is the reference dimension [m] taken as 60.4m

### 3. Discussion of Results

#### Vortex Shedding

The vortex shedding response of the bridge is observed to occur at multiple wind speeds for each configuration. Three vortex shedding peaks were observed: one in bending at reduced wind speed of 0.5 and two in torsion at reduced wind speeds of 0.8 and 1.4 based on the first bending frequency of the bridge.

The magnitude of the peaks, in particular the torsion peaks, varies significantly depending on the type of screen used. Screen A, an expanded screen grille, could generate 3-dimensional flow on the deck and suppress partially the correlation of the vortices shed along the decks, which results in lower magnitude peaks. For both Screen B and C, the vortex shedding responses are fairly violent and well defined, which is clearly a function of the fact that the screen is made of etched brass and therefore more 2-dimensional. Mild turbulence completely mitigates the torsion responses for the configuration with Screen B.

The table below presents a summary of the vortex shedding results, in the form of the magnitudes of each of the vortex shedding peak, for each screen configuration, for the lowest level of damping.

Configuration	Pressure drop on outer wind screens	Pressure drop on inner crash barriers	RMS Vertical Peak [ $\text{ms}^{-2}$ ]	RMS Torsional Peak 1 [ $\text{ms}^{-2}$ ]	RMS Torsional Peak 2 [ $\text{ms}^{-2}$ ]
Screens A	2.7	2.7	3.1 (sc = 0.079)	0.7 (sc = 0.011)	4.5 (sc = 0.011)
Screens A	3.7	3.7	2.3 (sc = 0.079)	2.6 (sc = 0.011)	0.8 (sc = 0.011)
Screens A + H	3.7	3.7	0.3 (sc = 0.079)	1.8 (sc = 0.011)	0.4 (sc = 0.011)
Screens B	2.7	2.7	4.1 (sc = 0.079)	3.1 (sc = 0.011)	4.8 (sc = 0.011)
Screens B (model rotated 180°)	2.7	2.7	3.6 (sc = 0.105)	3.7 (sc = 0.011)	5.5 (sc = 0.011)
Screens B + H	2.7	2.7	1.4 (sc = 0.105)	2.7 (sc = 0.011)	4.6 (sc = 0.011)
Screens A i - wind shields with alternating pressure drop	2.7 & 3.7	2.7	3.1 (sc = 0.079)	0.1 (sc = 0.011)	3.0 (sc = 0.011)
Screens A ii - wind shields with 3.7 pressure drop	3.7	2.7	3.4 (sc = 0.105)	0.6 (sc = 0.011)	5.2 (sc = 0.011)
Screens C	3.5	3.5	4.0 (sc = 0.105)	4 (sc = 0.011)	6.1 (sc = 0.011)

**Flutter**

The deck was found stable well above the design wind speed of 75m/s. Flutter instabilities developed for the configurations with Screen A and Screen A+H at critical reduced wind speeds around 21. It is noted that for the configuration with screen H in place the instabilities did not fully develop in the wind tunnel but aerodynamic damping close to zero was observed. The effect of turbulence on Screen A configuration was to reduce the critical reduced wind speed for the onset of flutter to 19; in this case the flutter motion was more violent.

