

# 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)

#### IL PROGETTISTA

**COWI**

Ing. E.M. Veje  
Dott. Ing. E. Pagani  
Ordine Ingegneri Milano  
n° 15408



#### IL CONTRAENTE GENERALE

Project Manager  
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA  
Direttore Generale e  
RUP Validazione  
(Ing. G. Fiammenghi)

STRETTO DI MESSINA  
Amministratore Delegato  
(Dott. P. Ciucci)

Unità Funzionale

OPERA DI ATTRAVERSAMENTO

PB0034\_F0

Tipo di sistema

STUDI DI BASE

Raggruppamento di opere/attività

STUDI AERODINAMICI

Opera - tratto d'opera - parte d'opera

Generale

Titolo del documento

Prove in Galleria del vento, impalcato

CODICE

C G 1 0 0 0 P R G D P S B S 3 0 0 0 0 0 0 0 2 F0

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



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <i>Rev</i><br><i>F0</i> | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |

## INDICE

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| INDICE .....                                                                     | 3  |
| 1 Introduzione .....                                                             | 5  |
| 2 Relazione di sintesi .....                                                     | 5  |
| 3 Ottimizzazione della geometria dell'impalcato .....                            | 6  |
| 3.1 Sub-test D1 .....                                                            | 7  |
| 3.1.1 Geometria della sezione di impalcato e caratteristiche dinamiche .....     | 7  |
| 3.1.2 Rappresentazione in scala dinamica del modello in galleria del vento ..... | 10 |
| 3.1.3 Ottimizzazione .....                                                       | 10 |
| 3.2 Sub-test D7 .....                                                            | 13 |
| 3.2.1 Vibrazioni indotte dai vortici .....                                       | 14 |
| 3.2.2 Stabilità aerodinamica .....                                               | 16 |
| 3.3 Conclusioni .....                                                            | 20 |
| 4 Verifica della geometria dell'impalcato .....                                  | 20 |
| 4.1 Stabilità aerodinamica .....                                                 | 20 |
| 4.2 Vibrazioni indotte dai vortici .....                                         | 24 |
| 4.3 Coefficienti di carico da vento statico .....                                | 28 |
| 4.4 Ammettenza aerodinamica .....                                                | 38 |
| 4.5 Derivate aerodinamiche .....                                                 | 41 |
| 5 Riferimenti .....                                                              | 44 |
| Appendice A - Scopo dei Lavori .....                                             | 46 |



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## 1 Introduzione

Una serie di prove in galleria del vento del modello sezionale sono state effettuate per il cassone del Ponte sullo Stretto di Messina, con i seguenti obiettivi:

- ottimizzare l'originale Progetto di Gara
- convalidare il progetto risultante per quanto concerne le vibrazioni indotte da vortice e la stabilità aerodinamica
- ottenere coefficienti di carico da vento in presenza e in assenza di traffico e per diversi angoli di attacco del vento.
- ottenere ammettenza aerodinamica e derivati aerodinamici per l'utilizzo nel buffeting e nei calcoli di stabilità aeroelastica.

Le prove in galleria del vento sono riportate come sub-test D1, D2, D3, D4, D5, D6 e D7 e D8. Lo scopo di questi è illustrato nell'Appendice A.

La presente relazione illustra i risultati salienti di tali prove.

## 2 Relazione di sintesi

La fase di ottimizzazione del programma di test in galleria del vento del cassone, ha comportato la selezione di un impalcato (C5/63) con schermi di sicurezza da 1.8 m con il 55% di vuoto d'aria lungo le barriere di sicurezza stradali esterne, barriere di sicurezza di 2.4 m con il 55% di vuoto d'aria lungo le barriere di sicurezza stradali interne e barriere di sicurezza da 1.8 m lungo le corsie di ispezione ferroviarie. La configurazione privilegiata dell'impalcato inoltre, presenta una piastra intradosso con il 30% di vuoto d'aria sotto le corsie di ispezione ferroviarie ed un'inclinazione dei pannelli ferroviari laterali di 63°, orizzontali.

Questa configurazione dell'impalcato è stata poi oggetto di rigorosi test in due laboratori indipendenti di prove in galleria del vento, il BWLTL in Canada e il Force in Danimarca.

Vengono di seguito riassunti i risultati:

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

- I coefficienti di carichi da vento statici da utilizzarsi nel progetto sono stati estratti da test di flusso turbolento al Force; essi costituiscono il set più conservatore. Il flusso turbolento è considerato rappresentativo delle condizioni di fondo scala.
- Le differenze fra i coefficienti di carico statico fra i due laboratori, paiono risiedere nella modellazione delle barriere e degli schermi, poiché la configurazione della fase di costruzione mostra risultati pressoché identici.
- I test hanno dimostrato che il cassone è aerodinamicamente stabile fino al limite richiesto di 75 m/s e che i livelli richiesti di smorzamento residuo sono soddisfatti. Per una configurazione di traffico, il cassone ha mostrato risposte di ampiezza limitata per velocità del vento eccedenti i 50 m/s in flusso calmo. Per il flusso turbolento, ciò è interamente scomparso.
- I test di distacco dei vortici hanno mostrato che lo smorzamento necessario, richiesto per ridurre la risposta di distacco dei vortici al di sotto dei requisiti, era 0,3% di criticità. Una rete metallica, posta fra i cassoni stradali e il cassone ferroviario, sembra ridurre il picco verticale di distaccamento dei vortici. Questo aspetto è discusso nel dettaglio in [10]. Inoltre i test di distacco dei vortici hanno dimostrato che la turbolenza ha un chiaro effetto mitigatore sull'eccitazione del distacco dei vortici.

### 3 Ottimizzazione della geometria dell'impalcato

L'obiettivo dei sub-test D1 e D7 era quello di ottimizzare la geometria dell'impalcato, obiettivo che è stato realizzato in due fasi:

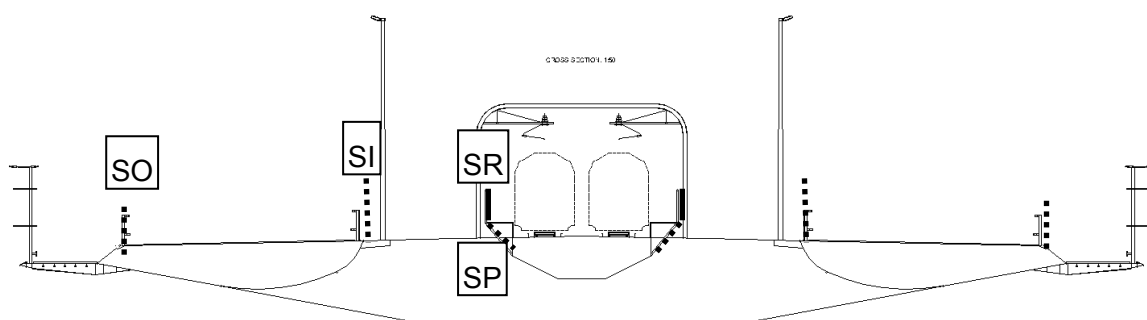
- Nel sub-test D1 sono stati verificati gli effetti derivanti dall'omissione di alcuni o di tutti gli schermi e dalla variazione della porosità di schermi e piastre.
- Nel sub-test D7 è stata ottimizzata la forma del cassone ferroviario onde migliorare la prestazione del distacco dei vortici.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## 3.1 Sub-test D1

### 3.1.1 Geometria della sezione di impalcato e caratteristiche dinamiche

La sezione di impalcato presa in esame per il sub-test D1 compreso nel programma delle prove in galleria del vento è identica al layout presentato nel Progetto di Gara ad eccezione dell'inclinazione delle strade che è passata da un'inclinazione verso l'interno del 2% (Progetto di Gara) ad un'inclinazione verso l'esterno del 2% (Progetto Definitivo). Le diverse configurazioni degli schermi di protezione interni delle barriere di sicurezza poste lungo la strada e le corsie di ispezione ferroviaria e la piastra intradosso posta al di sotto delle corsie di ispezione ferroviaria sono state verificate come indicato in Figura 3.1 e nella corrispondente Tabella 3.1.



**Figura 3.1** Geometria della sezione di impalcato verificata durante il sub-test D1 in galleria del vento del modello sezionale con identificazione degli schermi di sicurezza SO, SI, SR e della piastra intradosso SP delle corsie di ispezione ferroviaria.

**Tabella 3.1** Configurazioni degli schermi di sicurezza/della piastra intradosso testati.

| Configurazione | Schermo di sicurezza esterno<br>SO: 55%, h = 1.8 m | Schermo di sicurezza interno<br>SI: 55%, h = 2.4 m | Schermo di sicurezza ferroviario SR: pieno, h = 1.8 m | Piastra intradosso SP |
|----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| C1             | Escluso                                            | Escluso                                            | Incluso                                               | Escluso               |
| C2             | Escluso                                            | Escluso                                            | Incluso                                               | Vuoto d'aria 30%      |
| C3             | Escluso                                            | Escluso                                            | Incluso                                               | Pieno                 |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <i>Rev</i><br><i>F0</i> | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |

|    |         |         |         |                     |
|----|---------|---------|---------|---------------------|
| C4 | Incluso | Escluso | Incluso | Vuoto d'aria<br>30% |
| C5 | Incluso | Incluso | Incluso | Vuoto d'aria<br>30% |
| C6 | Incluso | Escluso | Escluso | Vuoto d'aria<br>30% |
| C7 | Escluso | Escluso | Escluso | Vuoto d'aria<br>30% |

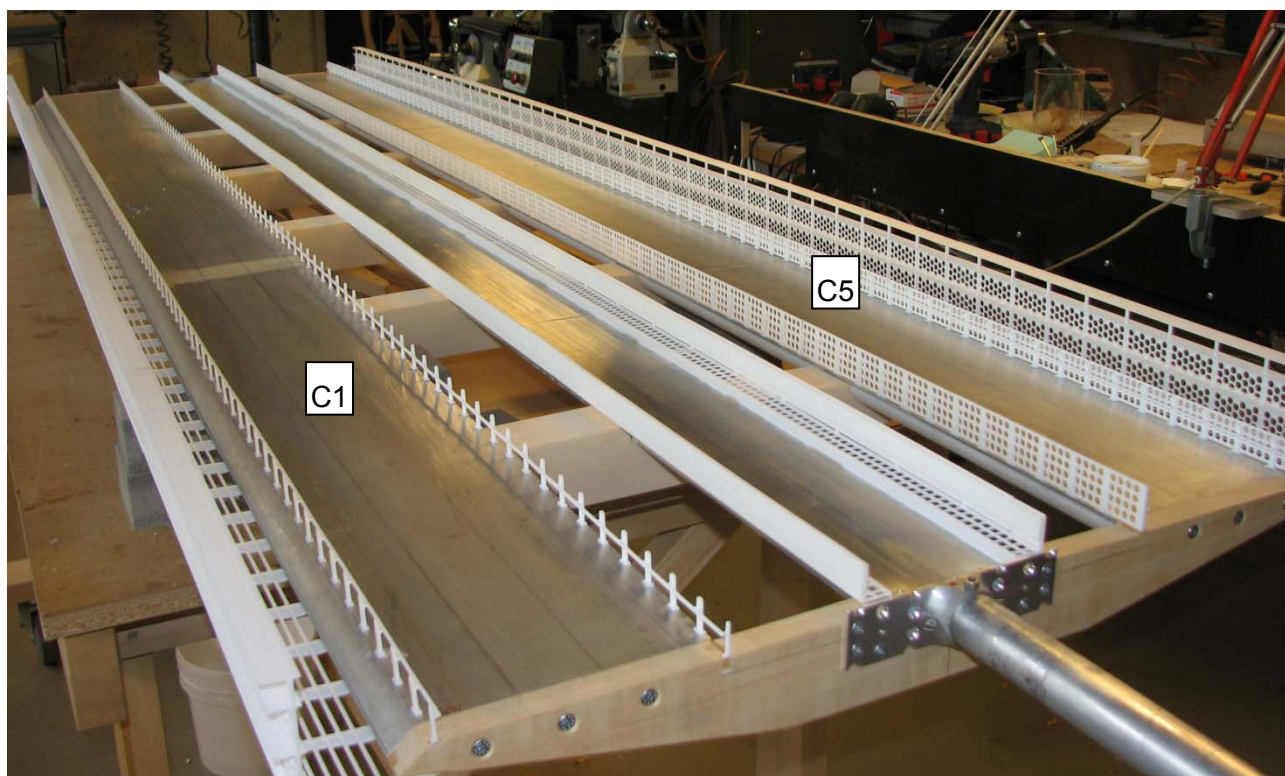
Il sub-test D1 in galleria del vento del modello sezionale è stato eseguito presso la FORCE Technology. L'assetto di prova ed i risultati sono riportati in [1].

Il modello sezionale del Ponte sullo Stretto di Messina è stato costruito in scala geometrica di  $1:\lambda_L = 1:80$  generando una larghezza del modello d'impalcato  $B = 60,4 \text{ m} / 80 = 0,75 \text{ m}$ . Il modello si estendeva nella galleria del vento larga 2,55 m generando un rapporto d'aspetto  $L_A / B = 3,4$  conformemente ai requisiti SdM [2]. Gli schermi antivento e di sicurezza sono stati progettati per essere facilmente sostituiti ed offrire un coefficiente di perdita di pressione di 2.7, simulando in tal modo una porosità o un vuoto d'aria del 55% di fondo scala.

Una foto del modello sezionale dell'impalcato è illustrata in Figura 3.2.



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |



*Figura 3.2 Modello sezionale in scala 1:80 utilizzato nel sub-test D1. Il lato destro del modello mostra la configurazione C5, quello sinistro la configurazione C1.*

Le caratteristiche dinamiche del modello sezionale rispecchiano il Progetto di Gara avendo delle frequenze proprie di inerzia e di base corrispondenti ad un rapporto freccia/luce di 1/11. Un recente aumento della freccia del cavo in un rapporto di 1/10.5 ha leggermente modificato le caratteristiche dinamiche come indicato in Tabella 3.2, ma si stima che tali variazioni siano trascurabili per le caratteristiche aerodinamiche del ponte.

*Tabella 3.2 Caratteristiche dinamiche della sezione d'impalcato di Messina così come verificate (rapporto freccia/luce 1/11) e concordate per il Progetto Definitivo (rapporto freccia/luce 1/10.5).*

| Rapporto freccia/luce | Massa      | Momento di inerzia della massa | 1 <sup>a</sup> freq. di flessione assim. | 1 <sup>a</sup> freq. di torsione assim. |
|-----------------------|------------|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1/11                  | 53200 kg/m | 26500000 kgm <sup>2</sup> /m   | $f_v = 0.0645$ Hz                        | $f_T = 0.0831$ Hz                       |
| 1/10.5                | 54330 kg/m | 26650000 kgm <sup>2</sup> /m   | $f_v = 0.0648$ Hz                        | $f_T = 0.0832$ Hz                       |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

### 3.1.2 Rappresentazione in scala dinamica del modello in galleria del vento

Le specifiche [2] richiedono che le prove su modello in sistemi aeroelastici obbediscano alla rappresentazione in scala di Froude. Ciò significa che il rapporto tra le frequenze del modello e le frequenze del prototipo sia fisso come la radice quadrata della scala geometrica  $f_m / f_p = \sqrt{\lambda_L}$ , che a sua volta richiede che le velocità del vento prototipo vengano ottenute sotto forma di velocità del vento del modello moltiplicate per le velocità di scala del modello e moltiplicate per la radice quadrata della scala geometrica  $V_p = V_m \cdot \sqrt{\lambda_L}$ .

Mentre la rappresentazione in scala di Froude è una condizione necessaria per la corretta rappresentazione di sistemi fluido-struttura, nei quali la gravità gioca un ruolo importante, come nel caso di un modello aeroelastico completo di un ponte sospeso, essa non viene richiesta per un modello sezionale sospeso in modo elastico in galleria del vento, che funziona indipendentemente dalla gravità. L'analisi dimensionale di importanti forze che agiscono sul modello sezionale sospeso elasticamente dimostra che il rapporto di frequenza  $f_m / f_p$  può essere scelto indipendentemente dalla scala geometrica e che le velocità del vento prototipo vengano ottenute sotto forma di velocità del vento del modello moltiplicate per la scala geometrica e l'inverso della frequenza  $V_p = V_m \cdot \lambda_L \cdot f_p / f_m = V_m \cdot \lambda_V$ .