### Figures

Figure 1.1: Messina Straits Crossing – Deck Section

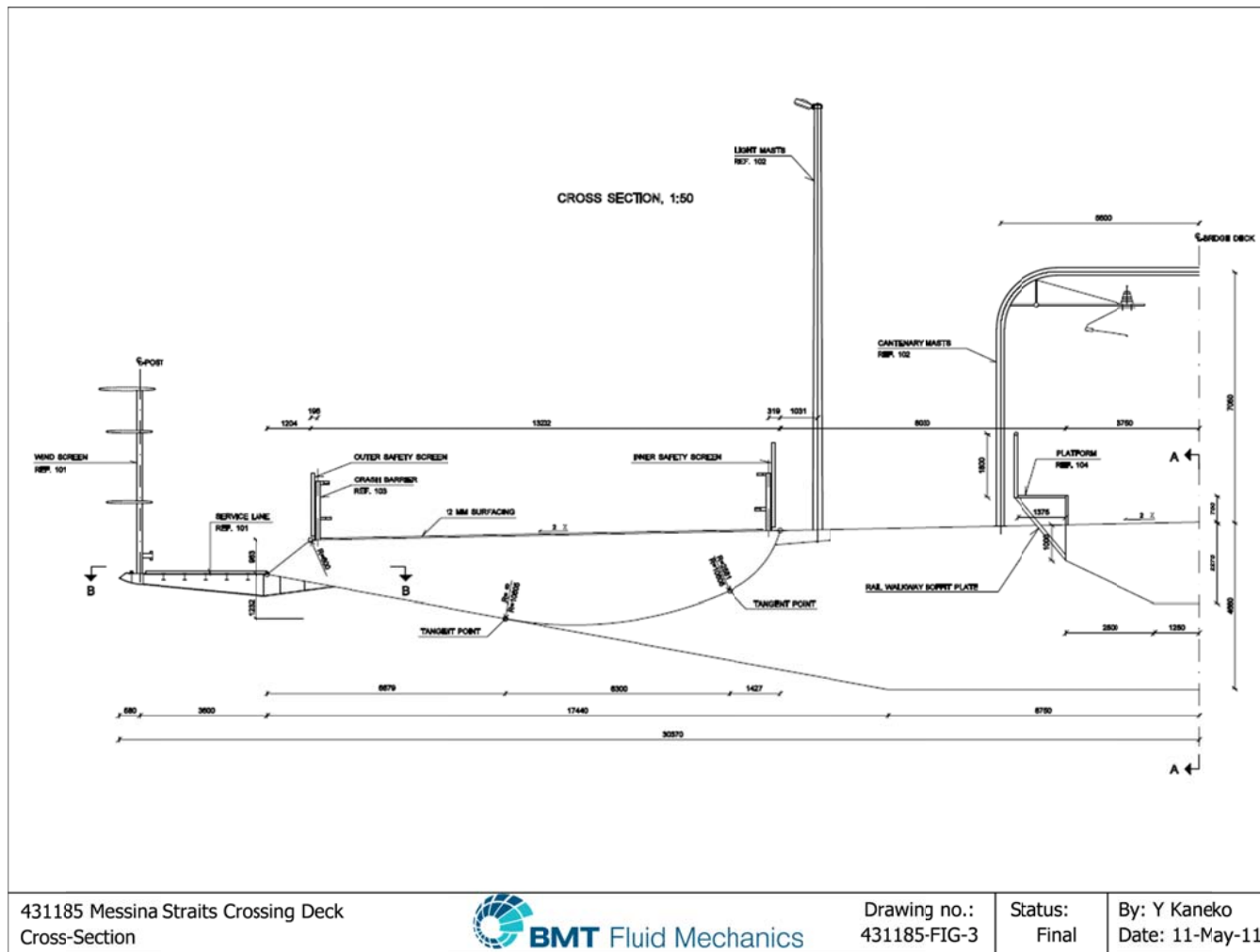


Figure 2.1: Sign Convention

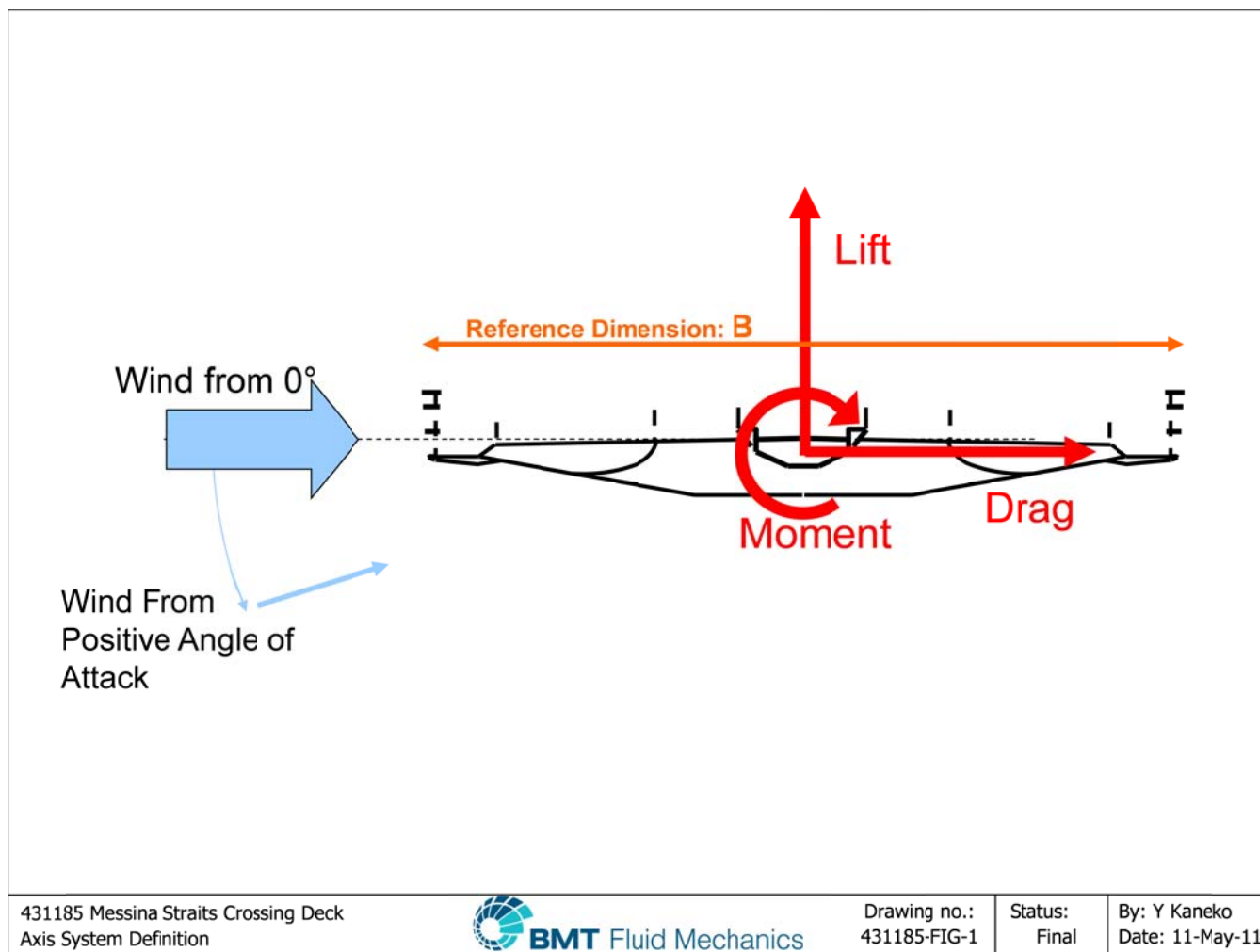


Figure 2.2: Variation of Static Mean Load and Moment with Wind Angle for Three Configurations, Measured at  $Re=1.8 \times 10^6$

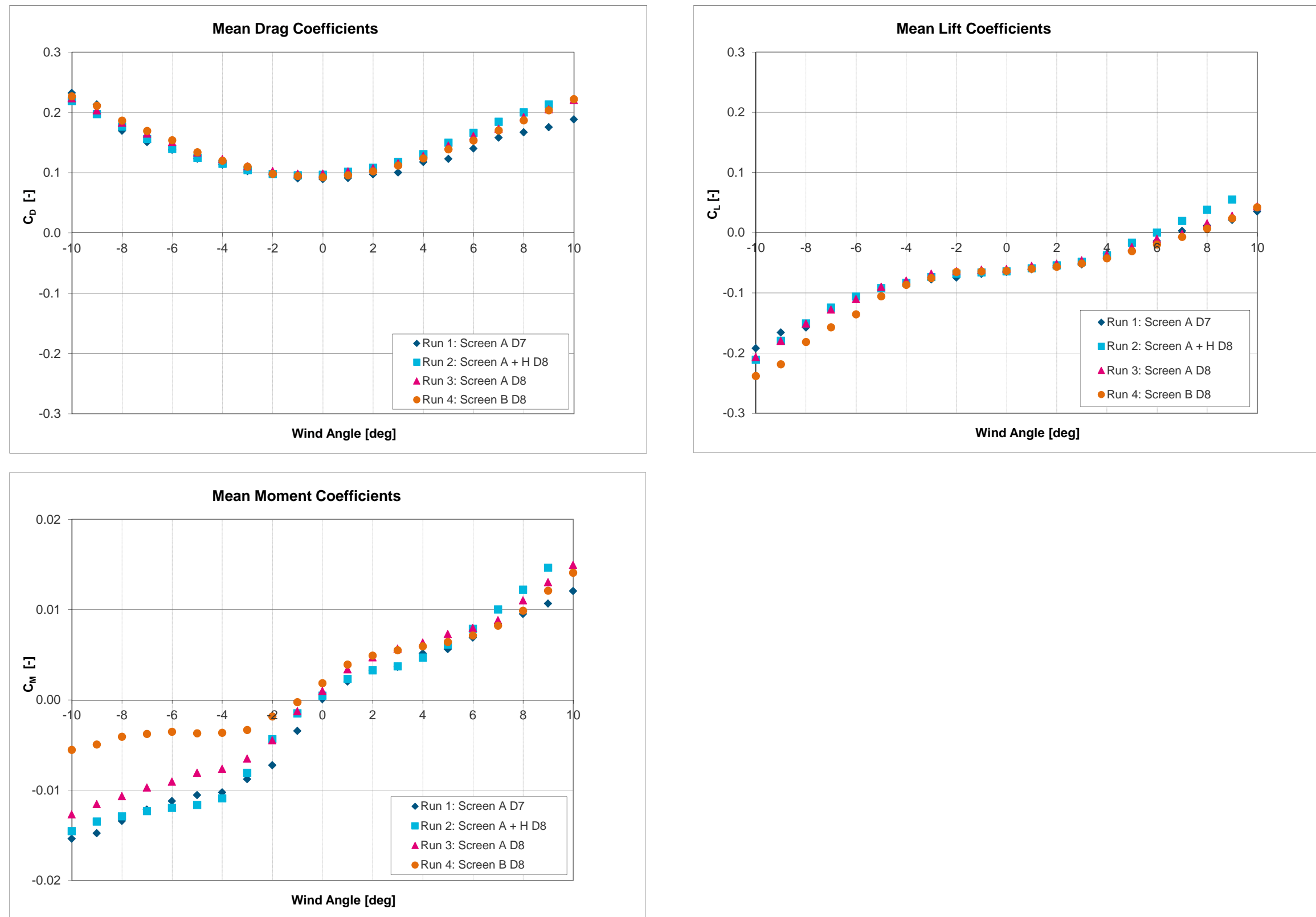


Figure 2.3: Variation of Drag Coefficients with Reynolds Number, Measured with Wind Angle = 0° for 2 Configurations

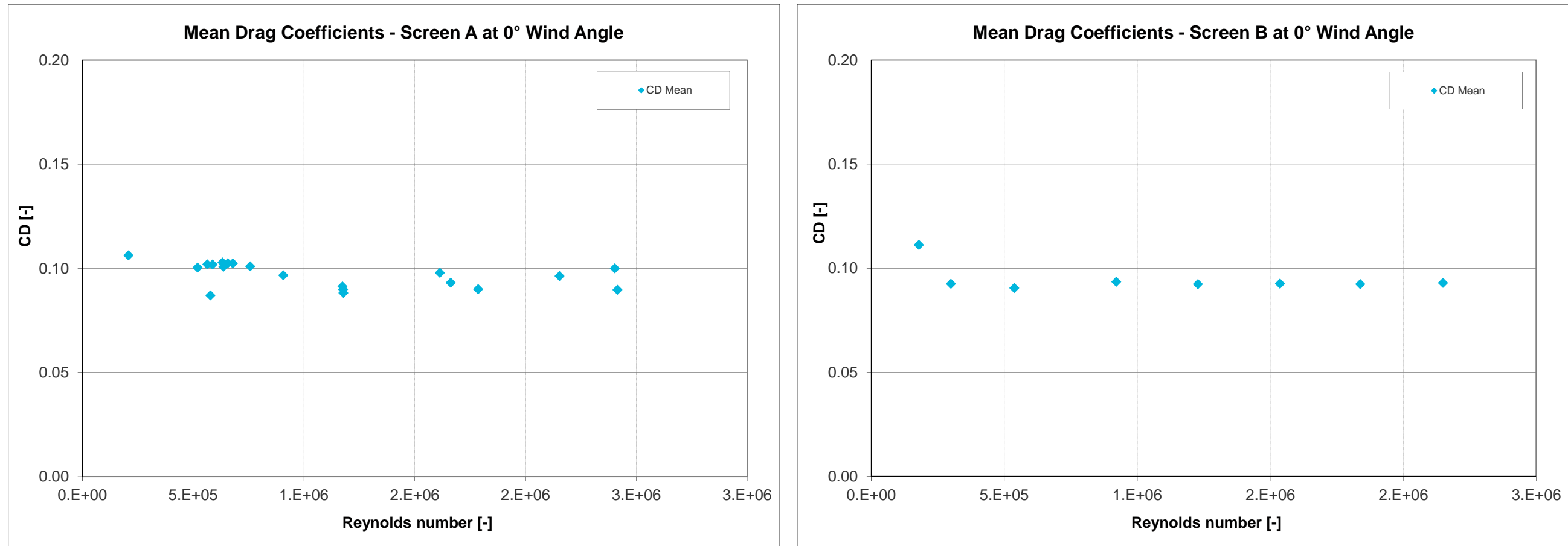
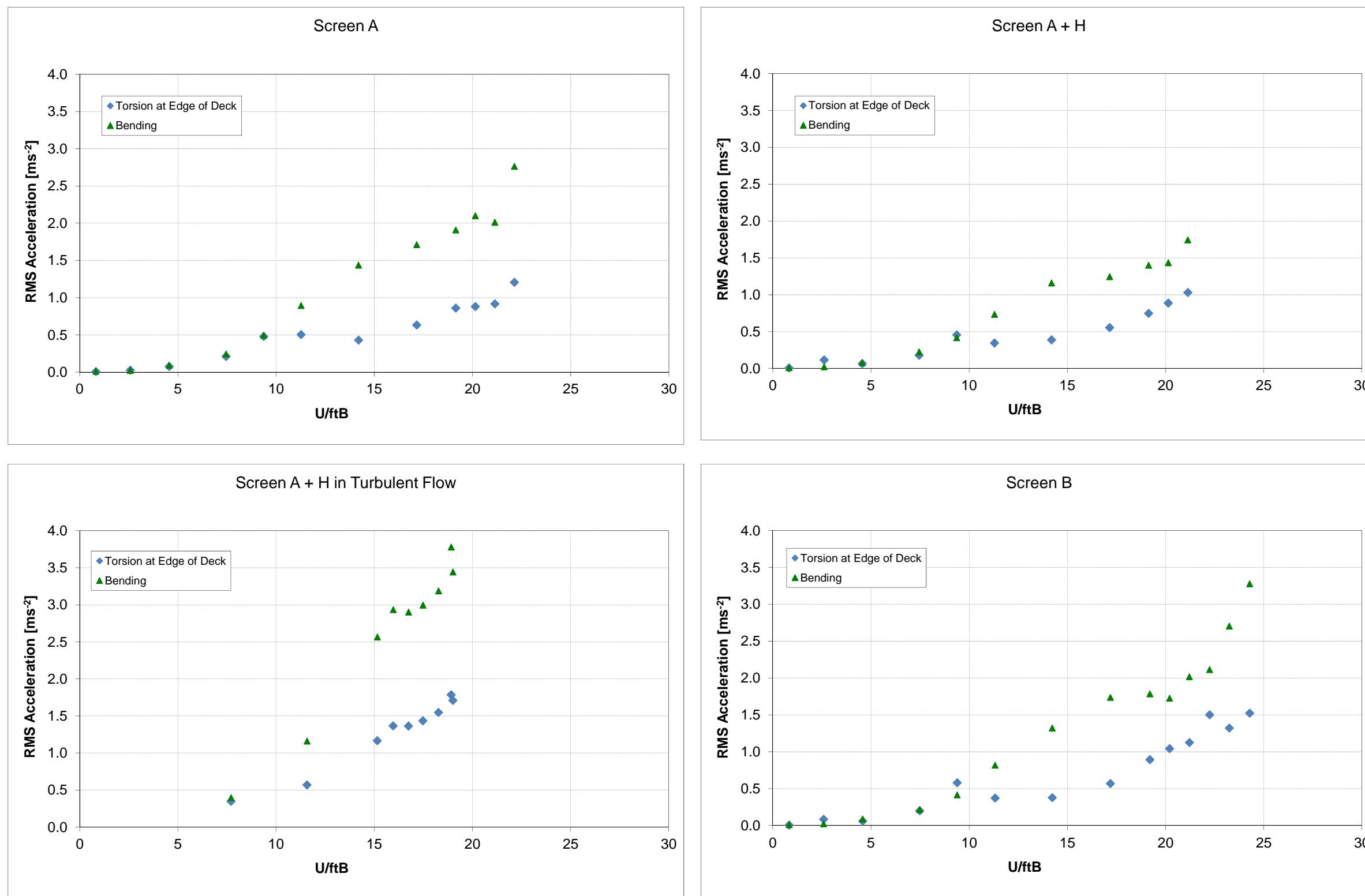