Per il sub-test D1 in questione è stato scelto il fattore di scala della velocità del vento di  $\lambda_V = 6.5$  per le prove di stabilità onde garantire il pieno utilizzo del campo delle velocità della galleria del vento e quindi numeri di Reynolds più alti possibili. Per le prove di distacco dei vortici è stato scelto un fattore di scala delle velocità del vento di  $\lambda_V = 2.2$  per garantire la captazione del distacco dei vortici a velocità in galleria del vento superiori a 2 m/s. Qualora venga scelta la rappresentazione in scala di Froude, l'eccitazione di distacco dei vortici si verificherebbe a velocità in galleria del vento di ca. 0.5 m/s, la cui regolazione è difficile da controllare con precisione.

### 3.1.3 Ottimizzazione

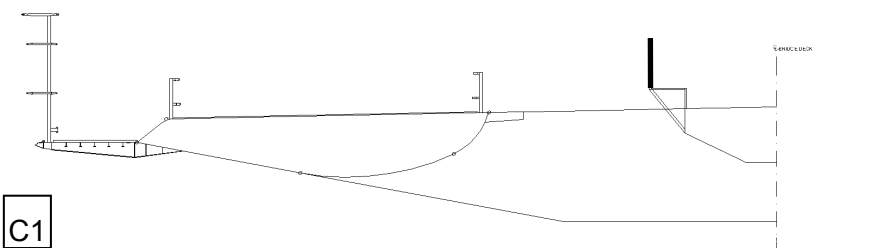
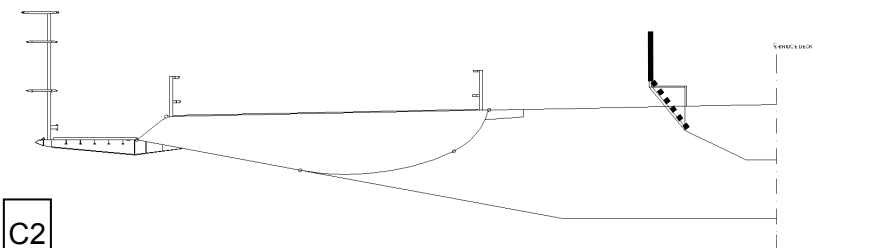
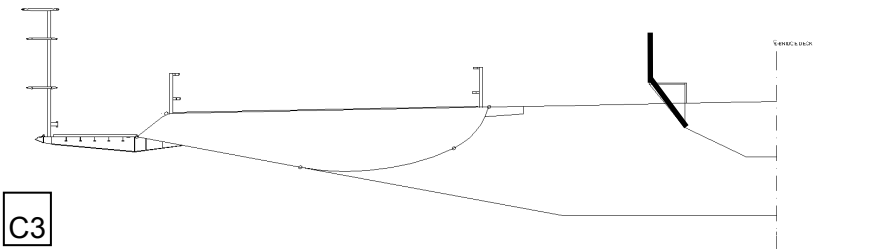
La fase di ottimizzazione aveva come scopo l'individuazione della configurazione schermi di sicurezza/piastra intradosso più auspicabile dal punto di vista aerodinamico tra quelle C1 - C7 presentate in Figura 3.1. I test comprendevano la misurazione dei coefficienti di resistenza, di portanza e di momento quali funzioni dell'angolo di attacco e la misurazione della stabilità aerodinamica ad un angolo di attacco 0° in flusso calmo. Il modello sezionale era sospeso in una bilancia di forza a 3 componenti per la misurazione di  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  e in una sospensione elastica a

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

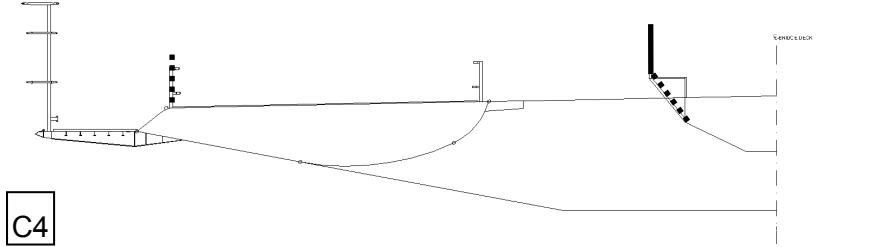
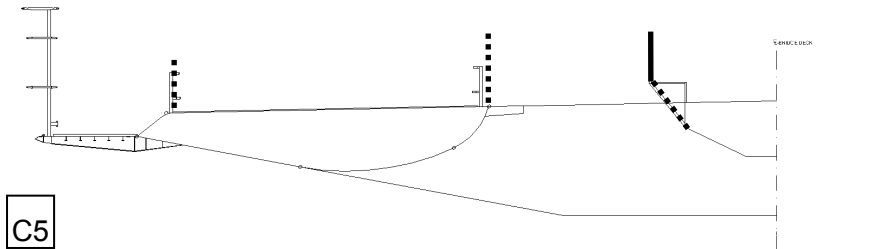
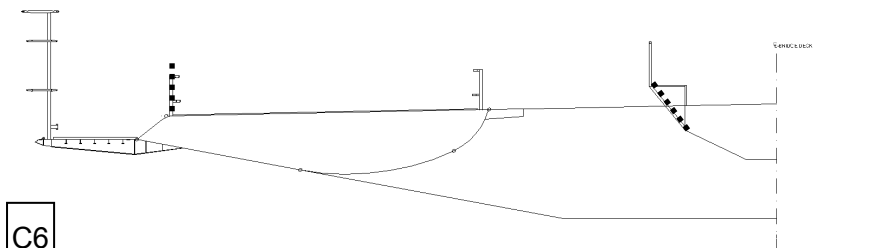
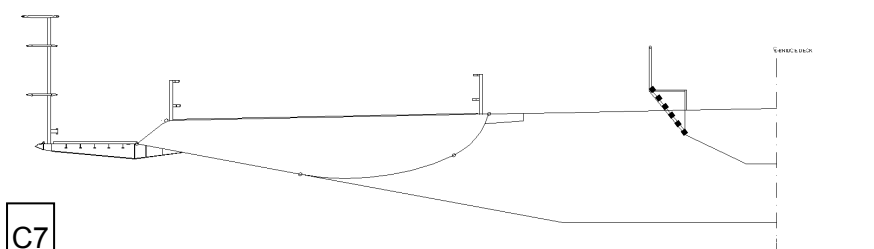
due gradi di libertà per la misurazione della velocità critica del vento mediante una sospensione a molle soffice generando una scala di velocità  $\lambda_v = 6.5$ . Lo smorzamento meccanico della sospensione elastica era dello 0,3% rispetto alla criticità per il grado di libertà verticale e dello 0,2% rispetto alla criticità per il grado di libertà torsionale soddisfacendo al requisito SdM [2] di smorzamento meccanico inferiore allo 0,5%.

I risultati in termini di velocità critica del vento per l'innescò del flutter  $V_c$  e la pendenza del diagramma del momento  $K_M = dC_M/d\eta$  con calcolo della media attraverso il campo degli angoli di attacco  $-6^\circ < \eta < 6^\circ$  sono riassunti in Tabella 3.3.

**Tabella 3.3** *Sommario delle velocità critiche del vento e delle pendenze del diagramma del momento per le configurazioni di impalcato verificate.*

| Configurazione dell'impalcato                                                                                                    | $V_c$ [m/s] | $K_M$ [rad <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------|
|  <div data-bbox="159 1265 215 1321">C1</div> | 122         | 0.133                      |
|  <div data-bbox="159 1556 215 1612">C2</div> | 116         | 0.159                      |
|  <div data-bbox="159 1848 215 1904">C3</div> | 116         | 0.178                      |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

|                                                                                                    |                |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------|
|  <div>C4</div>   | <b>90</b>      | <b>0.252</b> |
|  <div>C5</div>   | <b>&gt;124</b> | <b>0.142</b> |
|  <div>C6</div> | <b>94</b>      | <b>0.23</b>  |
|  <div>C7</div> | <b>114</b>     | <b>0.217</b> |

Da

si nota che la velocità critica del vento in tutte le configurazioni dell'impalcato eccede il requisito di stabilità di 75 m/s fissato da SdM [2]. La configurazione C5 presenta la più elevata velocità critica del vento,  $V_c > 124$  m/s, e per questo motivo è stata scelta come sezione d'impalcato preferenziale.

Si è inoltre notato che tutte le configurazioni d'impalcato verificate mostravano una stabilità sufficiente a soddisfare i criteri SdM indicando che il ponte rimarrà stabile nel caso in cui gli

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                        | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

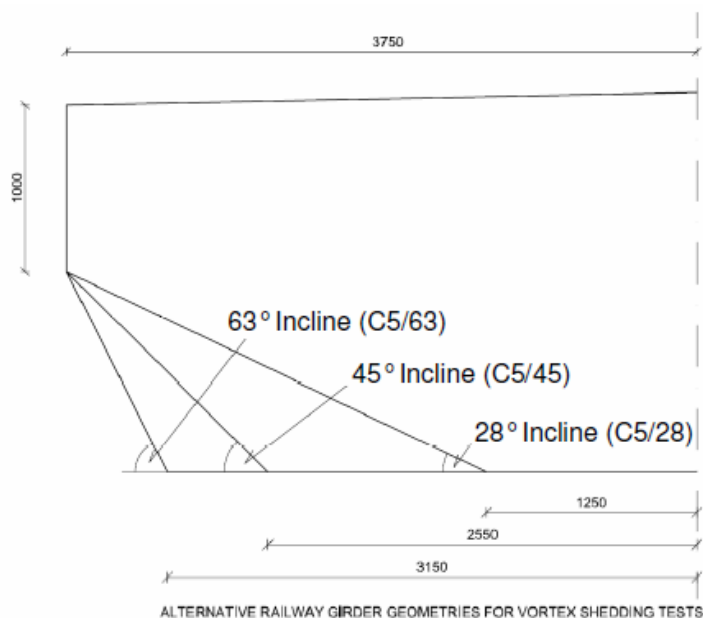
schermi di sicurezza lungo le guardavia stradali e le corsie di ispezione ferroviaria vengano ad un certo punto rimossi in futuro.

### 3.2 Sub-test D7

Il Sub-test D7 è stato eseguito presso la BMT sul modello sezionale in scala 1:65. Questa serie di sub-test su modello in fibra di carbonio molto rigido è stato commissionato a seguito dell'incapacità del sub-test D1 su modello in scala 1:80 di identificare il distacco dei vortici verticale a causa degli effetti dei numeri di Reynolds e del fatto che la risposta a flessione registrata per il modello in scala 1:30 del sub-test D2 è stata giudicata da SdM contaminata dalla flessione del modello. I sub-test D7 sono stati focalizzati sulle vibrazioni indotte da vortici in un angolo di afflusso di 0 gradi in flusso calmo e sui coefficienti di carico da vento statico. Sono stati testati tre angoli di inclinazione, inclinazione

Geometrie alternative del cassone ferroviario per le prove di distacco dei vortici

Figura 3.3, dei pannelli laterali del cassone ferroviario per migliorare le prestazioni di distacco dei vortici del cassone del ponte: 28° (inclinazione originaria come indicato in Figura 3.1), 45° e 63°. L'assetto di prova ed i risultati sono riportati in [3].



inclinazione

Geometrie alternative del cassone ferroviario per le prove di distacco dei vortici

**Figura 3.3** Le tre configurazioni del cassone ferroviario.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

Le prove sono state eseguite in flusso calmo con un angolo del vento di 0° e per livelli di smorzamento strutturale tra 0,1% e 0,5% di criticità.

### 3.2.1 Vibrazioni indotte dai vortici

Per la configurazione originaria, C5/28, sono stati osservati quattro picchi di distacco dei vortici: due picchi di flessione verticale e due picchi torsionali. L'aumento dell'angolo a 45° (C5/45) ha ridotto la grandezza dei picchi torsionali ed ha eliminato il secondo picco di flessione verticale a fronte di velocità del vento più elevate. Non è stata riscontrata alcuna variazione per il primo picco di flessione verticale. La configurazione a 63° (C5/63) ha mostrato un'ulteriore riduzione dei picchi torsionali e nessun effetto sul primo picco di flessione. E' stato necessario un livello di smorzamento strutturale dello 0,4% di criticità per eliminare questo picco di flessione verticale.

I risultati per i livelli minimi di smorzamento strutturale, 0,11% della criticità, sono indicati in Figura 3.6. La configurazione a 63° è stata scelta sulla base di queste prove.

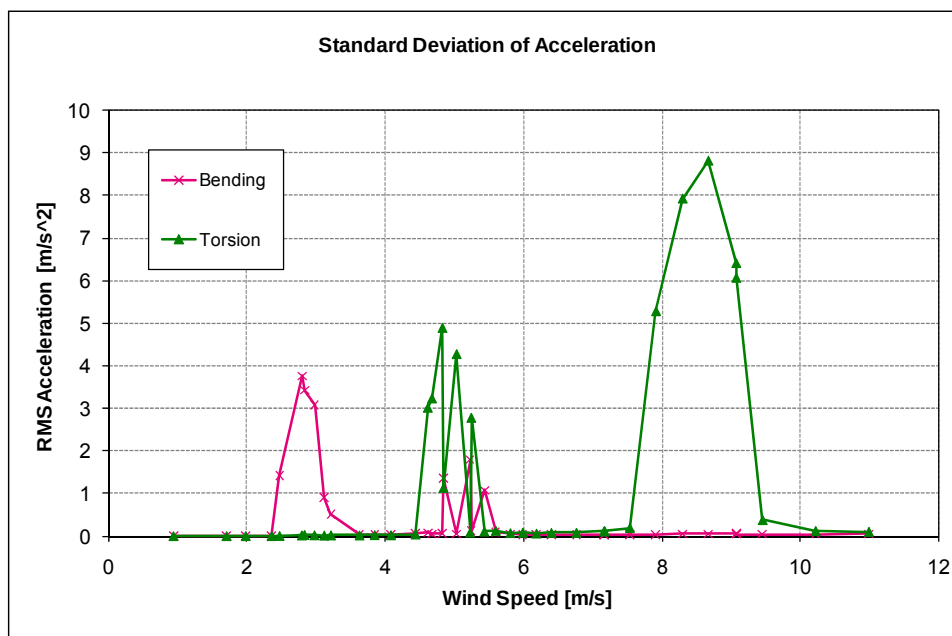


Figura 3.4 Risposte al distacco dei vortici per la configurazione C5/28, scala del modello. Smorzamento dello 0,11% di criticità.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <b>Rev</b><br>F0 | <b>Data</b><br>20/06/2011 |

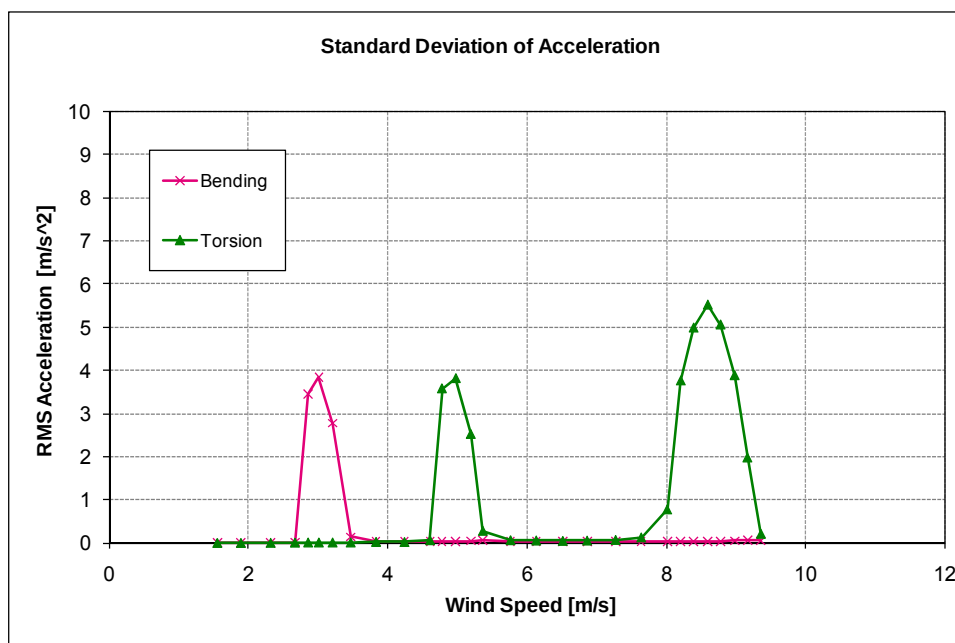


Figura 3.5 Risposte al distacco dei vortici per la configurazione C5/45, scala del modello. Smorzamento dello 0,11% di criticità.

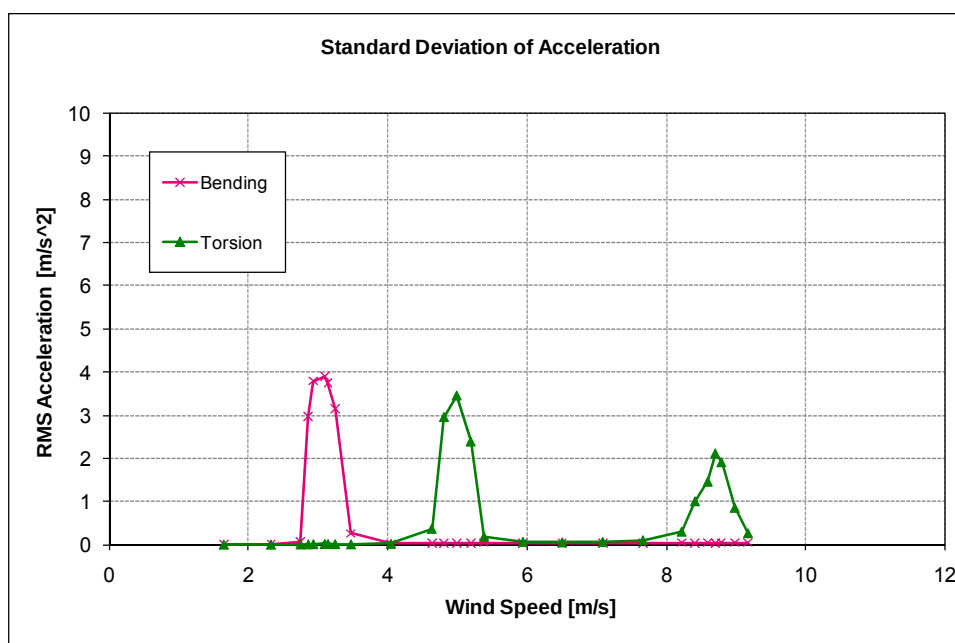


Figura 3.6 Risposte al distacco dei vortici per la configurazione C5/63, scala del modello. Smorzamento dello 0,11% di criticità.



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

### 3.2.2 Stabilità aerodinamica

Di seguito vengono presentate le velocità critiche del vento per le tre configurazioni del cassone ferroviario per angoli d'attacco di  $-4^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $4^\circ$  in flusso calmo ( $I = 0,5\%$ ) e flusso turbolento ( $I = 7,5\%$ , prove NRC  $I = 2-4\%$ ). L'inclinazione di  $45^\circ$  è stata testata presso la NRC in scala 1:30, sub-test D2 [5], e le inclinazioni di  $28^\circ$  e  $63^\circ$  sono state testate presso FORCE in scala 1:80, sub-test

D1, [1] e [4]. E' stato pure misurato lo smorzamento composito  $\zeta$  rispetto alla criticità (smorzamento

meccanico + smorzamento aerodinamico calcolato come media della flessione torsionale e verticale) con velocità del vento a fondo scala di 54 m/s e 75 m/s. Un confronto tra le velocità critiche del vento misurate ed i criteri SdM è indicato nella Tabella 3.4 seguente. Un confronto tra lo smorzamento composito misurato e calcolato come media della flessione torsionale e verticale ed i criteri SdM [2] è riassunto in Tabella 3.5 e Tabella 3.6.



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

*Tabella 3.4 Velocità critiche del vento per la sezione di impalcato C5 in flusso calmo e turbolento per le tre diverse inclinazioni del pannello laterale del cassone ferroviario. \*Per  $\eta = -4^\circ$  in flusso turbolento le prove sono state interrotte a velocità del vento a fondo scala di 76 m/s in quanto la risposta del modello superava i limiti di risposta fisica fissati dalle pareti della galleria del vento. \*\*basso smorzamento nel campo  $18 < U_r < 22$  ma stabile.*

| Configurazione dell'impalcato C5   | Flusso     | $\eta$ [deg] | $V_c$ [m/s]   | $V_c$ [m/s] | $V_c$ [m/s] |
|------------------------------------|------------|--------------|---------------|-------------|-------------|
| Variazione del cassone ferroviario |            |              | C5/28         | C5/45       | C5/63       |
|                                    | Calmo      | -4           | > 113 m/s     | > 90 m/s    | > 125 m/s   |
|                                    |            | 0            | > 123 m/s     | > 90 m/s    | 119** m/s   |
|                                    |            | +4           | > 124 m/s     | > 90 m/s    | 120 m/s     |
|                                    | turbolento | -4           | > 76* m/s     | > 90 m/s    | 83* m/s     |
|                                    |            | 0            | > 124 m/s     | > 90 m/s    | 81 m/s      |
|                                    |            | +4           | > 122 m/s     | > 90 m/s    | 126 m/s     |
| <b>Requisito SdM</b>               |            |              | <b>75 m/s</b> |             |             |

Dalla tabella si nota che tutte e tre le configurazioni d'impalcato sono aerodinamicamente stabili a velocità del vento di fondo scala in flusso calmo e turbolento al di sopra del criterio di stabilità SdM.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

*Tabella 3.5 Smorzamento composito calcolato in media in flusso calmo per le tre diverse inclinazioni del pannello laterale del cassone ferroviario a velocità del vento di fondo scala di 54 m/s e 75 m/s. Configurazione C5.*

| Flusso calmo ( $I = 0.5\%$ )       | $\eta$<br>[gradi] | V [m/s]   | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] |
|------------------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Variazione del cassone ferroviario |                   |           | C5/28                                | C5/45                                | C5/63                                |
|                                    | -4                | 54        | 2.05%                                | 3.6%                                 | 2.4%                                 |
|                                    | -4                | 75        | 1.45%                                | 3.0%                                 | 1.55%                                |
|                                    | 0                 | 54        | 3.35%                                | 3.15%                                | 3.65%                                |
|                                    | 0                 | 75        | 2.9%                                 | 3.05%                                | 1.9%                                 |
|                                    | +4                | 54        | 4.6%                                 | 4.1%                                 | 3.55%                                |
|                                    | +4                | 75        | 4.25%                                | 5.6%                                 | 1.9%                                 |
| <b>Requisito SdM</b>               |                   | <b>54</b> | <b>&gt; 2%</b>                       |                                      |                                      |
|                                    |                   | <b>75</b> | <b>&gt; 1%</b>                       |                                      |                                      |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

*Tabella 3.6 Smorzamento composito calcolato in media in flusso turbolento per le tre diverse inclinazioni del pannello laterale del cassone ferroviario a velocità del vento di fondo scala di 54 m/s e 75 m/s. Configurazione C5*

| Flusso turbolento ( $I = 7.5\%$ )  | $\eta$<br>[gradi] | $V$ [m/s] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] |
|------------------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Variazione del cassone ferroviario |                   |           | C5/28                                | C5/45                                | C5/63                                |
|                                    | $\eta$<br>[gradi] | $V$ [m/s] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] | $\zeta$ [rispetto<br>alla criticità] |
|                                    | -4                | 54        | 3.4%                                 | -                                    | 1.75%                                |
|                                    | -4                | 75        | 5.05%                                | -                                    | 0.65%                                |
|                                    | 0                 | 54        | 3.6%                                 | -                                    | 2.5%                                 |
|                                    | 0                 | 75        | 3.35%                                | -                                    | 1.0%                                 |
|                                    | +4                | 54        | 3.65%                                | -                                    | 2.9%                                 |
|                                    | +4                | 75        | 7.25%                                | -                                    | 1.3%                                 |
| <b>Requisito SdM</b>               |                   | <b>54</b> | <b>&gt; 2%</b>                       |                                      |                                      |
|                                    |                   | <b>75</b> | <b>&gt; 1%</b>                       |                                      |                                      |

Dalla Tabella 3.5 e dalla Tabella 3.6 si nota che lo smorzamento composito misurato (meccanico + aerodinamico) in flusso calmo e turbolento con angoli di attacco di  $-4^\circ$ ,  $0^\circ$  e  $4^\circ$  è conforme ai criteri SdM di stabilità aerodinamica ad eccezione dei  $-4^\circ$  in flusso turbolento.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

### 3.3 Conclusioni

La configurazione C5/63 preferenziale è stata scelta come la configurazione caratterizzata da schermi di sicurezza alti 1,8 m con vuoto d'aria del 55% lungo i guardavia stradali esterni, schermi di sicurezza alti 2,4 m con vuoto d'aria del 55% lungo i guardavia stradali interni e schermi di sicurezza alti 1,8 m lungo le corsie di ispezione ferroviaria. Inoltre la configurazione preferenziale dell'impalcato è dotata di una piastra intradosso con il 30% di vuoto d'aria al di sotto delle corsie di ispezione ferroviaria e un'inclinazione dei pannelli laterali ferroviari di 63° orizzontale.

## 4 Verifica della geometria dell'impalcato

I sub-test D2, D3, D4, D5, D6 e D8 sono stati eseguiti per verificare ulteriormente la geometria dell'impalcato, ottenere i valori di progetto per i coefficienti di carico da vento statico e l'ammettenza aerodinamica nonché le derivate aerodinamiche per i calcoli numerici della stabilità aerodinamica ed i livelli di smorzamento aerodinamico. Le prove sono state eseguite presso la NRC (sub-test D2), la BLWTL (sub-test D3, D5 e D6), FORCE (sub-test D1 e D4) e BMT (sub-test D8) e sono riportate in [1], [4], [5], [6], [7], [11] e [13].

### 4.1 Stabilità aerodinamica

La Tabella 4.1 riassume le velocità di vento flutter critiche misurate ottenute dalle tre serie di prove in galleria del vento, D1 [4], D3 [6] e D8 [13]. Le prove D8 sono state effettuate con due tipi di frangivento: di tipo B con fori incisi circolari, di tipo A fatti di metalli stirato. Sia gli schermi Force che BLWTL corrispondono alla tipologia B.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

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

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

Si nota dalla Tabella 4.1 che l'impalcato soddisfa i criteri in assenza di traffico e solo la situazione combinata di traffico stradale e treno presente scende al di sotto dei requisiti a flusso calmo con angolo del vento di  $0^\circ$ . La corrispondente velocità critica del vento nella prova a flusso turbolento è superiore a 100 m/s, il che sta ad indicare che la presenza di una turbolenza appena un pò più forte nelle prove del vento piuttosto che in quelle a flusso calmo incrementerà la velocità critica in modo significativo. Si consiglia di verificare questo aspetto ulteriormente durante la fase del

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

Progetto Esecutivo.

I test D8 hanno pure verificato l'effetto delle maglie orizzontali tra i cassoni (vedi il paragrafo successivo relativo alle vibrazioni dovute a distacco dei vortici per un'ulteriore spiegazione) nel caso di schermi frangivento di tipo A, con e senza turbolenza nel flusso in arrivo. Le velocità critiche del vento ottenute sono state pari a 92 m/s e 103 m/s, rispettivamente. Le maglie orizzontali non compromettono quindi la stabilità aerodinamica.

La Tabella 4.2 riassume la media calcolata dello smorzamento composito ottenuta dalle due serie di prove in galleria del vento, D1 e D3. Per le prove BLWTL viene assunto uno smorzamento strutturale dello 0,3% di criticità.

*Tabella 4.2 Media calcolata di smorzamento composito a flusso calmo per la sezione d'impalcato a velocità del vento di fondo scala di 54 m/s e 75 m/s. \*smorzamento torsionale negativo. \*\*incertezza nelle misure.*

| Flusso calmo<br>(I = 0.5%) |                 |            | D4<br>Force         | D3<br>BLWTL         | D8 BMT                         |                                | D3 BLWTL                                     |                                              |            |
|----------------------------|-----------------|------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
|                            |                 |            | Assenza di traffico | Assenza di traffico | Assenza di traffico, schermo A | Assenza di traffico, schermo B | Treno e veicoli stradali, cassone sopravento | Treno e veicoli stradali, cassone sottovento | Solo treno |
|                            | $\eta$<br>[deg] | V<br>[m/s] | $\zeta$             | $\zeta$             | $\zeta$                        | $\zeta$                        | $\zeta$                                      | Z                                            | $\zeta$    |
|                            | -4              | 54         | 2.4%                | 4.3%                | -                              | -                              | 3.7%                                         | 3.9%                                         | 5.3%       |
|                            | -4              | 75         | 1.55%               | 5.7%                | -                              | -                              | 5.5%                                         | 5.8%                                         | 8.2%       |
|                            | 0               | 54         | 3.65%               | 2.1%                | 4.8%                           | 2.8%                           | 2.1%*                                        | 2.5%                                         | 1.4%**     |
|                            | 0               | 75         | 1.9%                | 3.1%                | 5.0%                           | 2.9%                           | 2.1%                                         | 2.8%                                         | 2.1%*      |
|                            | +4              | 54         | 3.55%               | 2.4%                | -                              | -                              | 2.4%                                         | 2.6%                                         | 1.8%       |
|                            | +4              | 75         | 1.9%                | 2.2%                | -                              | -                              | 2.2%                                         | 2.5%                                         | 1.9%       |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <i>Rev</i><br><i>F0</i> | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |

|                  |  |           |                |                |
|------------------|--|-----------|----------------|----------------|
| <b>Requisito</b> |  | <b>54</b> | <b>&gt; 2%</b> | <b>&gt; 1%</b> |
| <b>SdM</b>       |  | <b>75</b> | <b>&gt; 1%</b> | <b>-</b>       |

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

## 4.2 Vibrazioni indotte dai vortici

Le vibrazioni indotte da vortici hanno fatto parte delle misurazioni effettuate durante il sub-test D7 presso la BMT come discusso al punto 3.2.1 e verificate, con maggior dettaglio, nel sub-test D8 per la sezione d'impalcato C5/63 caratterizzata da tre disposizioni degli schermi. Gli elementi degli schermi frangivento e di sicurezza testati comprendevano due schermi metallici estensibili (A) simili agli elementi degli schermi applicati per il modello Soluzione D da PoliMi nel 2004 e uno schermo in lamiera con fori circolari incisi. Il coefficiente di perdita di carico per i due schermi A è risultato essere rispettivamente uguale a  $k = 2.7$  e  $k = 3.7$ , mentre per lo schermo B è stato riscontrato un valore di  $k = 2.7$ .

La Figura 4.1 replica le risposte al livello di smorzamento minimo dello 0,11% testato corrispondente ad un numero di Scruton  $Sc = 0,079$ , il che soddisfa il requisito di prova  $SdM \quad Sc < 0,3$ . Si nota che il modello sezionale dell'impalcato risponde in flessione verticale ad una velocità di vento adimensionale del modello di ca. 0.4 (2.5 m/s alla scala del modello) e in torsione a velocità del vento di ca. 0.8 (6.5 m/s alla scala del modello) e 1.35 (11 m/s alla scala del modello).

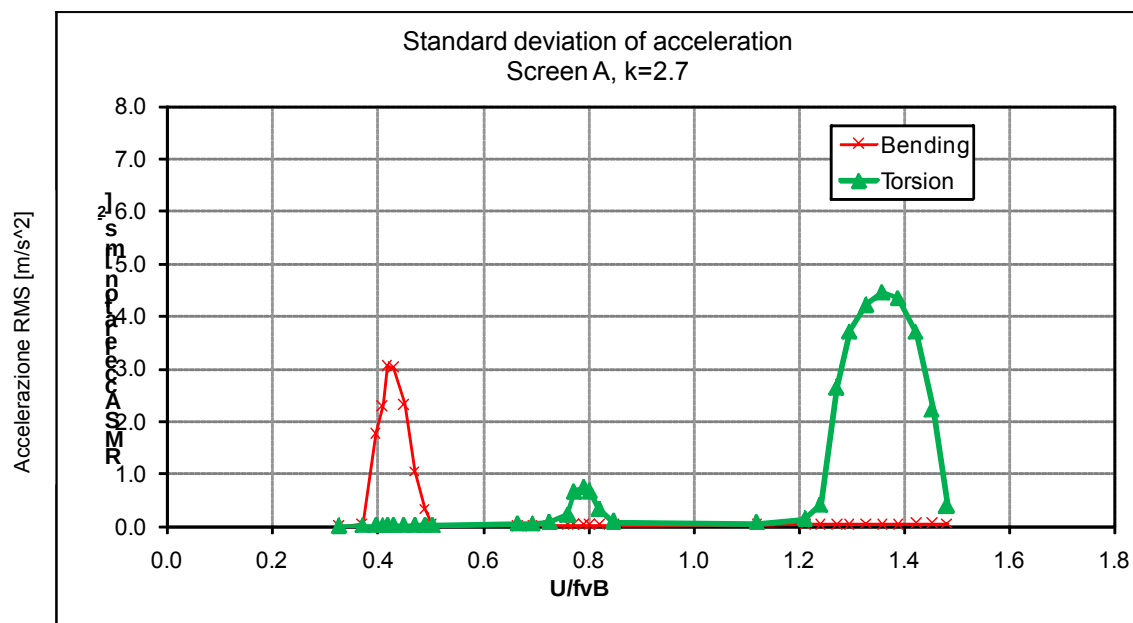


Figura 4.1 Risposta al distacco dei vortici per la configurazione C5/63, schermo A,  $k=2.7$  come funzione di una velocità del vento adimensionale. Smorzamento 0,095% di criticità,  $Sc = 0,079$ .