Figure 2.4: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, for Four Configurations



**Note:**

Flutter was observed for Screen A in smooth flow and screen A+H in mild turbulent flow at reduced wind speeds of ~22 and ~19. For Screen A+H, low aerodynamic damping was observed at reduced with speeds above 20. No instabilities were observed for Screen B.

Figure 2.5a: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen A (pressure drop = 2.7)

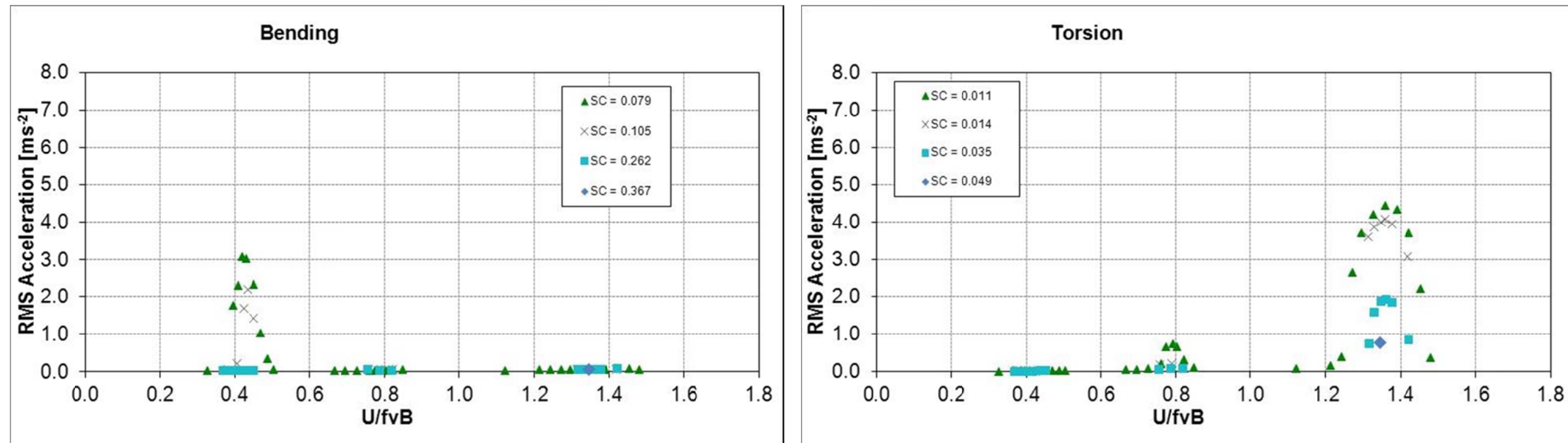


Figure 2.5b: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen A (pressure drop = 3.7)

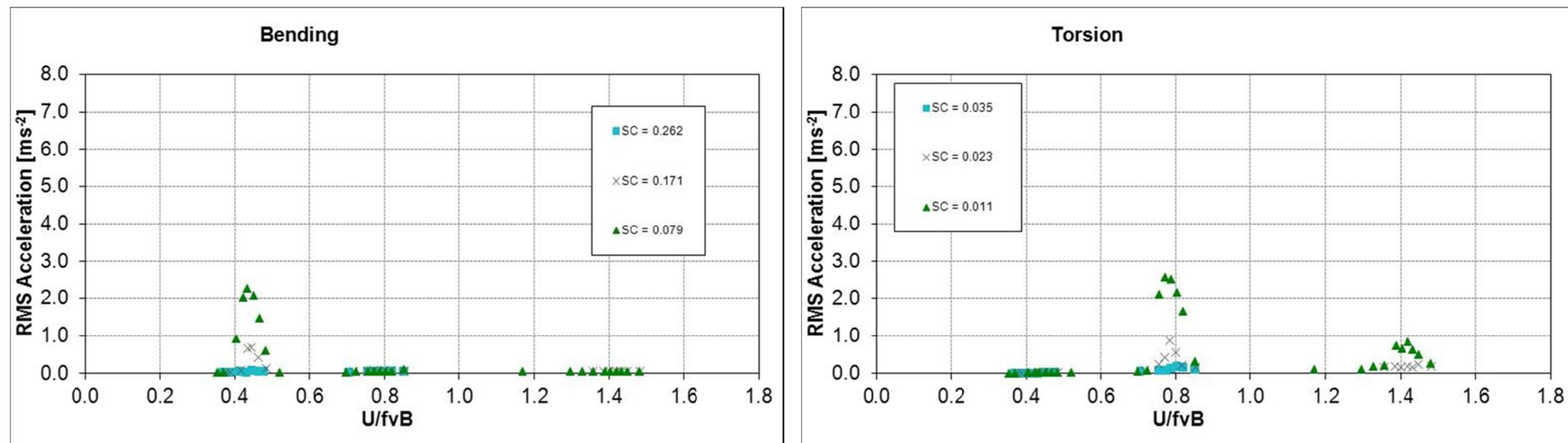


Figure 2.5c: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen A + H (pressure drop = 3.7)

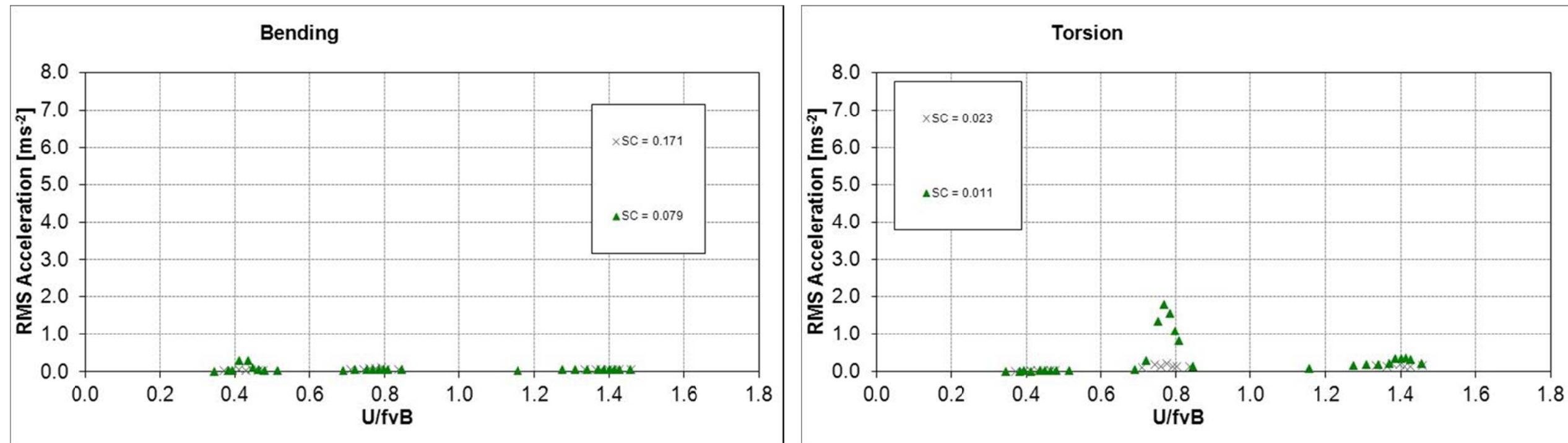


Figure 2.5d: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen B (pressure drop = 2.7)