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

La Figura 4.2 mostra la risposta al distacco dei vortici del modello C5/63 dotato di schermi metallici estensibili (A) con un coefficiente di perdita di carico  $k = 3.7$  in presenza dello smorzamento minimo possibile (0.095% rispetto alla criticità,  $Sc = 0.079$ ). Si nota che un secondo picco di piegamento torsionale diminuisce per lo schermo  $k = 2.7$ , mentre il primo aumenta.

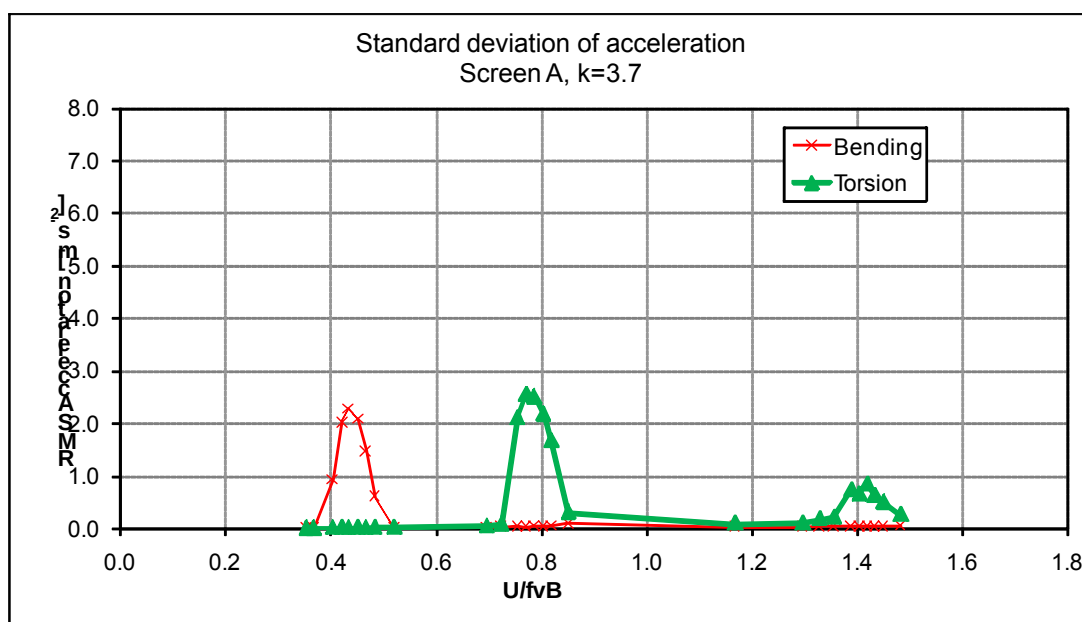


Figura 4.2 Risposte al distacco dei vortici del modello in scala per la configurazione C5/63, Schermo A,  $k = 3.7$  in funzione della velocità adimensionale del vento. Smorzamento 0.095% della criticità,  $Sc = 0.079$ .

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <b>Rev</b><br>F0 | <b>Data</b><br>20/06/2011 |

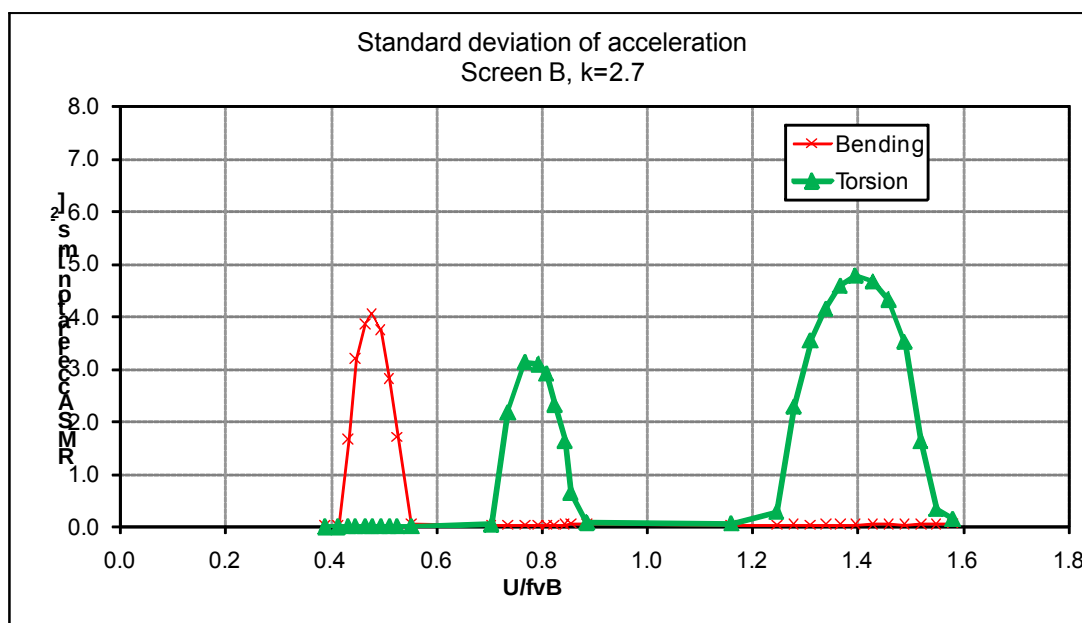
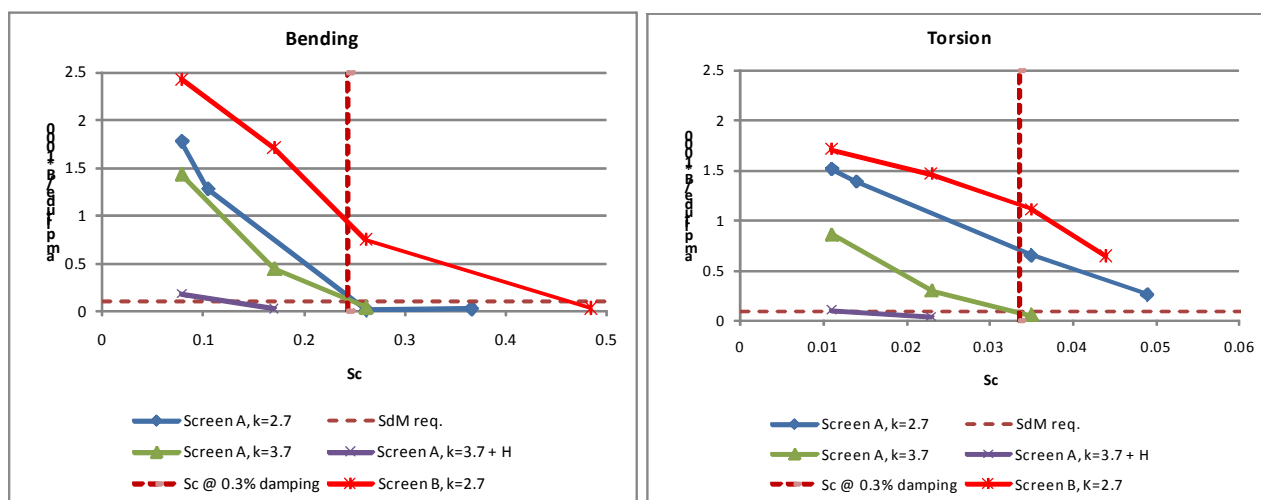


Figura 4.3 Risposte al distacco dei vortici del modello in scala per la configurazione C5/63, Schermo B,  $k = 2.7$  in funzione della velocità adimensionale del vento. Smorzamento 0.095% della criticità,  $Sc = 0.079$ .

Dalla Figura 4.3 si nota che la risposta ai vortici della sezione d'impalcato C5/63 dotata dello schermo B con foro circolare inciso è leggermente superiore rispetto al modello con gli schermi estensibile a maglia metallica.

L'aumento del livello di smorzamento elimina la risposta torsionale abbastanza rapidamente nel caso dell'impalcato dotato di schermi A con  $k = 3.7$  mentre il picco di piegamento verticale è meno influenzato dal livello di smorzamento. Per le altre configurazioni testate, le risposte al piegamento ed alla torsione sono più persistenti e più difficili da mitigare mediante smorzamento. Una panoramica dell'effetto dello smorzamento strutturale sulla risposta al distacco dei vortici viene riportata in Figura 4.4, che mostra la risposta rms verticale e la flessione ai bordi dovuta a torsione normalizzata dalla larghezza del ponte B in funzione del numero di Scruton. Da questa figura si evince che i requisiti SdM delle flessioni ai bordi adimensionali di  $10^{-4}$  vengono rigorosamente soddisfatti solo per la sezione d'impalcato dotata di schermi metallici estensibili A con  $k = 3.7$ , assumendo uno smorzamento strutturale dello 0.3% rispetto alla criticità corrispondente a numeri di Scruton  $Sc_b = 0.24$  per il piegamento e  $Sc_t = 0.033$  per la torsione basati sulla massa della sezione e sul momento di inerzia della massa.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <b>Rev</b><br>F0 | <b>Data</b><br>20/06/2011 |



**Figura 4.4** Piegamento RMS e flessione ai bordi dovuta a torsione in funzione del numero di Scruton.

Il posizionamento di una maglia perforata orizzontale tra il cassone ferroviario ed i cassoni stradali come indicato in **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata.** si rivela molto efficiente nell'eliminazione della risposta verticale come dimostrato in Figura 4.4 (Schermo A,  $k = 3.7 + H$ ). Guardando alla risposta al distacco dei vortici in funzione della velocità del vento per la sezione di impalcato dotata di schermi B, Figura 4.5, si nota che gli schermi orizzontali tra il cassone ferroviario ed i cassoni stradali sono efficienti solo nella risposta al piegamento verticale, ma hanno poco effetto sulla risposta alla torsione. Si dovrebbe infine notare che la leggera turbolenza con intensità along wind e di turbolenza verticale  $I_u = 4.8\%$  e  $I_w = 3.7\%$  riduce sostanzialmente la risposta al distacco dei vortici.



**Figura 4.5** Sezione dell'impalcato C5/63 con griglia orizzontale tra i cassoni stradali e ferroviari.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

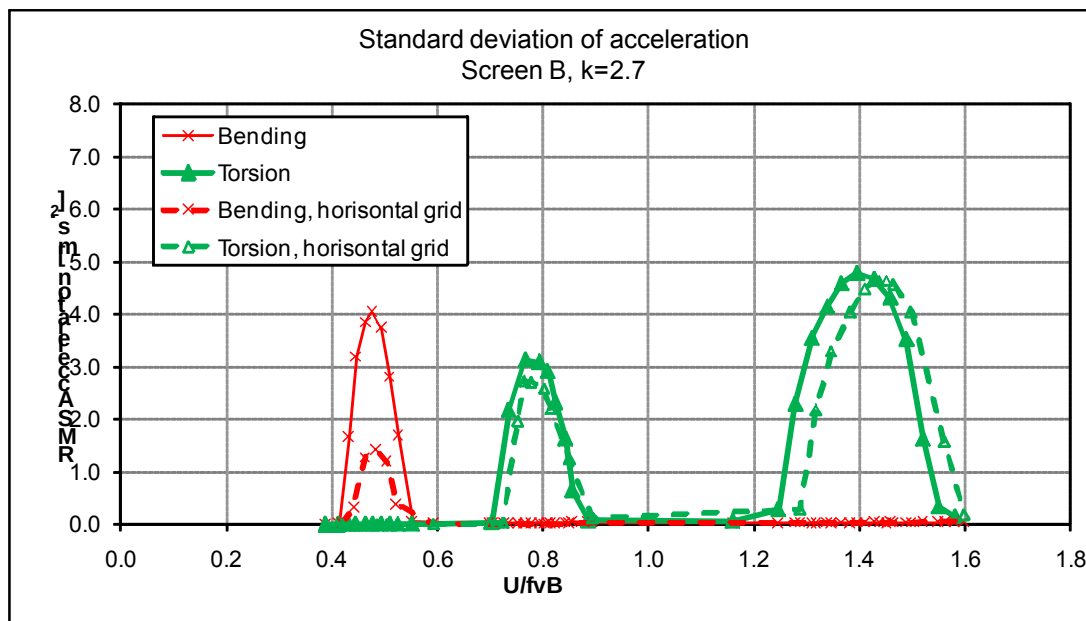


Figura 4.5 Confronto delle risposte al distacco dei vertici per la configurazione C5/63, schermi B,  $k = 2.7$  con e senza maglie orizzontali inserite tra i cassoni stradali ed il cassone ferroviario. Accelerazioni del modello in scala in funzione della velocità del vento adimensionale. Smorzamento dello 0.13% della criticità.

Avendo dimostrato nel sub-test D8 che la risposta al distacco dei vortici dell'impalcato dipende fortemente dalla disposizione dettagliata delle maglie degli schermi frangivento e di sicurezza e non è solo in funzione del coefficiente di perdita di carico, *si propone di* studiare ulteriormente questo effetto prima della o durante la fase esecutiva allo scopo di trovare una configurazione degli schermi frangivento ottimale comprendente effetti di mitigazione del distacco dai vortici e di protezione.

### 4.3 Coefficienti di carico da vento statico

I coefficienti di carico da vento vengono definiti come forza di portanza e resistenza  $F_{L,D}$  e momento di ribaltamento  $F_M$  che agiscono sul modello sezionale reso non dimensionale mediante normalizzazione con carico dinamico  $\frac{1}{2}\rho V^2$ , lunghezza di estensione del modello  $L_A$  e larghezza del modello d'impalcato  $B$  (portanza e resistenza) o larghezza dell'impalcato al quadrato  $B^2$ :

$$C_{L,D} = \frac{F_{L,D}}{\frac{1}{2}\rho V^2 L_A B}$$

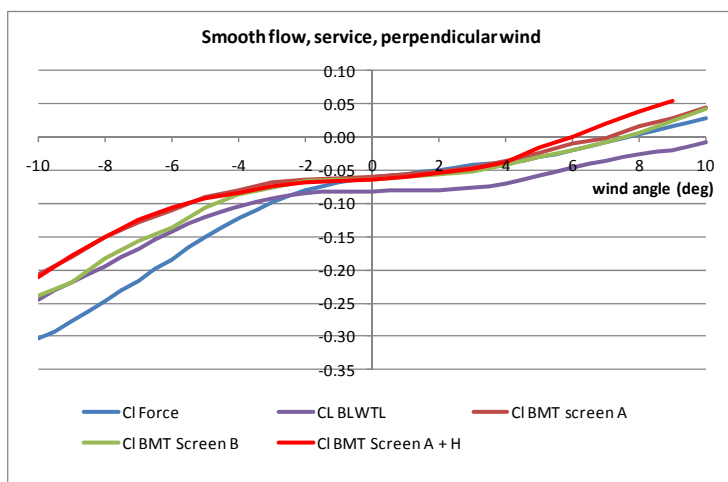
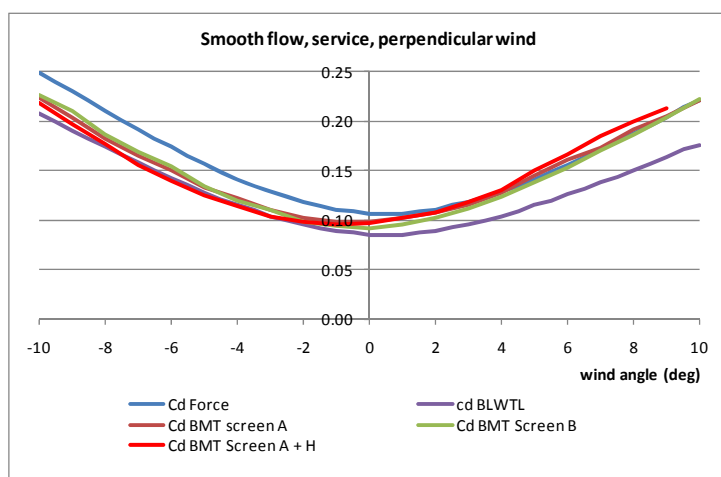
|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

$$C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2}\rho V^2 L_A B^2}$$

I coefficienti di carico da vento statico hanno fatto parte delle misurazioni eseguite durante i sub-test D3, D4 e D8 (vento perpendicolare al cassone, assenza di traffico) e sub-test D5 (in presenza di traffico, vento sotto gli angoli di deflessione). La Figura 4.6 e la Figura 4.7 mostrano un confronto tra i valori misurati in due laboratori rispettivamente in flusso calmo e flusso turbolento.