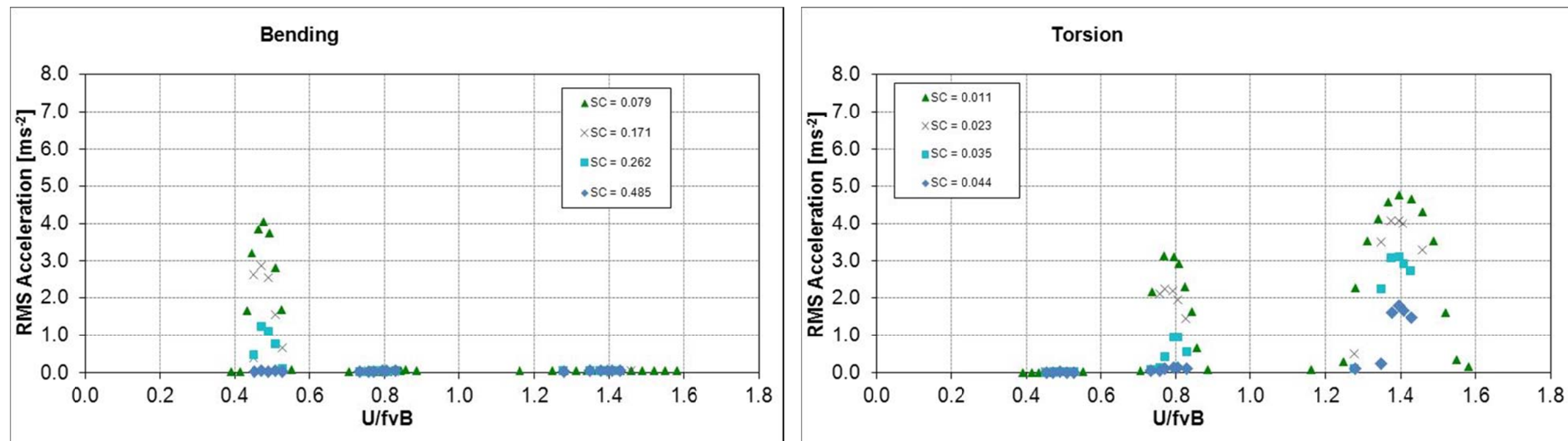


Figure 2.5e: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen B, model rotated 180° (pressure drop = 2.7)

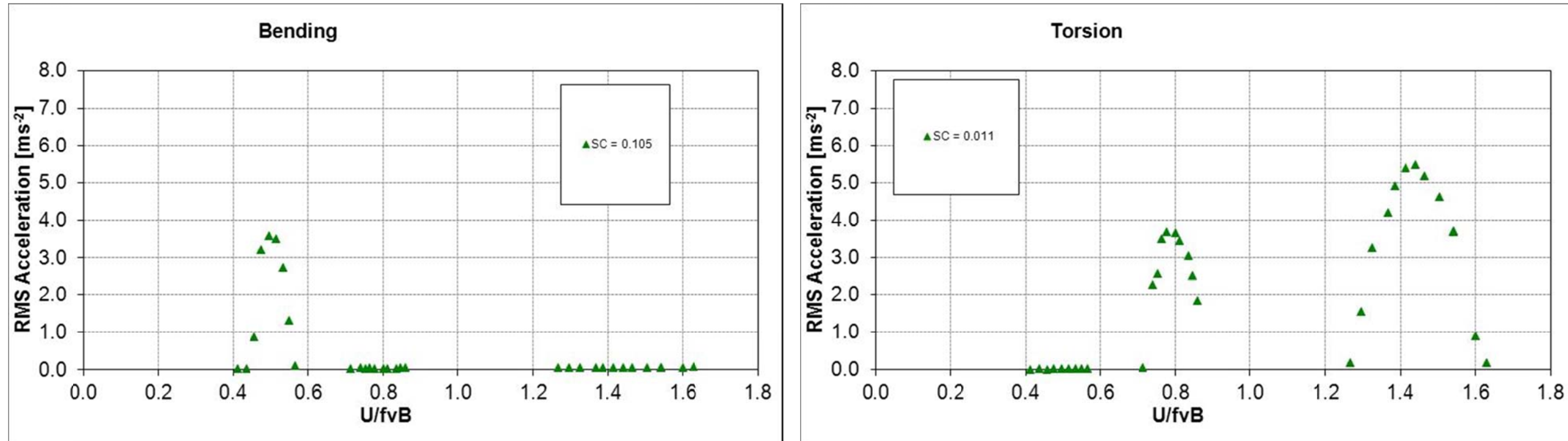


Figure 2.5f: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen B + H (pressure drop = 2.7)

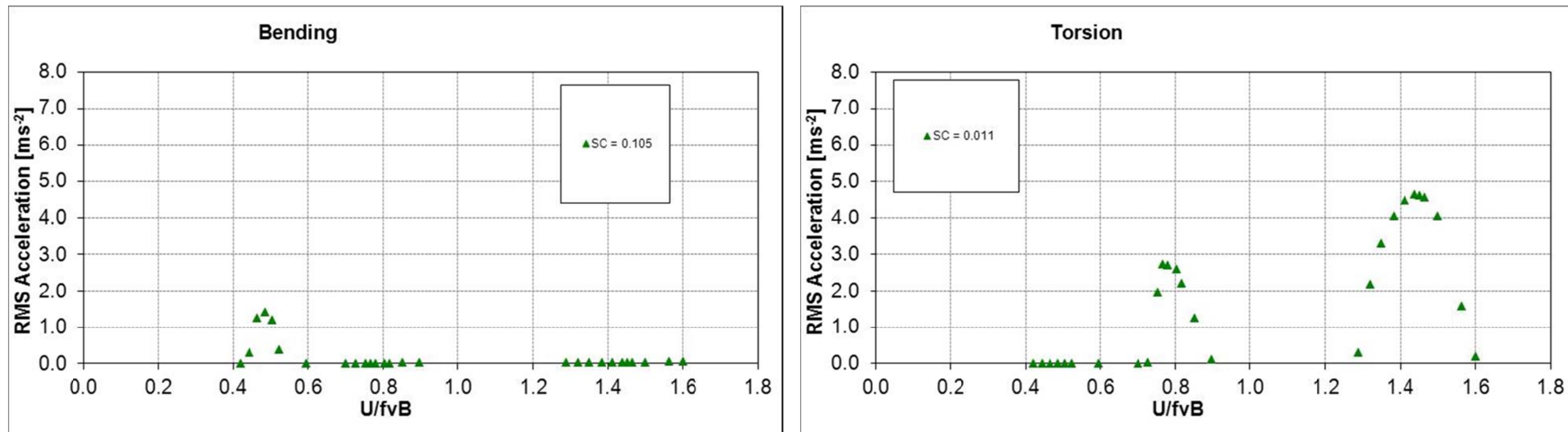


Figure 2.5g: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen Ai (pressure drop alternating 2.7+3.7 on wind screens & 2.7 on crash barriers)

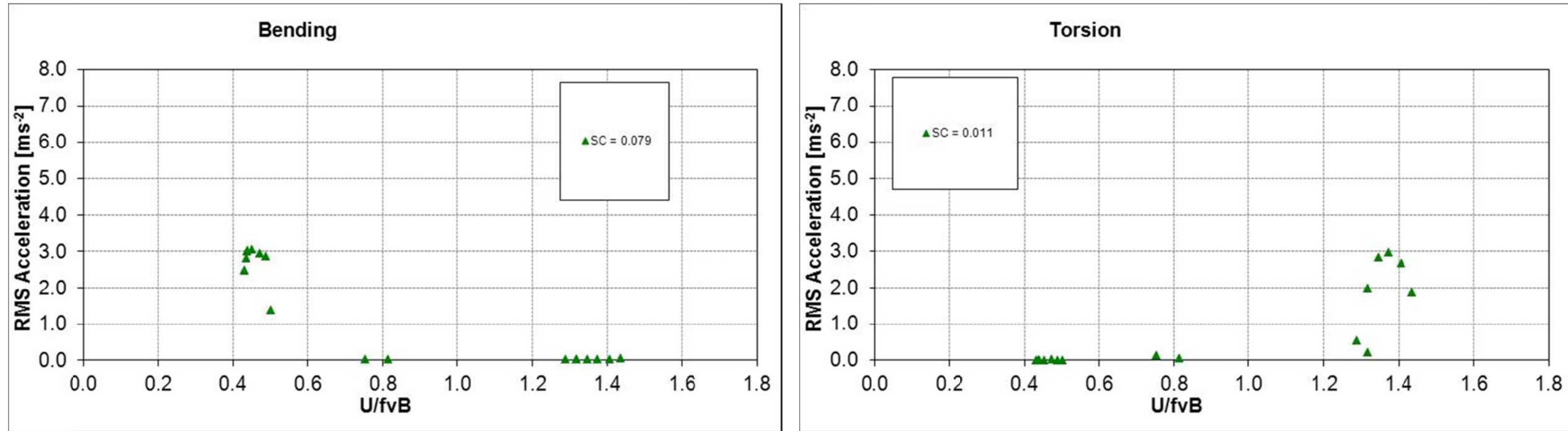


Figure 2.5h: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen Aii (pressure drop = 3.7 on wind shields and 2.7 on crash barriers)

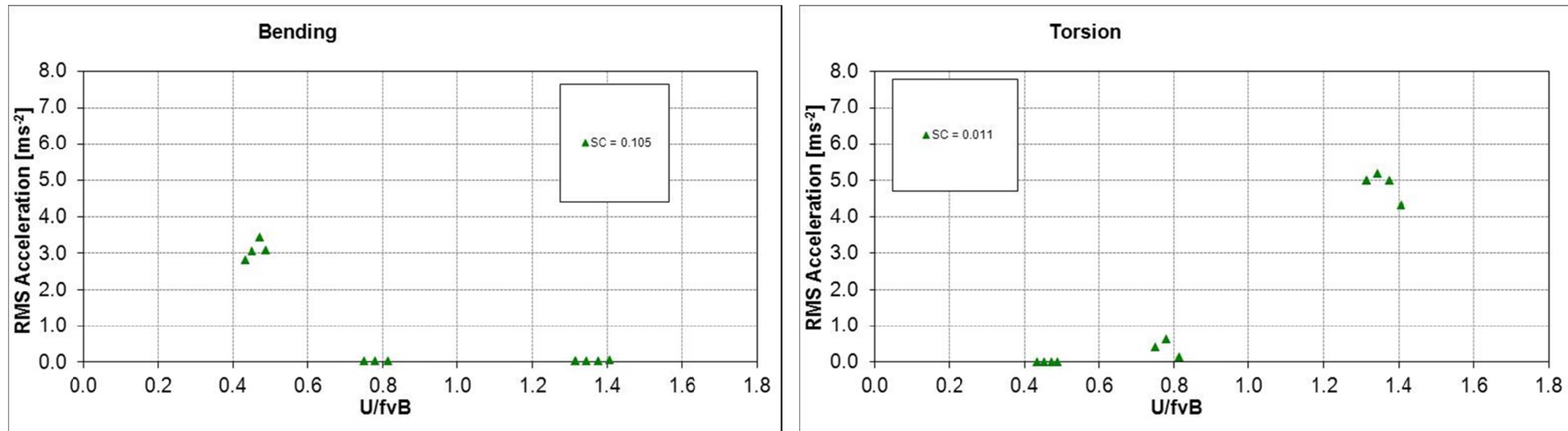


Figure 2.5i: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen C (pressure drop = 3.5)

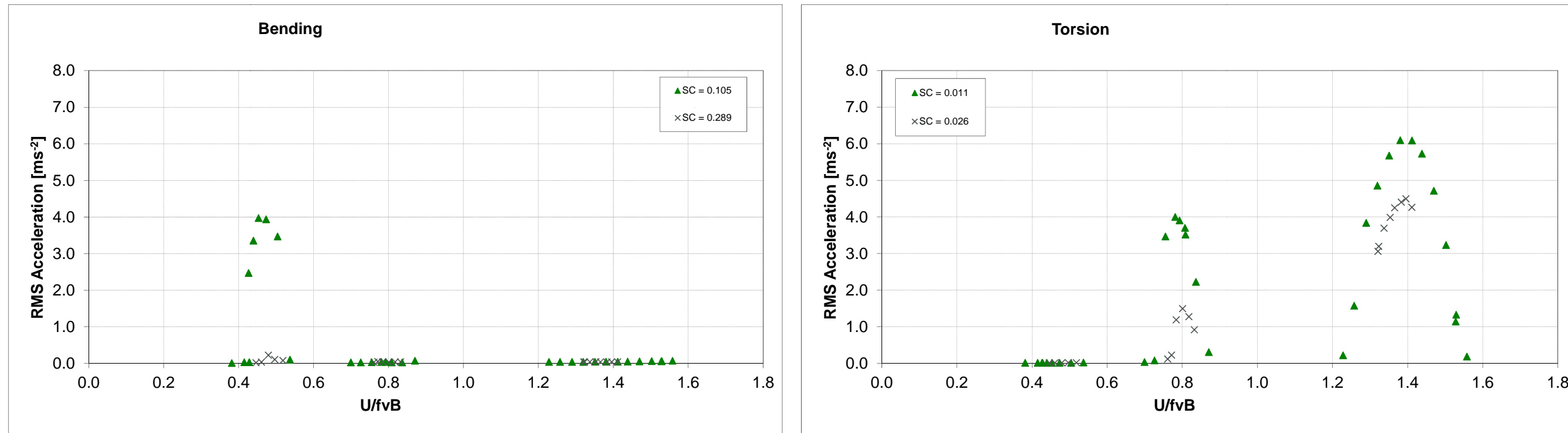
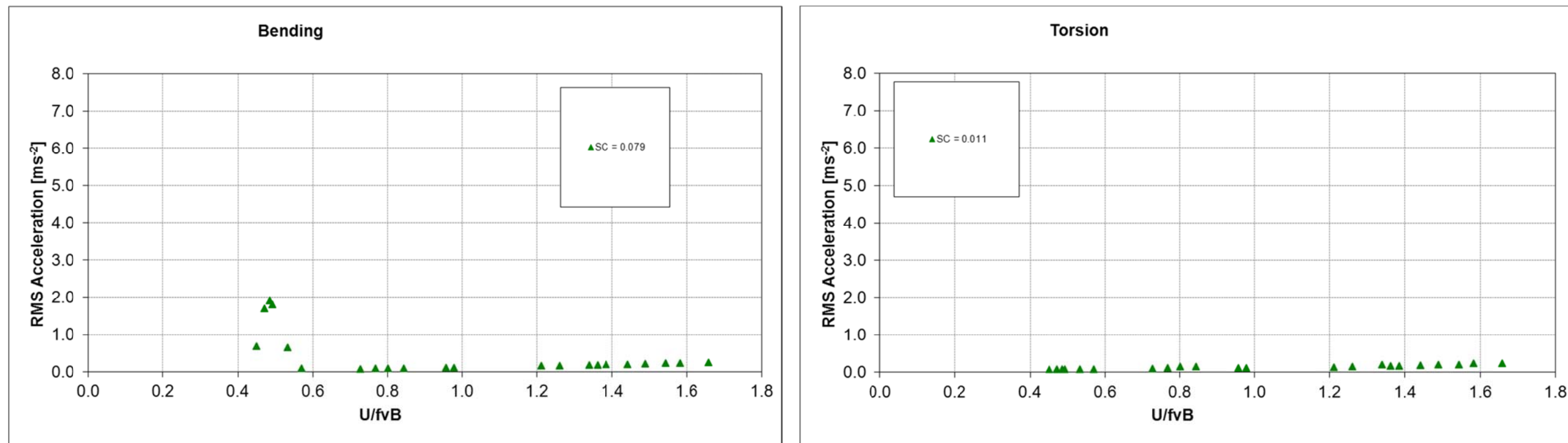


Figure 2.5j: Variation of Model Scale RMS Accelerations in Bending and Torsion (measured at the edge of the Deck) with Reduced Wind Speed, Measured at 0° Wind Angle, Screen B (pressure drop = 2.7)  
TURBELENT FLOW



## APPENDIX A. STRUCTURAL AND DYNAMIC PROPERTIES

### A.1. Structural and Dynamic Properties

The following properties were provided by COWI on 03/03/11 for the purpose of the current study:

Full Scale reference dimension (B)	60.4m
Full Scale first bending frequency (fb)	0.0649Hz
Full Scale first torsional frequency (ft)	0.0809Hz
Full Scale Mass	57660kg/m
Full Scale Torsional Inertia	28890000kgm <sup>2</sup> /m

## APPENDIX B. MODEL DESIGN AND CONSTRUCTION

### B.1. Models Design and Construction

The model was designed and constructed for the D7 tests based on drawing information of the bridge deck supplied by COWI. Table B.1 summarises the drawings used for the models design and construction.

**Table B.1: Drawing Information**

Drawing Name/No.	Date Received
100-03.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010
101-02.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010
102-01.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010
103-02.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010
104-03.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010
106-01.dwg	17 <sup>th</sup> September 2010

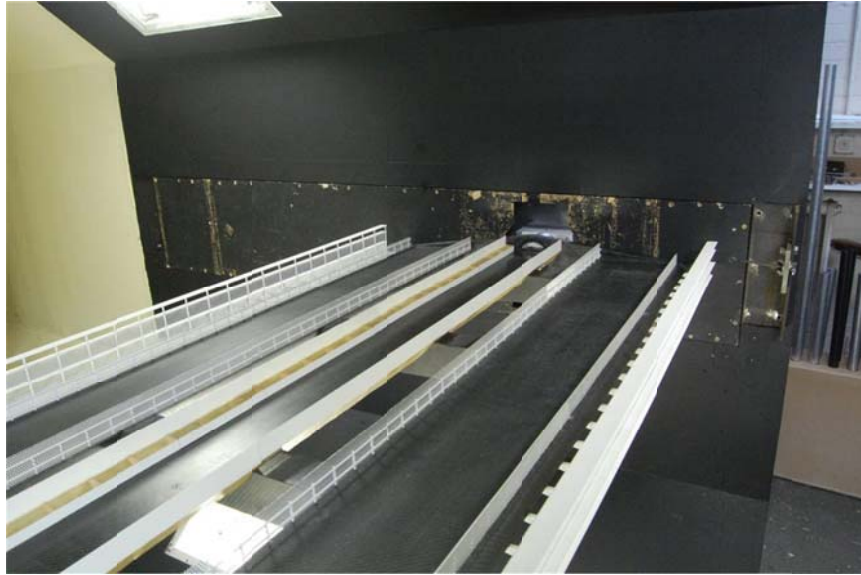
The model was constructed at a linear model scale of 1:65 in carbon fibre. At this scale the model allows detailed representation of all geometric features of the bridge deck that are expected to affect the wind flows around the bridge at full scale.