I test D8 sono stati condotti esclusivamente in flusso calmo e nella condizione di servizio.

I risultati ottenuti dal sub-test D4 di FORCE sembrano essere la serie di coefficienti più conservativa e sono stati quindi usati nei calcoli di buffeting, [8].



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <b>Rev</b><br>F0 | <b>Data</b><br>20/06/2011 |

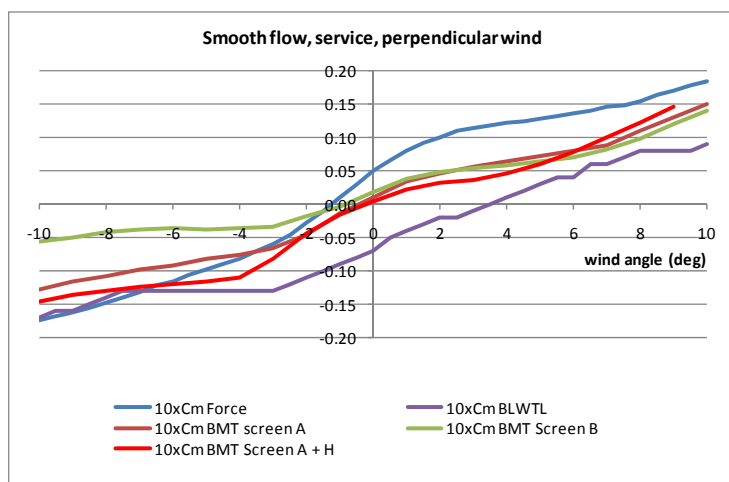


Figura 4.6 Coefficienti di carico da vento statico ottenuti dalle tre prove in parallelo (sub-test D3, D4 e D8), assenza di traffico. Flusso calmo, vento perpendicolare.

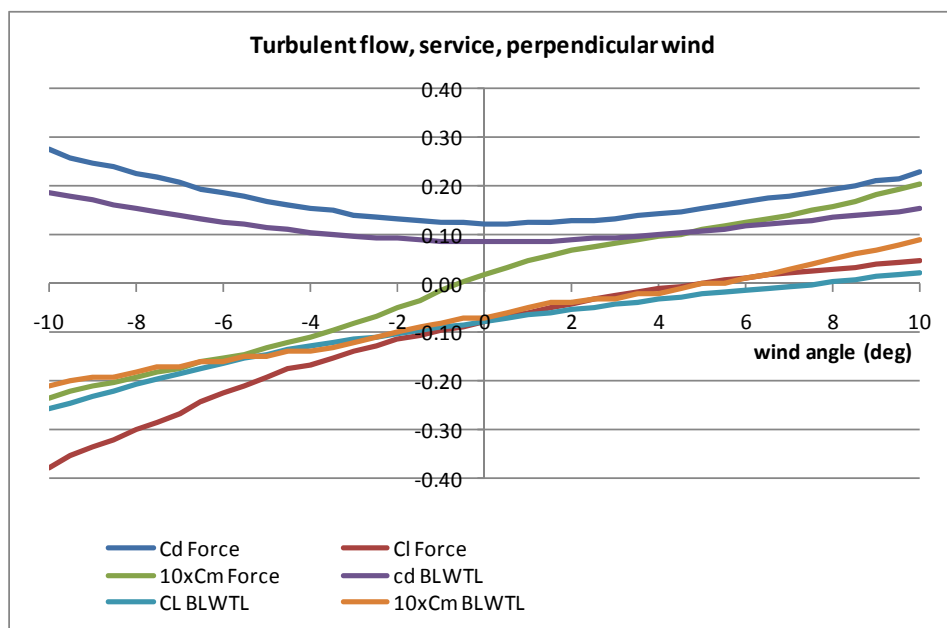


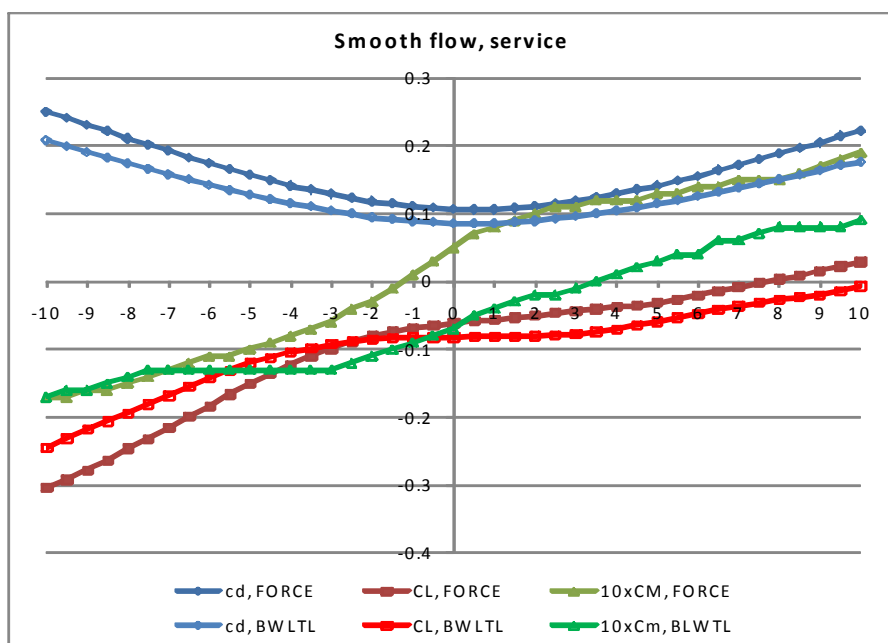
Figura 4.7 Coefficienti di carico da vento statico ottenuti dalle due prove in parallelo (sub-test D3 e D4), assenza di traffico. Flusso turbolento, vento perpendicolare.

E' interessante confrontare i risultati ottenuti dai due laboratori di prova per la fase di costruzione quando sulla sezione dell'impalcato non sono presenti corrimano, schermi frangivento o guardavia, v. Figura 4.. Quindi, i coefficienti di resistenza misurati diventano per lo più identici, le differenze tra

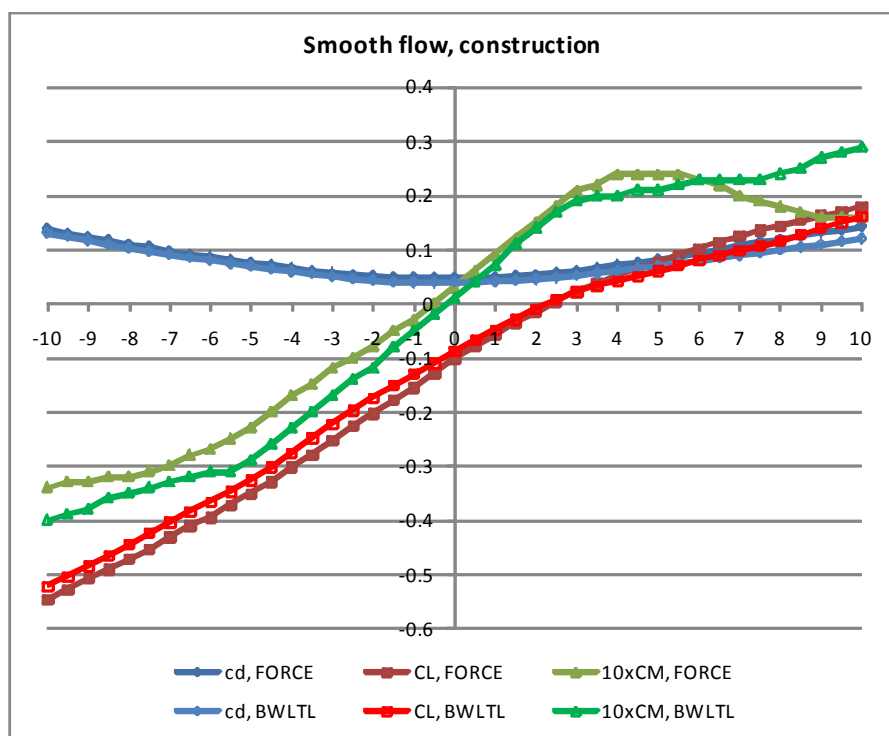
|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

i coefficienti di portanza ed in particolare la pendenza da portanza diventano molto più piccole ed anche l'accordo tra i coefficienti di momento e le pendenze del diagramma di momento migliora notevolmente. Ciò suggerisce fortemente che le differenze tra le due serie di misure sono causate soprattutto dalle differenze nel modo in cui corrimano, schermi e barriere vengono modellizzati anche se entrambi i modelli soddisfano i requisiti di perdita di pressione e di porosità degli schermi frangivento. I risultati delle prove ottenuti dai test D8 presso la BMT sembrano confermare la dipendenza dei coefficienti di resistenza dalla configurazione degli schermi, in quanto i coefficienti di resistenza in queste prove si trovano tra i coefficienti di resistenza di Force e quelli di BLWTL in condizioni di servizio.

Anche le diverse rugosità dei modelli possono giocare un ruolo. Si può dire che una superficie più rugosa rappresenti in qualche modo un numero di Reynolds più alto nel caso di una superficie curva, simile alla ben nota traslazione della crisi di resistenza verso numeri di Reynolds più bassi per superfici più ruvide, tuttavia, come indicato dai risultati per la fase di costruzione, ciò non sembra giocare un grosso ruolo in questo caso, in quanto i risultati sono quasi simili.



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |



**Figura 4.9** Coefficienti di carico da vento statico ottenuti dalle due prove in parallelo (sub-test D3 e D4), in assenza di traffico. Flusso calmo, vento perpendicolare. Servizio e costruzione.

La prova condotta in scala 1:30 presso la NRC in Canada, [5], per l'inclinazione a  $45^\circ$  (v. punto 3), viene messa a confronto con le prove in scala 1:80 presso Force sulla stessa configurazione (C5/45) in Figura 4.. Si nota che la resistenza diminuisce un pò con l'aumentare del numero di Reynolds proprio come previsto, mentre i coefficienti di portanza e di momento attorno all'attacco del vento orizzontale sono molto simili. La pendenza del diagramma di momento è invece molto minore nelle prove su scala industriale e resta ancora da risolvere se questa sia una caratteristica di scala vera e propria o un problema di post-elaborazione.



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

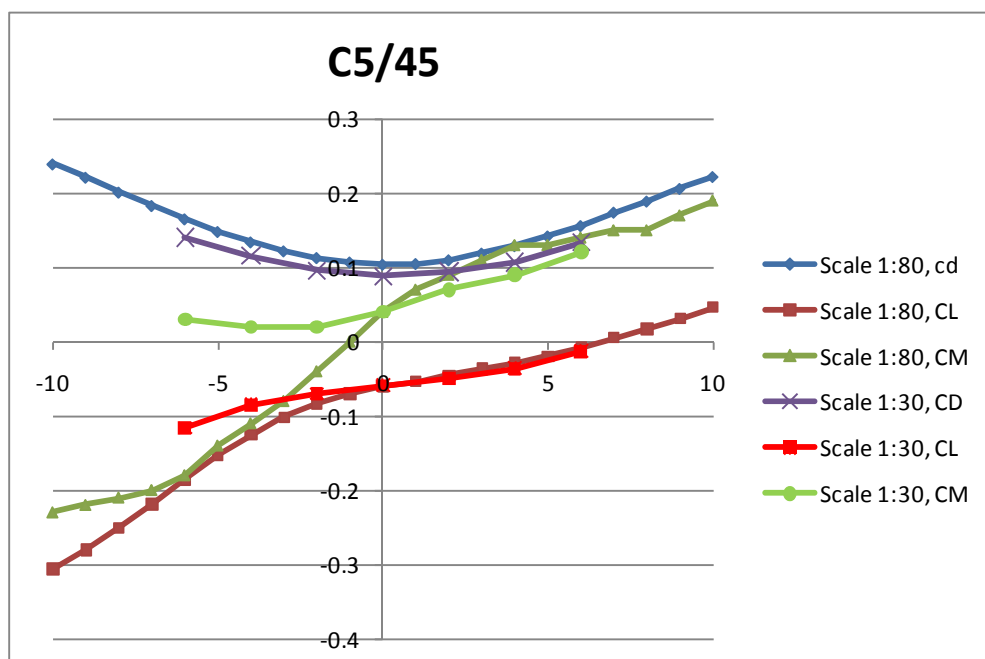


Figura 4.10 Coefficienti di carico da vento statico ottenuti da due prove con scale differenti (sub-test D1 e D2), in assenza di traffico. Flusso calmo, vento perpendicolare. Servizio.

Sulla base di quanto detto sopra si conclude che i coefficienti di carico da vento statico ottenuti dalle prove in scala 1:80 di Force possano essere considerati rappresentativi (un pò conservativi) per l'intero ponte. Per quanto riguarda il coefficiente di resistenza, si ritiene sia meglio usare per la progettazione un valore medio di detto coefficiente di 0.107 per non essere troppo prudenti, altrimenti si useranno i valori del flusso turbolento di Force.

I requisiti SdM [2] stabiliscono che la pendenza dei coefficienti di portanza e di momento  $K_L = dC_L/d\eta$ ,  $K_M = dC_M/d\eta$  debba rientrare entro certi limiti, dove  $\eta$  is l'angolo del vento rispetto all'orizzontale:

$$1/10 \cdot 2\pi < K_L < 1/5 \cdot 2\pi \text{ e } 1/10 \cdot \pi/2 < K_M < 1/5 \cdot \pi/2.$$

nel campo  $-6^\circ < \eta < 6^\circ$  in assenza di traffico e

$$0 < K_L \text{ e } 0 < K_M$$

nel campo  $-3^\circ < \eta < 3^\circ$  in presenza di traffico.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

Nelle riunioni di coordinamento tenutesi durante la fase di progettazione la società Stretto di Messina ha accettato che la pendenza della portanza e del momento potrebbe deviare dai valori richiesti a condizione che l'impalcato soddisfi ai requisiti di stabilità.