The following items were designed in built in aluminium, hard plastic and brass:

- Service lanes
- Wind Shields
- Vehicle Crash Barriers
- Rail Deck Parapets

Figures B.1 to B.4 show general views of the model in the wind tunnel.

**Figure B.1: Wind Tunnel Model – General View – SCREEN A**



**Figure B.2: Wind Tunnel Model – Close up View of the Wind Barriers (Screen A)**





**Figure B.3: Wind Tunnel Model - Close-Up View of Underside of Model**



**Figure B.4: Wind Tunnel Model - Close-Up View of Underside of Model with horizontal screens**

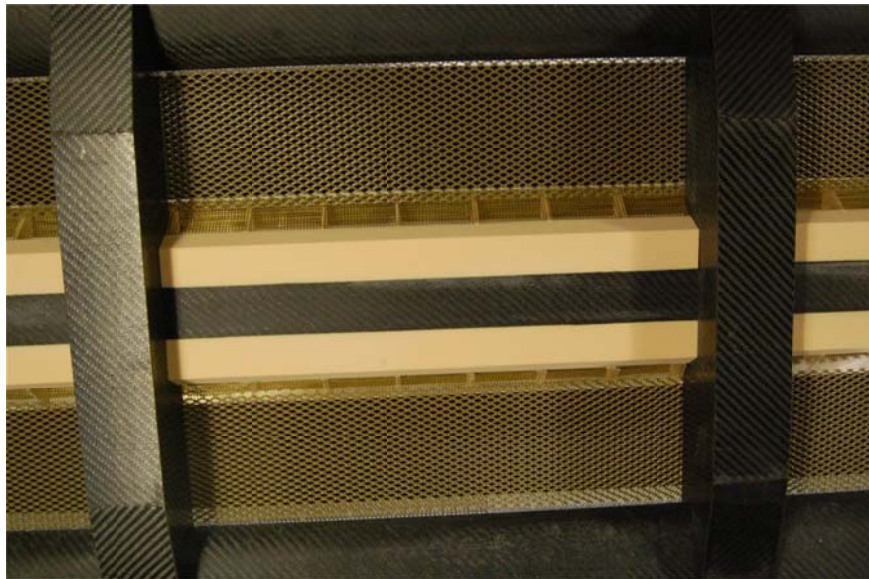


Figure B.5: Wind Tunnel Model - General View – SCREEN A

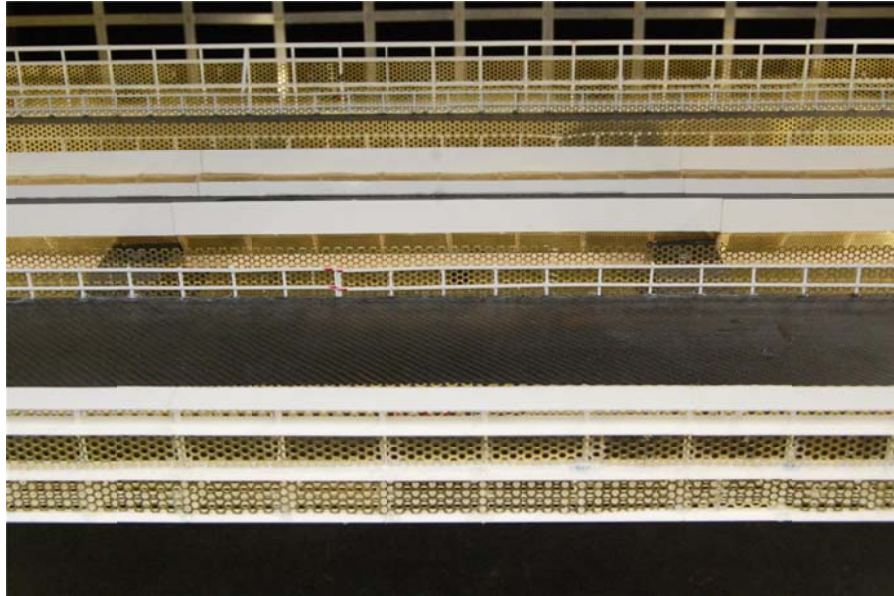
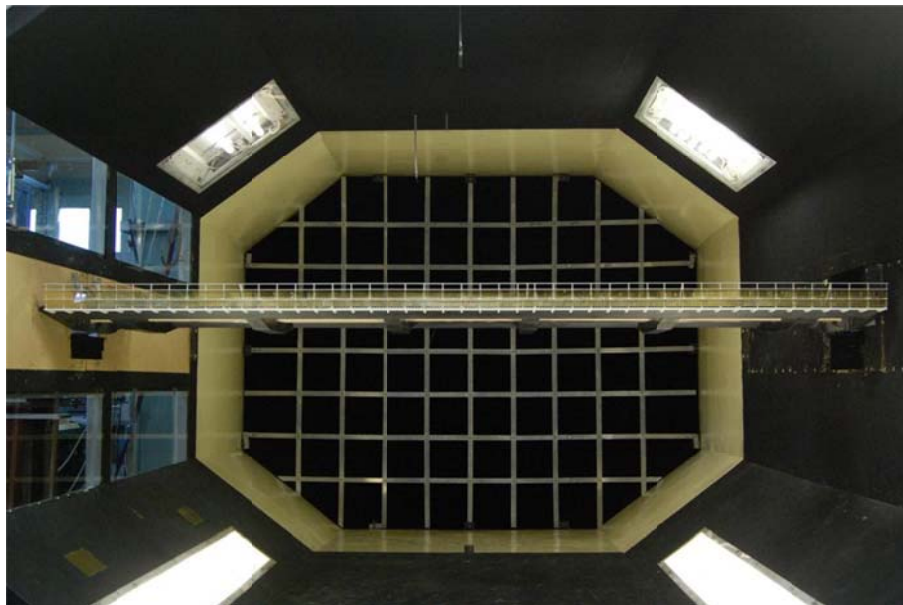


Figure B.6: Wind Tunnel Set Up – Turbulent Flow



## B.2. Pressure Drop Coefficient – Measurement & Analysis

The pressure loss coefficient of the semi-porous wind barriers and crash barriers was specified by COWI to have a value of 2.7, with a 5% error margin. The pressure loss coefficient,  $K$  is defined as:

$$K = \frac{P_{Upstream} - P_{Downstream}}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Where:

$P_{Upstream}$  = Upstream Pressure [Pa]

$P_{Downstream}$  = Downstream Pressure [Pa]

$\rho$  = Density of Air [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

$V$  = Upstream Velocity [ $\text{ms}^{-1}$ ]

The pressure drop for the following screens has been measured:

1. Screen A
2. Screen B
3. Screen C
4. Screen H

The results of wind tunnel tests are displayed below and show that the criteria are satisfied for the Reynolds number ranges of interest.

It is clear from the graphs that the stretched metal screens (Screens A and H) have a significantly different aerodynamic behavior depending on the direction the wind is blowing from.