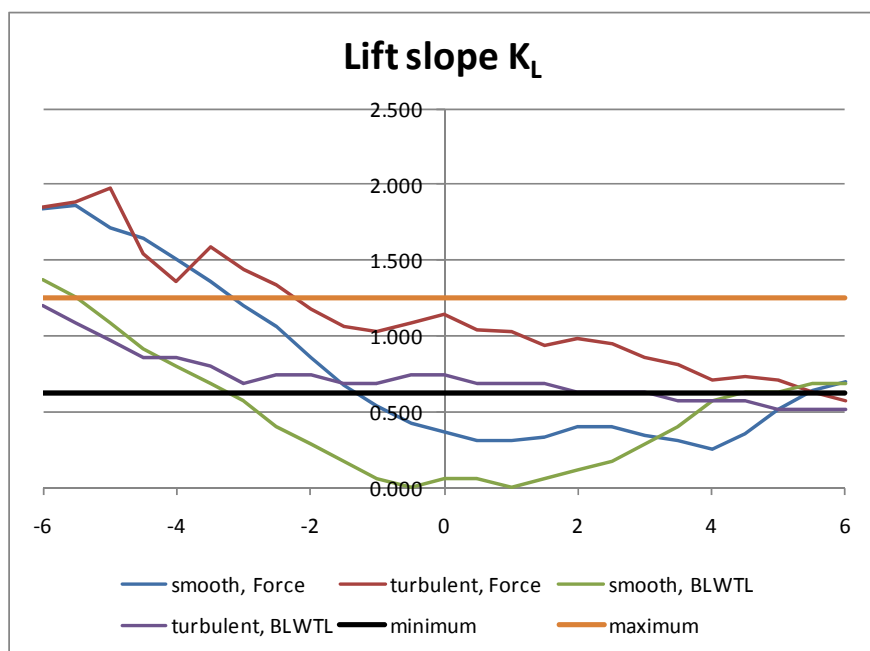
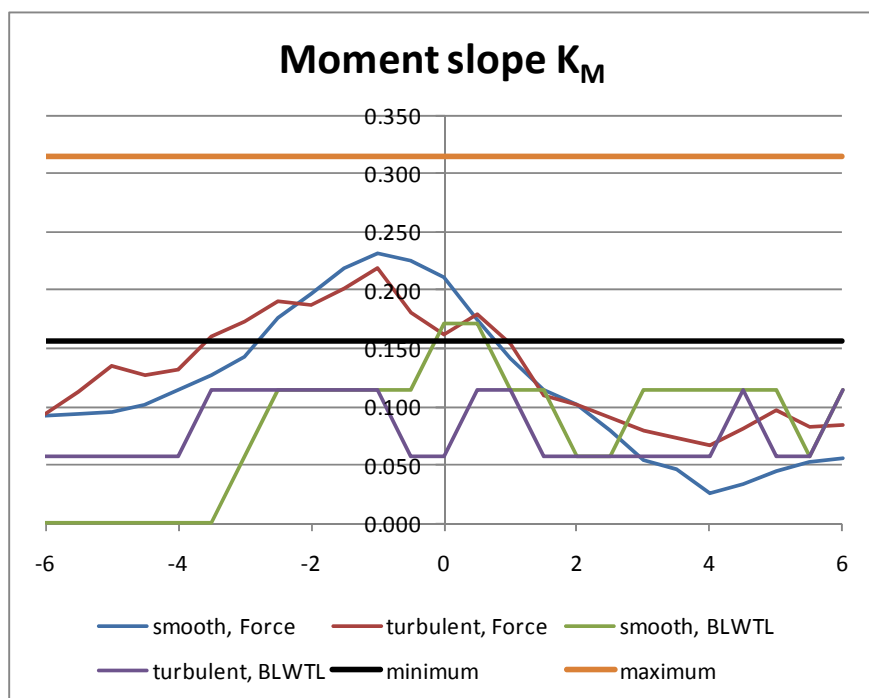


Figura 4.11 Pendenze della portanza risultanti dalle due prove in parallelo (sub-test D3 e D4), assenza di traffico. Vento perpendicolare. Vengono mostrati i valori minimi e massimi conformemente a [2].

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |



*Figura 4.8 Pendenze del momento risultanti dalle due prove in parallelo (sub-test D3 e D4), assenza di traffico. Vento perpendicolare. Vengono mostrati i valori minimi e massimi conformemente a [2].*

Si può vedere che la portanza scende in genere di poco, ma è comunque maggiore di zero in tutte le prove. Anche la pendenza del momento è sempre superiore a zero, anche se di poco, sull'intero campo. Non vengono quindi indicate instabilità galloping.

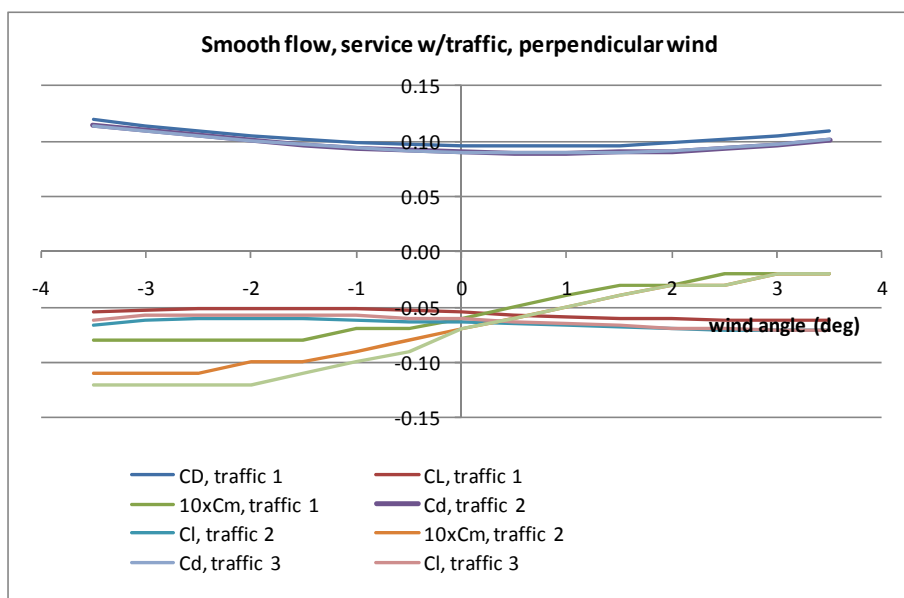
I coefficienti di carico da vento statico e le pendenze per le tre configurazioni di traffico sono riportati nelle Figura 4.9 a Figura 4.12. Le configurazioni di traffico vengono numerate come segue:

Traffico 1: traffico stradale su cassone sopravento, treno.

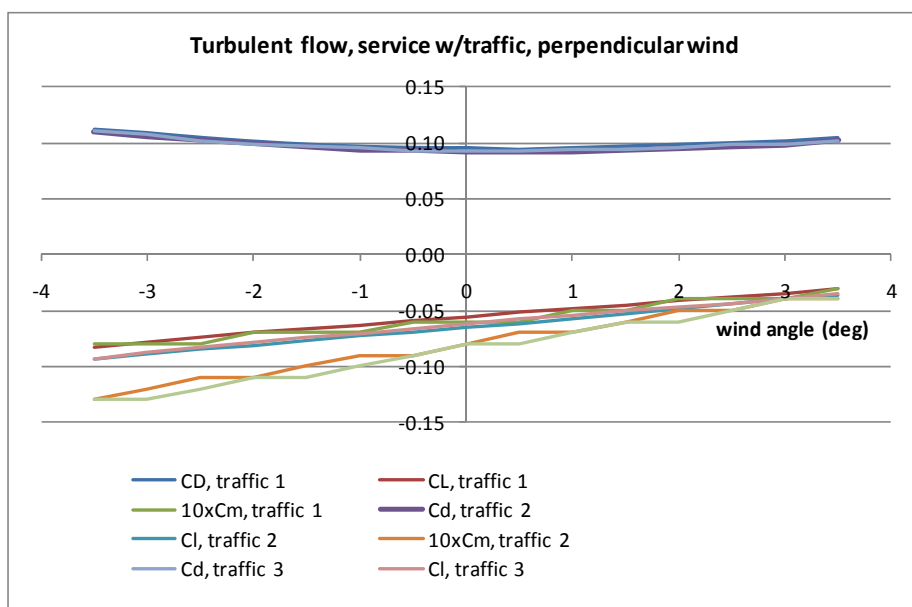
Traffico 2: traffico stradale su cassone sottovento, treno.

Traffico 3: solo treno.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <b>Rev</b><br>F0 | <b>Data</b><br>20/06/2011 |



**Figura 4.9** Coefficienti di carico da vento statico in presenza di traffico. Flusso calmo, vento perpendicolare.

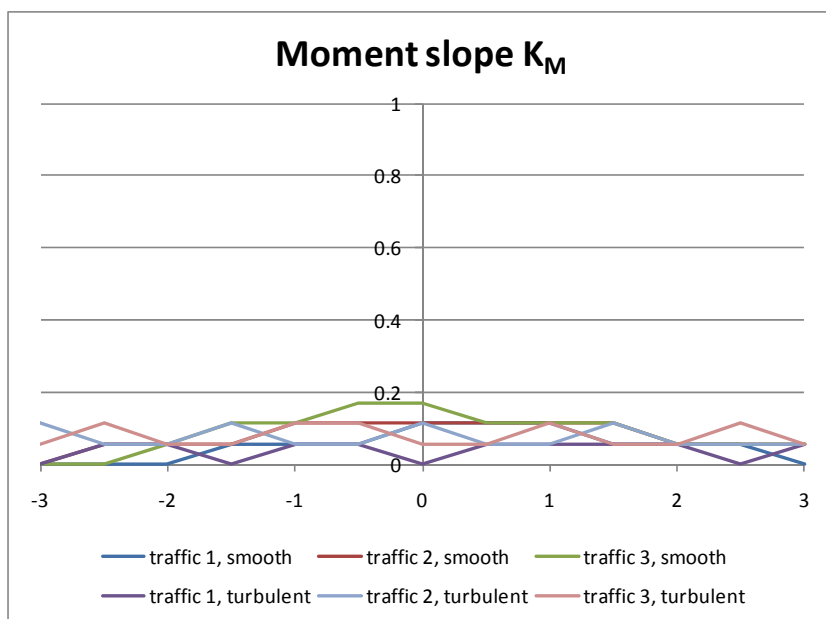


**Figura 4.10** Coefficienti di carico da vento statico in presenza di traffico. Flusso turbolento, vento perpendicolare.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |



**Figura 4.11** Pendenze di portanza, traffico.



**Figura 4.12** Pendenze di momento, traffico.

Si può vedere che esiste una differenza molto piccola tra i coefficienti di carico del vento nelle varie configurazioni di traffico. Ad eccezione delle pendenze di portanza con flusso calmo, tutte le pendenze sono positive.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

#### 4.4 Ammettenza aerodinamica

Le ammettenze aerodinamiche sono state misurate sia presso il FORCE (sub-test D4, [7]) che presso la BLWTL (sub-test D3, [11]) per le fasi in-service e costruzione. Le ammettenze per tutti i tre gradi di libertà, portanza, resistenza e momento, sono state misurate con flusso turbolento con  $I_U = 7,5\%$  e  $I_W = 7\%$ .

Le ammettenze misurate per il vento orizzontale sono illustrate nelle figure che seguono. Gli aggiustaggi funzionali rispetto alle misurazioni sono indicati in blu. Gli aggiustaggi sono stati ottimizzati per il campo  $fB/U = 0,05$  a  $0,5$ . Esistono differenze significative tra le ammettenze misurate nei due laboratori che possono essere dovute ai diversi modi in cui sono state eseguite le misurazioni. Presso la BWLTL, le misurazioni vengono eseguite su una striscia (distanza uguale alla distanza tra i traversi) mentre il Force esegue le misurazioni su ciascuna estremità, vale a dire che comprende l'intera lunghezza.

Si è deciso di trascurare le ammetteze aerodinamiche nei calcoli di buffeting in quanto si è dimostrato più conservativo, [8]. Si è anche visto che le differenze tra le ammettenze aerodinamiche misurate hanno una piccola influenza solo sulle risposte al buffeting come esemplificato in

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

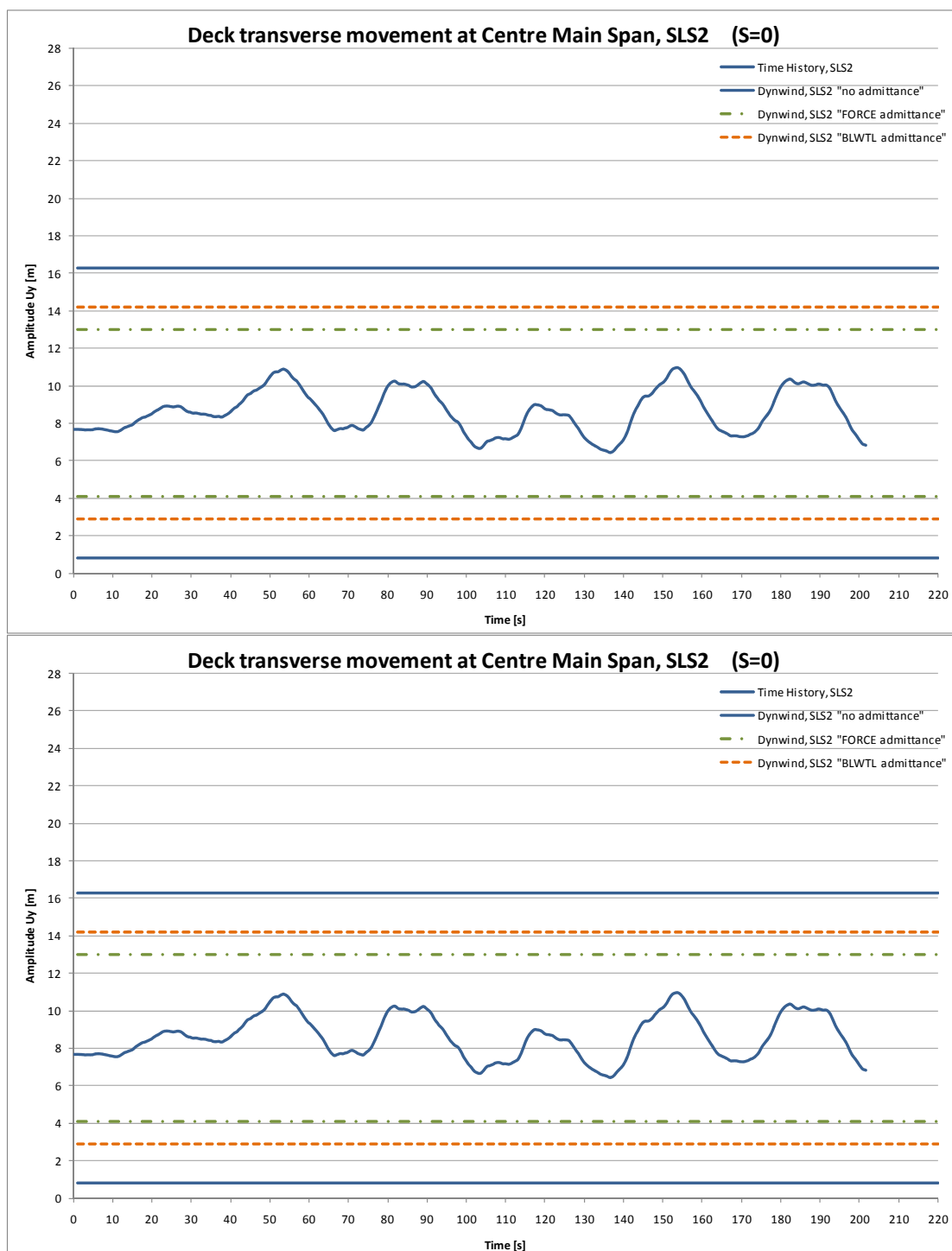


Figura 4.13.

Movimento trasversale dell'impalcato al centro della campata principale

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

Storia temporale

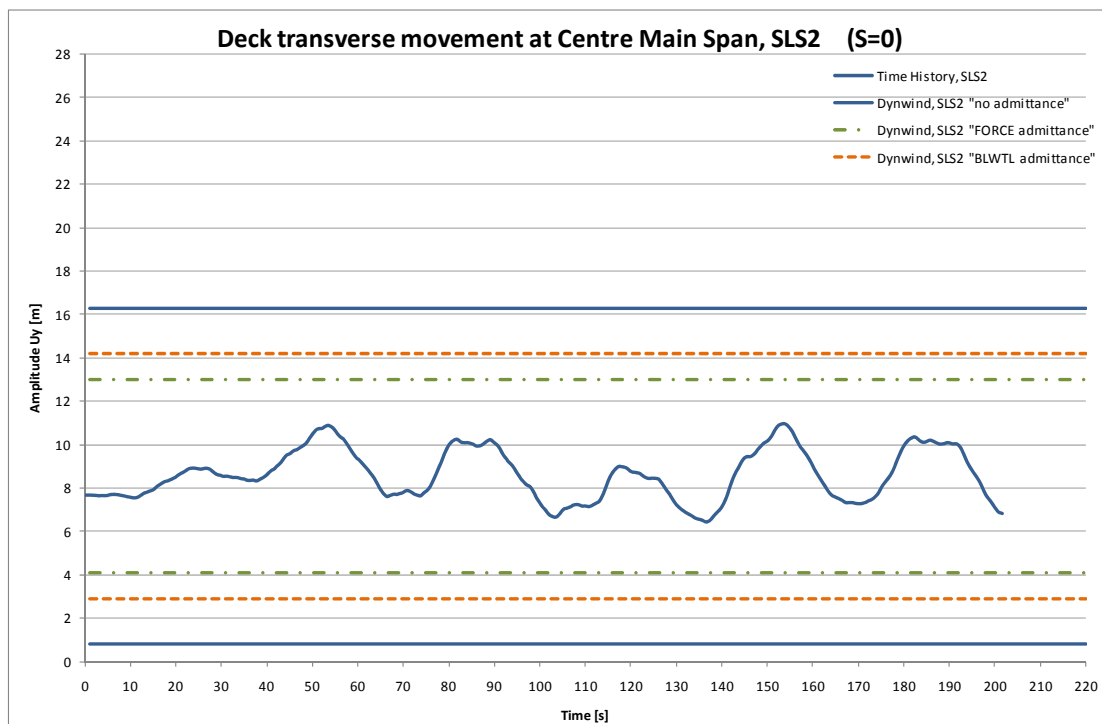
Dynwind, "nessuna ammettenza"