Figure B5: Screen A Pressure Loss Coefficient

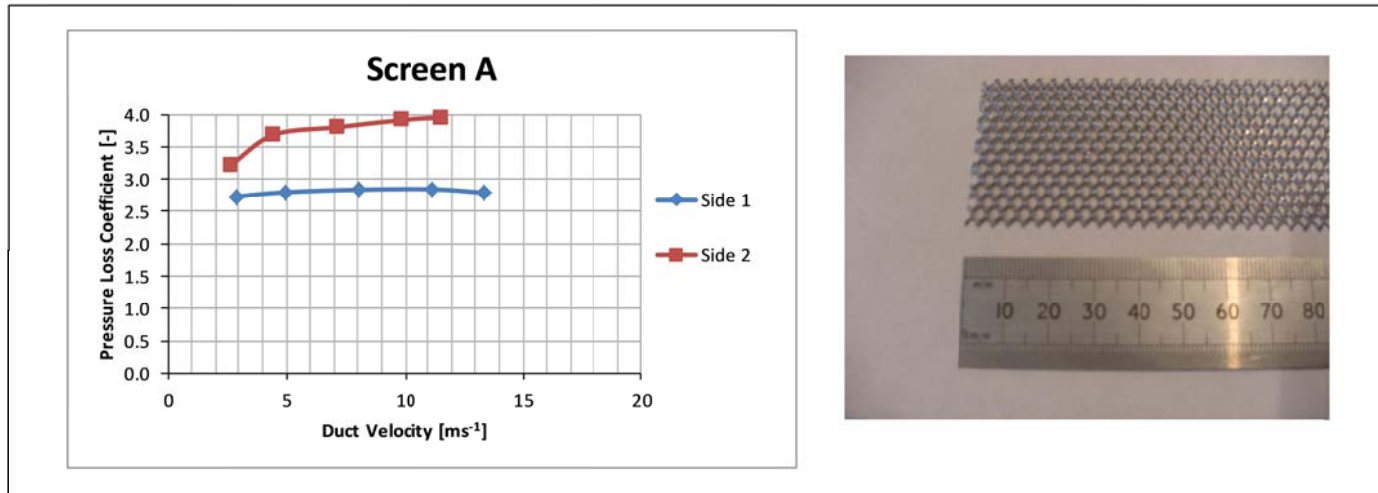


Figure B6: Screen B Pressure Loss Coefficient

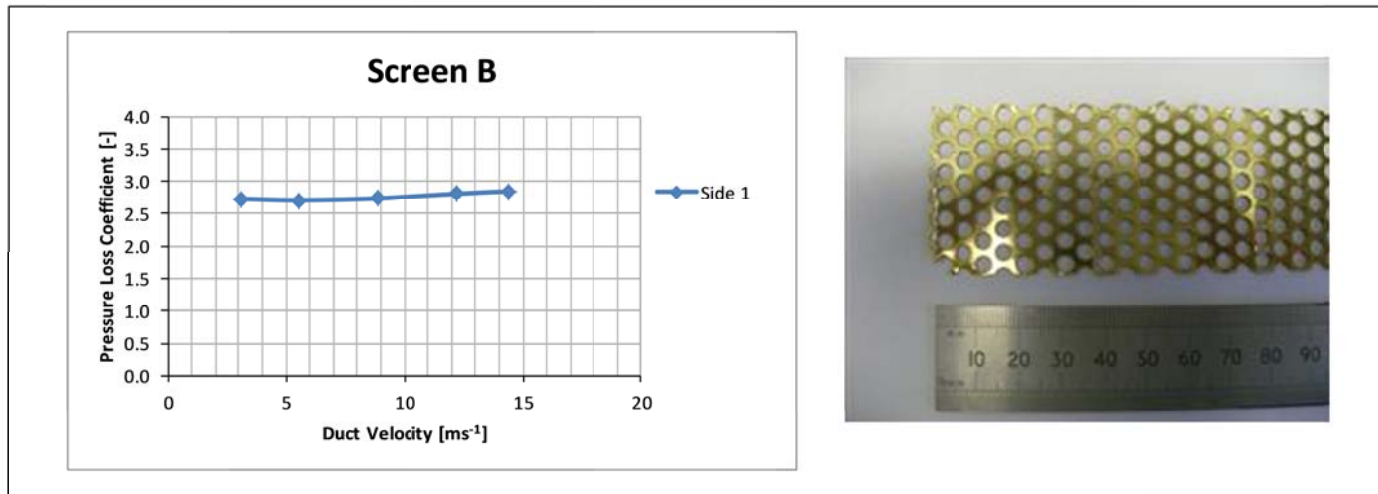


Figure B7: Screen C Pressure Loss Coefficient

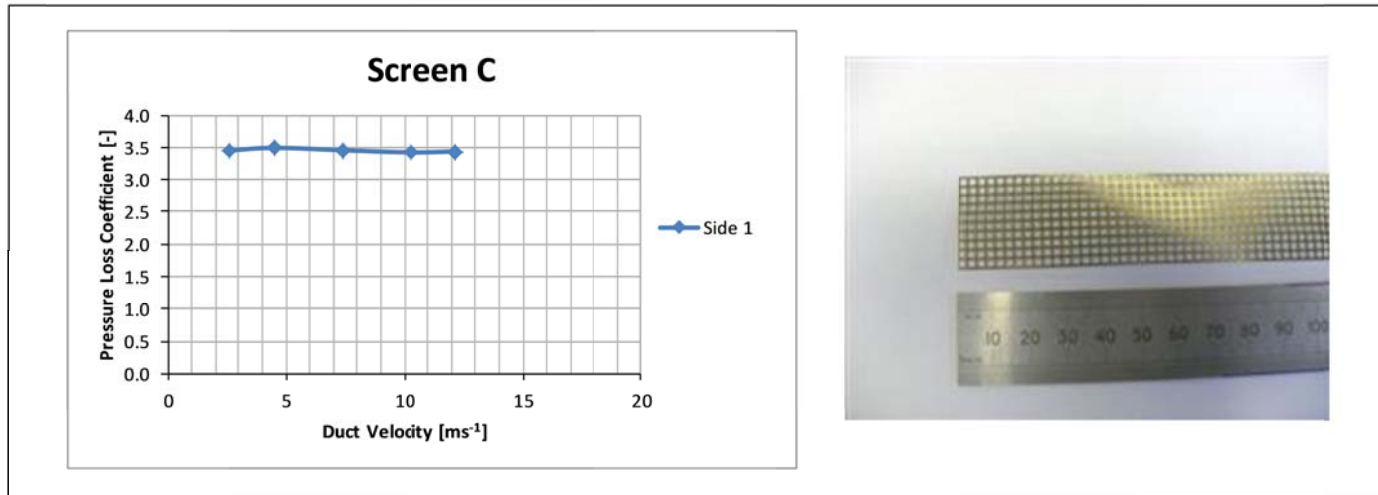
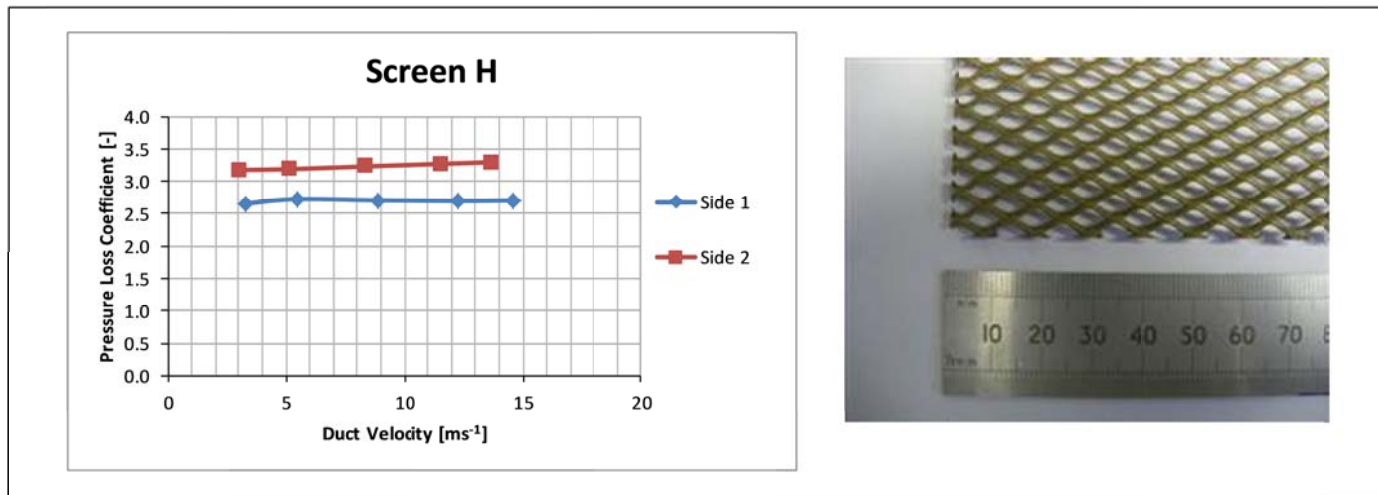


Figure B8: Screen H Pressure Loss Coefficient



### **B.3. Model Approval**

The wind tunnel models were reviewed and approved by COWI for the D7 tests.

## APPENDIX C. STATIC WIND LOADING STUDIES

### C.1. Model Mounting & Instrumentation

For measurement of the static wind load coefficients the model was mounted across the 2.74 m width of the wind tunnel on a force balance rig.

The force balance rig consists of a pair of 3-component strain-gauged force transducers placed on either side of the wind tunnel test section and on which the wind tunnel model is accurately rigged via precision-machined fittings. The model is rotated through the test wind angles on the balances so that the wind loads are measured directly in model axes.

Load balance checks were carried out prior to the experiments over the expected range of forces and moments coefficients. Further checks including repeatability checks, showing agreement on forces and moments, and symmetry checks.

## APPENDIX D. DYNAMIC RESPONSE STUDIES

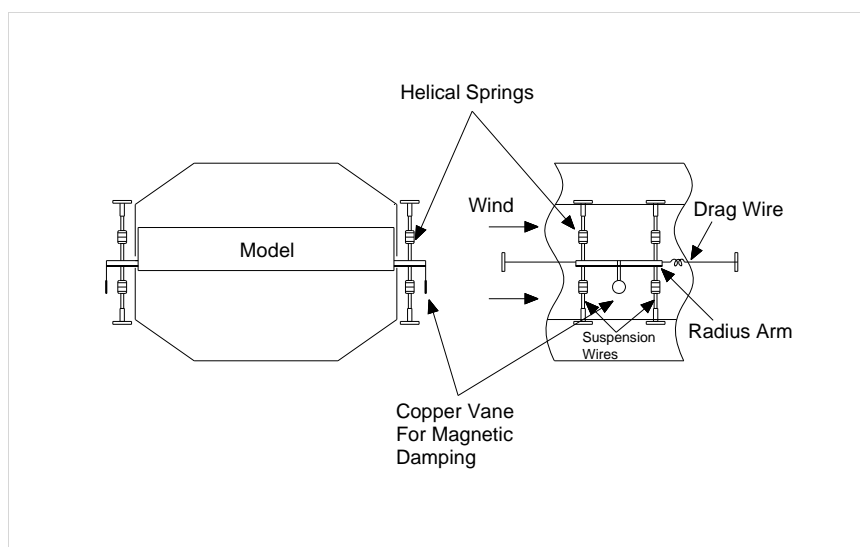
### D.1. Model Mounting & Instrumentation

#### D.1.1. Dynamic Rig

For the dynamic response tests the models were mounted across the 2.74 m width of the wind tunnel on a dynamic rig consisting of a system of springs allowing 2 degrees of freedom (vertical bending and torsional motion). The models were restrained from moving in the other directions by a combination of light steel wires.

The layout of the dynamic rig for this configuration is shown in Figure D.1 below.

Figure D.1: Layout of the Dynamic Rig



For dynamic response measurements, the test rig was instrumented with four small accelerometers one mounted at either end of each suspension arm external to the wind tunnel and positioned to resolve the vertical bending and rotational motion through the sum and the difference of the signals digitised simultaneously. A further two accelerometers were placed at the centre of one of the rig arms and the centre of the deck model, in order to monitor the stiffness of the setup. From the acceleration time histories the amplitude response of the models was determined.

## D.2. Experimental Conditioning

### D.2.1. Scaling Requirements

For the dynamic rig tests it was required to reproduce the full-scale behaviour of the bridge deck by imposing the correct structural properties on the wind tunnel models subject to scaling laws detailed below.

For dynamic similarity, equality of the following non-dimension parameters is required between model-scale and full-scale:

$$\begin{array}{ll}
 \text{i) } \frac{I_z}{\rho B^2} & \text{ii) } \frac{I_g}{\rho B^4} \\
 \text{iii) } \frac{U}{f_b B} & \text{iv) } \frac{U}{f_t B} \\
 \text{v) } \delta_z & \text{vi) } \delta_g
 \end{array}$$

Where:

$I_z$  is the mass per unit length of the bridge deck

$I_g$  is the mass moment of inertia of the bridge deck

$B$  is the reference dimension taken as the bridge deck width

$\rho$  is the density of air

$U$  is the mean hourly wind speed

$f_b$  is the bending natural frequency

$f_t$  is the torsional natural frequency

$\delta_z$  is the logarithmic decrement of the structural damping corresponding to the bending frequency



$\delta_g$  is the logarithmic decrement of the structural damping corresponding to the torsional frequency

The combined structural and inertial parameters for single degree of freedom sinusoidal motions are as follows:

$$\text{vii) } \frac{I_z \delta_z}{\rho B^2} \quad \text{viii) } \frac{I_g \delta_g}{\rho B^4}$$

A departure from the correct frequency ratio can be obtained for single degree of freedom motions providing different values of U and hence different wind speed scales for vertical bending and torsional motion.

With the above parameters correctly modelled, values of U/fB obtained from wind tunnel measurements will be directly applicable to full scale. The responses measured in the wind tunnel can be related via the model scale.

### D.2.2. Vortex Shedding Response

Table D.1 contains target and achieved values of non-dimensional inertia for the dynamic tests. The target parameters were based on the full-scale data supplied by COWI.

**Table D.1 Target & Achieved Non-Dimensional Quantities**

Target Values			Achieved Values		
$\frac{I_z}{\rho B^2}$	$\frac{I_\theta}{\rho B^4}$	$\frac{f_b}{f_i}$	$\frac{I_z}{\rho B^2}$	$\frac{I_\theta}{\rho B^4}$	$\frac{f_b}{f_i}$
12.9	1.77	1.25	12.3	1.80	1.86

**Table D.2 Achieved Model Scale Frequencies**

	Bending	Torsion
Model Scale Frequency [Hz]	6.70	8.75

### D.2.1. Flutter

Table D.1 contains target and achieved values of non-dimensional inertia for the dynamic tests. The target parameters were based on the full-scale data supplied by COWI.

**Table D.3 Target & Achieved Non-Dimensional Quantities**

Target Values			Achieved Values		
$\frac{I_z}{\rho B^2}$	$\frac{I_\theta}{\rho B^4}$	$\frac{f_b}{f_i}$	$\frac{I_z}{\rho B^2}$	$\frac{I_\theta}{\rho B^4}$	$\frac{f_b}{f_i}$
12.9	1.77	1.25	12.4	1.58	1.34

**Table D.4 Achieved Model Scale Frequencies**

	<b>Bending</b>	<b>Torsion</b>
<b>Model Scale Frequency [Hz]</b>	<b>1.56</b>	<b>2.1</b>

### **D.3. Model Calibration**

The model dynamic properties in terms of natural bending and torsional frequencies and structural damping were measured prior to each set of tests.

The dynamic properties of the models were measured by resonating the models in a natural mode via the deck using a vibrator through a light spring or by hand.

The bending and torsional frequencies were measured by oscillating the models at constant amplitude.

The structural damping associated with the rig system was measured in amplitude decay tests.

### **D.4. Damping Devices**

Controlled additional damping to simulate the effect of a damping device was also provided for the vortex-shedding tests. A copper vane was supported from the arms of the rig, between the poles of an electromagnet. The current generated in the copper vane interacts electromagnetically to provide additional damping. By varying the current feeding the electromagnet, different levels of damping can be obtained.

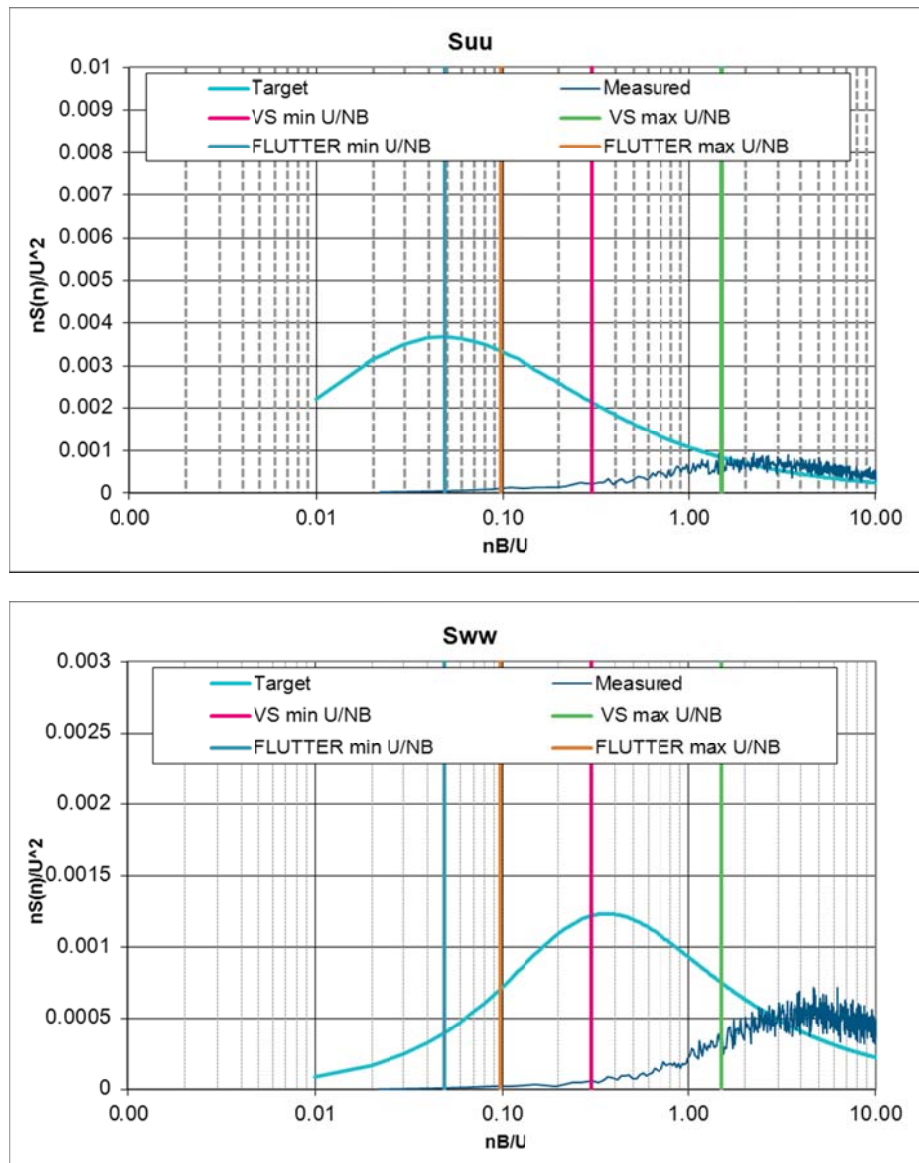
### **D.5. Turbulent Flow Set Up**

The turbulent atmospheric condition was set up using a two-dimensional grid consisting of vertical and horizontal strips, arranged in a regular square grid. The grid was placed at the entrance of the wind tunnel test section, 3.2 m ahead of the position of the deck section model.

Results of the turbulence simulation are presented in terms of u- and w-component spectra and longitudinal and vertical turbulence intensities at bridge deck level.

The longitudinal and vertical turbulence intensities were 4.8% and 3.7% respectively. The measured wind spectra for the u and w component ( $S_{uu}$  and  $S_{ww}$ ) are presented and compared to target full scale von Karman wind spectra in Figure D.1. The plots also show the experimental spectral range for the flutter and vortex shedding tests.

Figure D.1 U and W component of Wind Spectra – Measured versus Target



## APPENDIX E. FULL SET OF RESULTS

The main results of the studies are provided in a series of Excel spread sheet tables and plots attached:

431185\_AppendixE\_Messina Deck\_D8\_Aerodynamic Damping.xls

431185\_AppendixE\_Messina Deck\_D8\_Flutter.xls

431185\_AppendixE\_Messina Deck\_D8\_VS.xls

431185\_AppendixE\_Messina Deck\_D8\_Static Section.xlsx