Dynwind "ammettenza FORCE"

Dynwind "ammettenza BLWTL"

Ampiezza

Tempo



**Figura 4.13** Risposte al buffeting per i tre tipi di ammettenza: nessuna, misurata da BLWTL e misurata da Force. Da [8].



|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <b>Codice documento</b><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <b>Rev</b><br><i>F0</i> | <b>Data</b><br><i>20/06/2011</i> |

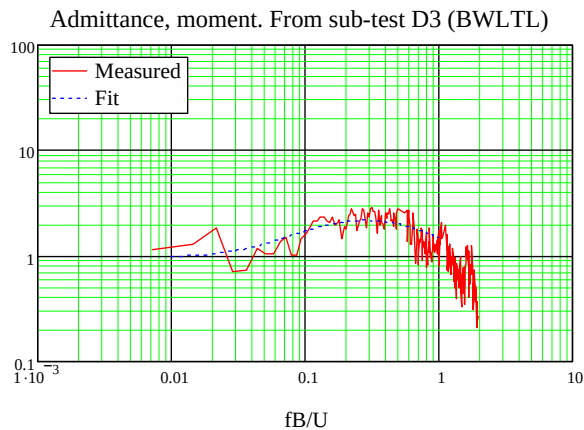
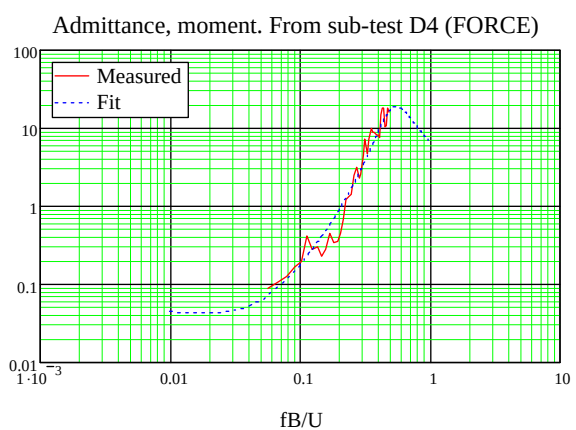
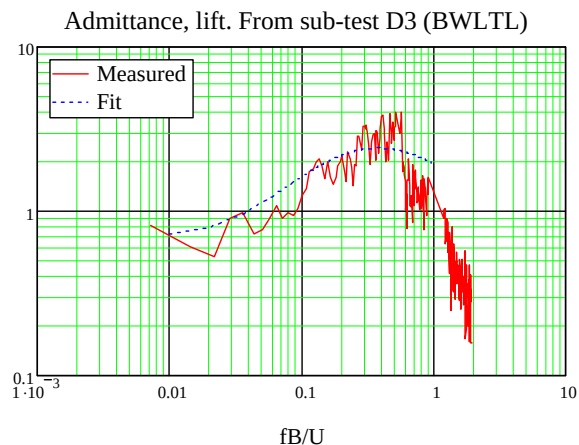
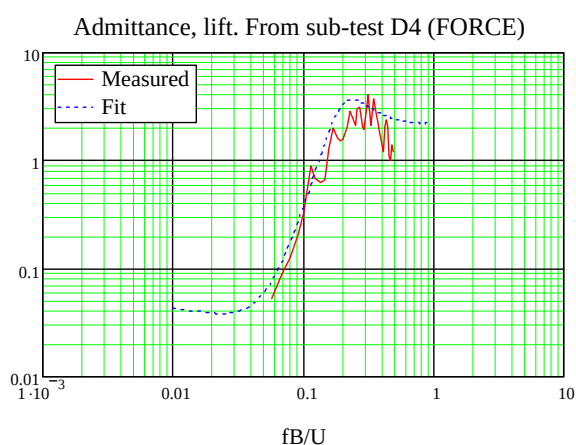
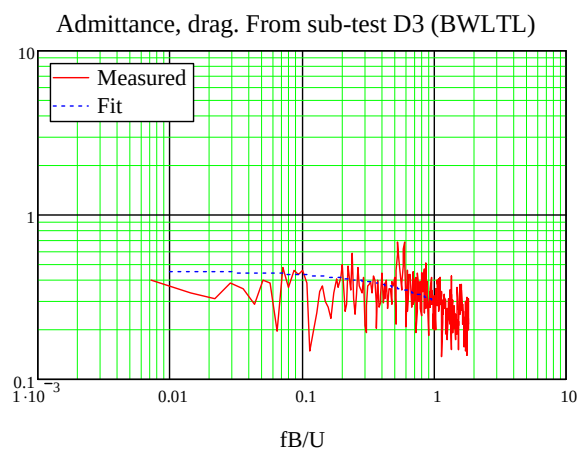
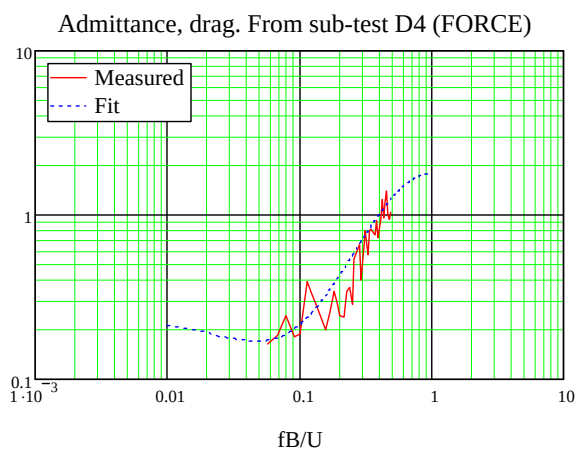


Figura 4.14 Ammettenze aerodinamiche misurate ed adattate, dai sub-test D3 e D4.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

## 4.5 Derivate aerodinamiche

Le derivate aerodinamiche sono state misurate sia presso il FORCE (sub-test D4, [7]) e presso la BLWTL (sub-test D3, [11]) per le fasi in-service e costruzione con angoli del vento tra -6° e 6°. Le derivate aerodinamiche con angolo 0° vengono messe a confronto in Figura 4.15 e Figura 4.. ed indicate secondo la formulazione di Scanlan [12]:

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left( KP_1^* \frac{\dot{y}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 P_3^* \theta + K^2 P_4^* \frac{y}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right) \\
 L &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left( KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 H_3^* \theta + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{y}}{U} + K^2 H_6^* \frac{y}{B} \right) \\
 M &= \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left( KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 A_3^* \theta + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{y}}{U} + K^2 A_6^* \frac{y}{B} \right)
 \end{aligned}$$

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.

Qui di seguito viene fornita la relazione con le derivate aerodinamiche richieste da SdM e definite da Zasso [9], in piccoli cap, :

|                                                 |                                                 |                                                                  |                                            |                                                 |                                            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $P_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_5^*$ | $P_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_2^*$ | $P_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 p_3^*$  | $P_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_6^*$  | $P_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_1^*$  | $P_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_4^*$ |
| $H_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_1^*$ | $H_2^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_2^*$  | $H_3^* = -\frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 h_3^*$ | $H_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_4^*$  | $H_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_5^*$  | $H_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_6^*$ |
| $A_1^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_1^*$  | $A_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_2^*$ | $A_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 a_3^*$  | $A_4^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_4^*$ | $A_5^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_5^*$ | $A_6^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_6^*$  |

La Figura 4. e la Figura 4.16 mostrano le derivate nella formulazione. La serie completa delle derivate in entrambe le formulazioni è mostrata in forma grafica e tabellare nelle due relazioni di prova, [7] e [11].

Come appare dalla Figura 4.15 e dalla Figura 4., o dalla Figura 4. e dalla Figura 4.16, esistono alcune differenze tra le due serie di misurazioni. Dal momento che i dati ottenuti dal sub-test D4 coprono l'intera gamma delle velocità del vento relative (fino a 30), tali dati sono stati applicati nei calcoli della stabilità aerodinamica, [10], e nel calcolo delle riduzioni dello smorzamento e della rigidità aerodinamici modali per i calcoli di buffeting, [8].

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |

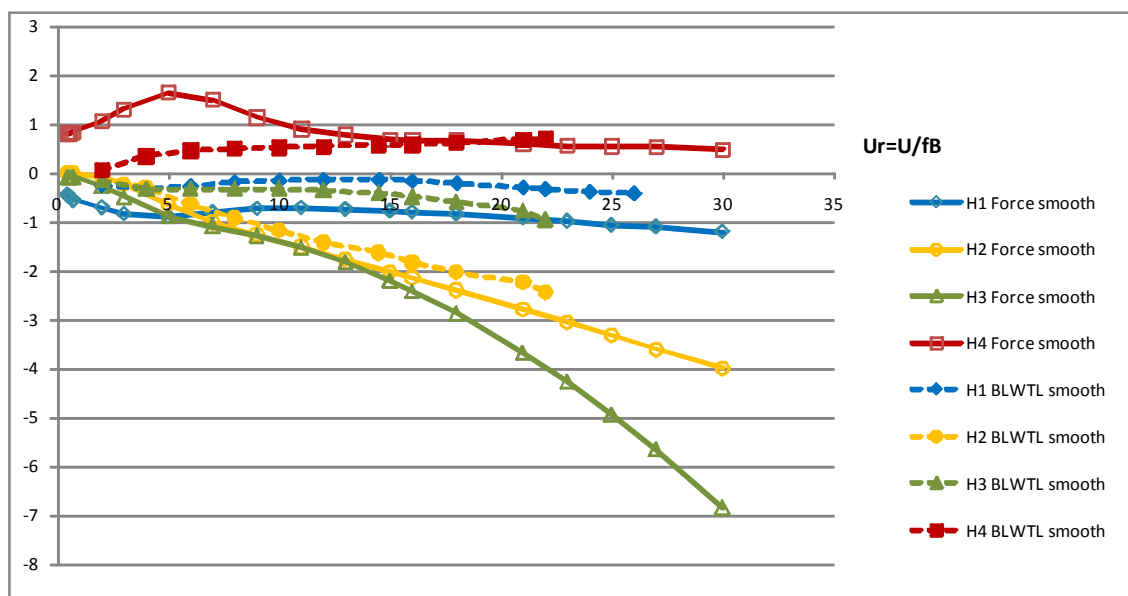


Figura 4.15 Derivate aerodinamiche misurate ( $H_{1-4}^*$ ) presso il FORCE (sub-test D4) e presso BWLTL (sub-test D4), flusso calmo. Angolo del vento a  $0^\circ$ . Notazione Scanlan.

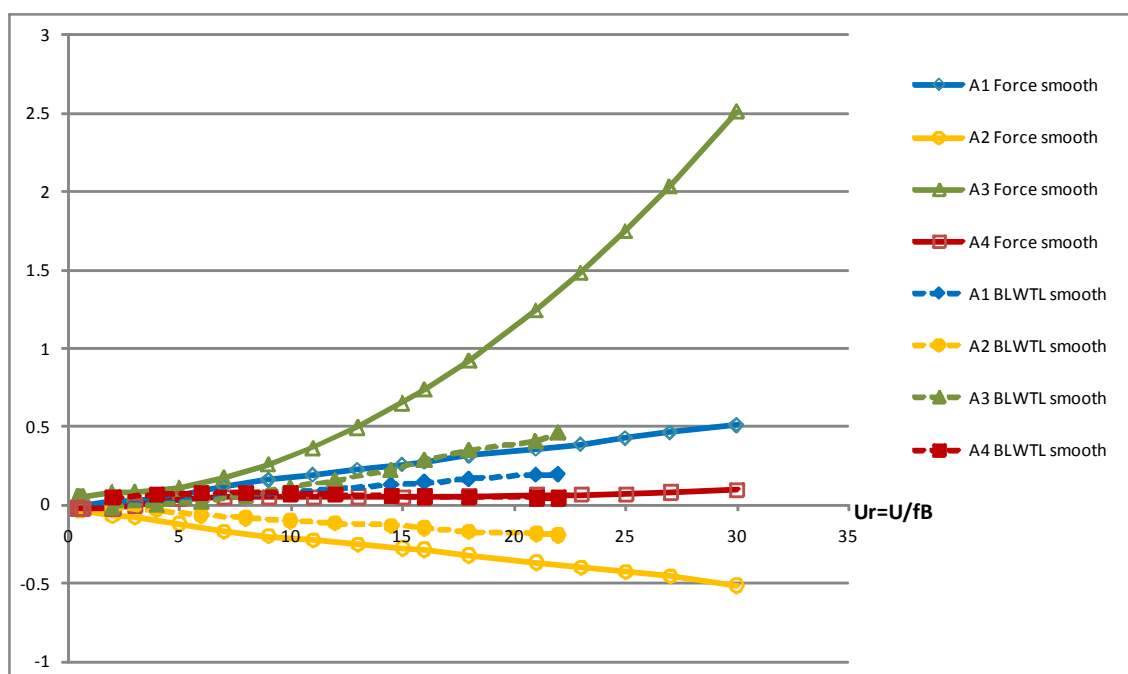
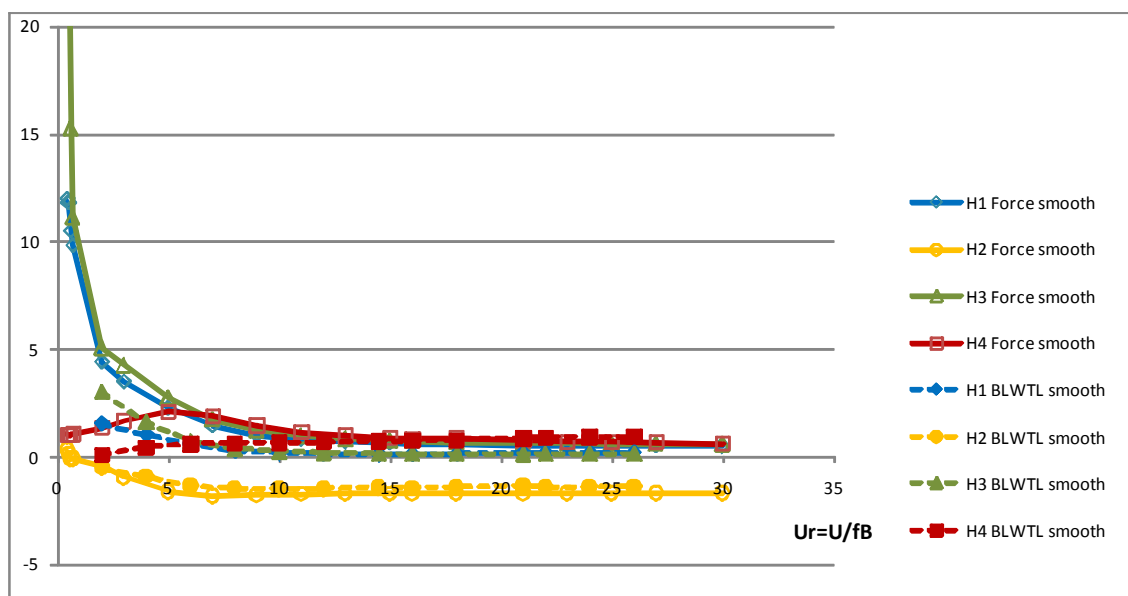


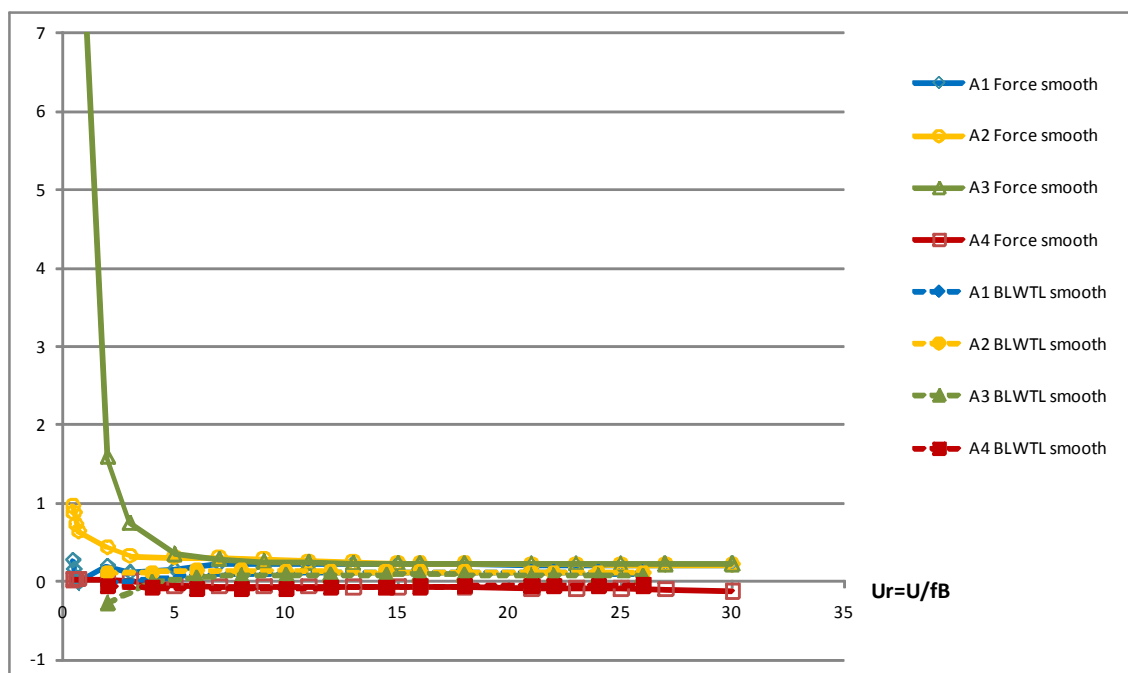
Figura 4.20 Derivate aerodinamiche misurate ( $A_{1-4}^*$ ) presso il FORCE (sub-test D4) e presso BWLTL (sub-test D3), flusso calmo. Angolo del vento a  $0^\circ$ . Notazione Scanlan.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |



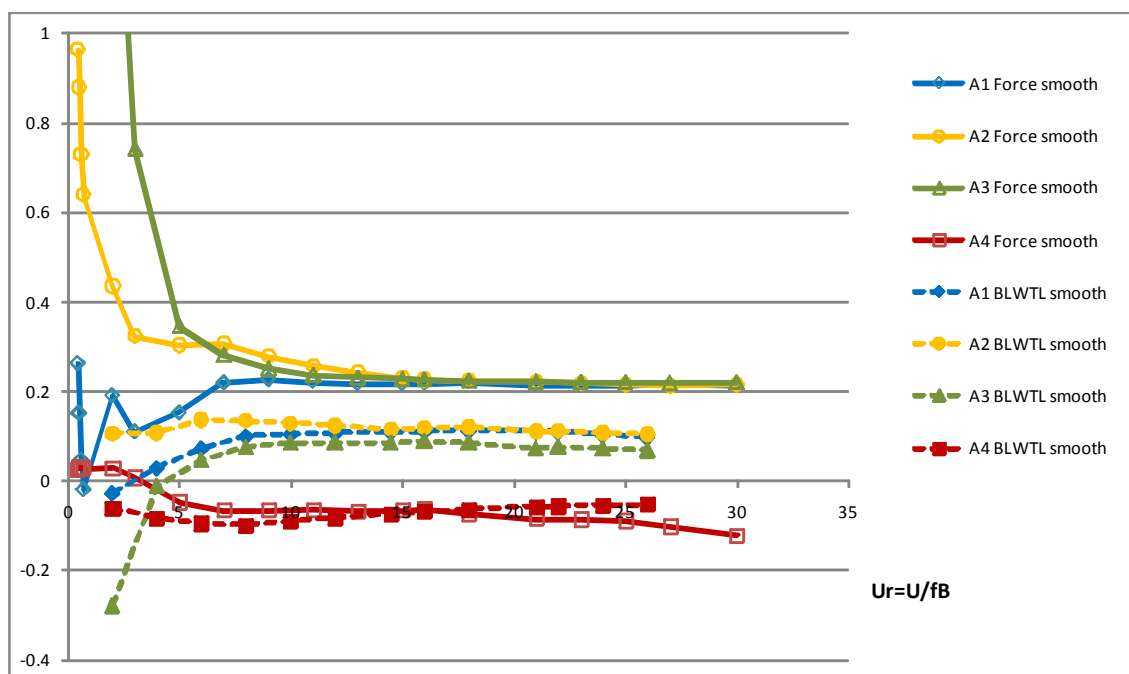
calmo

Figura 4.21 Derivate aerodinamiche misurate ( $H_{1-4}^*$ ) presso il FORCE (sub-test D4) e presso BWLTL (sub-test D4), flusso calmo. Angolo del vento a  $0^\circ$ . Notazione SdM (Zasso).



calmo

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |           |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |           |                    |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | Codice documento<br>PB0034_F0_ITA.doc                               | Rev<br>F0 | Data<br>20/06/2011 |



calmo

Figura 4.16 Derivate aerodinamiche misurate ( $A_{1-4}^*$ ) presso il FORCE (sub-test D4) e presso BWLTL (sub-test D3), flusso calmo, con primo piano (grafico in basso). Angolo del vento a  $0^\circ$ . Notazione SdM (Zasso).

## 5 Riferimenti

- 1 FORCE Technology. Sub-test 1 Section Model Tests for the Messina Strait Bridge. Report no. 110-25465, Rev. 1, June 2010.
- 2 Stretto di Messina, Specifiche Aerodinamiche, GCG.F.05.03. 2004.
- 3 BMT Fluid Mechanics. Messina Strait Crossing Deck Wind Tunnel Testing, Section Model Studies. Report no. 431185rep1v4, December 2010.
- 4 FORCE Technology. Additional Static & Stability Tests for the Messina Strait Bridge. Report no. 110-26444.02a, Rev. 1.1, January 2011.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                         |                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                         |                                  |
| <b>Prove in Galleria del vento, impalcato</b>                                     |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br><i>PB0034_F0_ITA.doc</i>                 | <i>Rev</i><br><i>F0</i> | <i>Data</i><br><i>20/06/2011</i> |

- 5 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.
- 6 BLWTL. A study of wind effects for the Messina Strait Bridge, Italy, deck section model - subtests D3 and D6. BLWTL-Interim-Report-M072-1-2010. November 2010.
- 7 FORCE Technology. Sub-test 4 Section Model Tests for the Messina Strait Bridge. Report no. 110-26444, Rev. 1, March 2011.
- 8 EUROLINK S.C.p.A. CG1000-P-CL-D-P-SB-S3-00-00-00-00-03, Rev. B/ 2011-03-07, Aerodynamic calculations, buffeting. 2011.
- 9 Zasso, A. Flutter derivatives: Advantages of a new representation convention. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 60, pp. 35-47. 1996.
- 10 EUROLINK S.C.p.A. CG1000-P-CL-D-P-SB-S3-00-00-00-00-02, Rev. B/ 2011-03-07, Aerodynamic calculations, girder. 2011.
- 11 BLWTL. A study of wind effects for the Messina Strait Bridge, Italy, deck section model - subtests D3, D5 and D6. BLWTL-SS42-2010/Draft 4. January 2011.
- 12 Simiu & Scanlan. Wind Effects on Structures, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley Interscience.
- 13 BMT Fluid Mechanics. Messina Straits Crossing, Italy Deck - Tests D8. Report no. 431185/10, March 2011.

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                     |                  |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|  |  | <b>Ponte sullo Stretto di Messina</b><br><b>PROGETTO DEFINITIVO</b> |                  |                           |
| Prove in Galleria del vento, impalcato                                            |                                                                                   | <i>Codice documento</i><br>PB0034_F0_ITA.doc                        | <i>Rev</i><br>F0 | <i>Data</i><br>20/06/2011 |

## Appendice A - Scopo dei Lavori

**Memo**

**Title** Wind tunnel tests, Sub-test 1, Scope of work  
**Date** 22 April 2010  
**To** Eurolink, EYA  
**Copy** SAMI  
**From** ALN

**COWI A/S**

Parallelsvej 2  
DK-2800 Kongens Lyngby  
Denmark

Tel +45 45 97 22 11  
Fax +45 45 97 22 12  
[www.cowi.com](http://www.cowi.com)

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for section model tests, sub-test 1 optimisation, following the overall aerodynamic design methodology for the Progetto Definitivo phase.

The objective of the tests is to optimise the aerodynamic properties of the bridge deck cross section for the new configuration having 2% outwards slope of the roadways.

## 2 Requirements to testing

The tests will be carried out as conventional deck section model tests covering:

- Aerodynamic stability, soft spring suspension
- Steady state aerodynamic coefficients, force gauges
- Vortex shedding excitation, stiff spring suspension

The pressure loss coefficient for the permanent external wind screens must be experimentally verified to be 2.7.

The tests are in general to be carried out in smooth flow. However, a confirmatory test for the best performing cross section shall be carried out in turbulent flow with intensity  $I = 7\%$ .

The spring suspension for the stability tests must be designed in such a way that full scale wind speeds of 120 m/s full scale can be reached.

The spring suspension for the vortex shedding tests must be designed in such a way that the wind speed is larger than 2 m/s model scale at lock-in.

The model mechanical damping shall be less than 0.3% logarithmic decrement.



### 3 Configurations to be tested

The geometry and layout of the bridge deck section to be tested is given in the enclosed drawings: 100 - 104. The external wind screens at the tips of the service lanes shall always be included.

The following variants of the deck section shall be tested:

- C1 Deck without internal safety screens and rail walkway soffit plates
- C2 Deck without internal safety screens but including rail walkway porous soffit plates
- C3 Deck without internal safety screens but including rail walkway solid soffit plates
- C4 Deck with internal inner safety screens and rail walkway soffit plates (porous or solid according to results for C2, C3).
- C5 Deck with internal inner and outer safety screens and rail walkway soffit plates (porous or solid according to results for C2, C3).
- C6 Deck configuration selected according to results for configurations C1 - C5 but with solid railway screens removed.
- C7 Optional: A combination of the above appendages not tested above.

### 4 Test programme

The test programme is split in two parts:

- 1 Optimisation of configuration
- 2 Verification of optimum configuration

#### 4.1 Optimisation of configuration

Optimisation of the configuration is carried out by comparing the critical wind speed for aerodynamic instability (flutter) for the spring suspended section model at  $0^\circ$  wind angle and steady state wind load coefficients  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$  at wind inflow angles with horizontal of  $-10^\circ$  -  $+10^\circ$ , obtained for configurations C1 - C7 in smooth flow.

Based on the above results a preferred configuration will be chosen for verification.

#### 4.2 Verification of configuration

Verification of the preferred configuration will involve measurement for aerodynamic stability at angles of incidence, and vortex shedding excitation of a spring suspended model.

#### 4.2.1 Aerodynamic stability

The critical wind speed for onset of aerodynamic stability (flutter) shall be measured by slowly incrementing the wind speed until instability is observed. The static and dynamic response of the section is recorded for documentation. Tests are to be carried out in smooth and turbulent flow.

The tests are carried out for 3 inflow angles with horizontal of:  $-4^0$ ,  $0^0$ ,  $+4^0$ .

The aerodynamic damping in vertical motion and torsion motion are derived from decay tests in smooth flow at full scale wind speeds of 54 m/s and 75 m/s.

#### 4.2.2 Reynolds' Number test

The steady state drag, lift and moment coefficients shall be verified in smooth and turbulent flow and at a minimum of 3 wind speeds at wind inflow angles with horizontal of  $-10^0$  -  $+10^0$ .

#### 4.2.3 Vortex shedding excitation

Vortex shedding excitation, if any, is expected to occur in the non-dimensional wind speed range  $0.5 < V/fB < 2.0$  where  $V$  is wind speed,  $f$  is the deck eigen-frequency in vertical bending or torsion and  $B$  is the over all deck width  $B = 60.74$  m.

The wind speed range and bending and/or torsion response amplitudes due to vortex shedding excitation shall be measured by slowly incrementing the wind speed and recording the dynamic response.

The measurements are to be carried for  $0^0$  wind angle and in smooth and turbulent flow.

### 5 Model parameters

The section model shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Preliminary inertia and frequencies to be modelled are as follows:

- Full scale mass  $m = 53.2 \cdot 10^3$  kg/m
- Full scale mass moment of inertia  $I = 26.5 \cdot 10^6$  kgm<sup>2</sup>/m
- First bending frequency  $f_b = 0.0645$  Hz
- First torsion mode  $f_t = 0.0831$  Hz

Minor adjustments to the data, if any, will be given prior to start of the tests.

### 6 Data analysis and reporting

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

Test data shall be provided in digital form upon request.

**Memo**

**Title** Wind tunnel tests, Sub-test D2, Scope of work  
**Date** 29 June 2010  
**To** Eurolink, EYA  
**Copy** SAMI  
**From** ALN

**COWI A/S**

Parallelsvej 2  
DK-2800 Kongens Lyngby  
Denmark

Tel +45 45 97 22 11  
Fax +45 45 97 22 12  
www.cowi.com

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for large scale section model tests sub-test D2 (deck), following the overall aerodynamic design methodology for the Progetto Definitivo phase.

The objective of these tests is to verify the validity of the aerodynamic properties of the deck at high Reynolds Numbers.

## 2 Requirements to testing

The tests shall be carried out as a conventional deck section model test covering:

- Aerodynamic stability, soft springs
- Steady state wind load coefficients, force gauges
- Vortex shedding excitation, stiff springs

The pressure loss coefficient for the permanent external wind screens must be experimentally verified to be 2.7 with a 5% error margin.

The tests are to be carried out in smooth flow.

The spring suspension system for the stability tests must be designed in such a way that full scale wind speeds of 90 m/s full scale can be reached.

The model mechanical damping shall be less than 0.5% rel.-to-crit.

A model scale of 1:30 is selected to match existing model suspension rigs.

A model aspect ratio  $L/B = 2.75$  is selected to match existing support structures in the wind tunnel.

### 3 Configuration to be tested

The geometry and lay out of the bridge deck section to be tested is given in the enclosed drawings 100 - 104. The configuration of the internal safety screens and railway barriers are subject to optimisation by conventional section model tests and will be announced early June 2010.

### 4 Test programme

The high Reynolds Number sub-test 2 programme shall include the elements outlined in the following sections.

#### 4.1 Aerodynamic stability

The critical wind speed for onset of aerodynamic stability (flutter) shall be measured by slowly incrementing the wind speed until instability is observed. The static and dynamic response of the section model shall be recorded for documentation.

The aerodynamic damping in vertical and torsion motion shall be derived from decay tests at full scale wind speeds of 54 m/s and 75 m/s as a minimum.

The tests are to be carried out for five inflow angles with horizontal: -4, -2, 0, 2, 4 deg.

The results shall be presented in diagrams giving the dynamic root mean square and static response as function of wind speed. The result of the damping measurements shall be given in tabular form.

#### 4.2 Steady state wind load coefficients

Steady state wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  yielding lift, drag and overturning moment are to be measured at five inflow angles with horizontal of -4, -2, 0, 2, 4 deg. and at 10 different wind speeds spanning a Reynolds Number range:  $0.8 \cdot 10^6 < Re < 6.0 \cdot 10^6$  based on over all deck width.

The results shall be given in diagrams displaying the wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  as function of inflow angle with Reynolds Number as parameter.

#### 4.3 Vortex shedding excitation

Vortex shedding excitation, if any, is expected to occur in the non-dimensional wind speed range  $0.5 < V/fB < 2.0$  where  $V$  is wind speed,  $f$  is deck bending frequency in vertical motion and  $B$  is the over all deck width of 60.74 m.

The wind speed range and bending and/or torsion response amplitudes due to vortex shedding excitation shall be measured at 0 deg. of inflow angle with horizontal.

The measurements shall be made by slowly incrementing the wind speed and recording the dynamic response. A minimum of 40 measurement points shall be taken over the wind speed range.

The results shall be presented in diagrams giving the dynamic root mean square response as function of wind speed.

## **5 Model parameters**

The section model shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Preliminary inertia and frequencies to be modelled are as follows:

- Full scale mass  $m = 54.33 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$
- Full scale mass moment of inertia  $I = 26.65 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2/\text{m}$
- First bending frequency  $f_b = 0.0648 \text{ Hz}$
- First torsion mode  $f_t = 0.0832 \text{ Hz}$

## **6 Data analysis and reporting**

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

The report shall be accompanied by high quality video recordings of selected test runs.

Test data shall be provided in digital form upon request.

**Memo**

|              |                                                                                        |                                                                                             |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b> | Eurolink s.c.p.a.<br>Wind tunnel tests deck, Sub-tests D3, D5 and D6,<br>Scope of work | <b>COWI A/S</b><br><b>Parallelsvej 2</b><br><b>DK-2800 Kongens Lyngby</b><br><b>Denmark</b> |
| <b>Date</b>  | 5 July 2010                                                                            | <b>Tel +45 45 97 22 11</b>                                                                  |
| <b>To</b>    | Eurolink, EYA                                                                          | <b>Fax +45 45 97 22 12</b>                                                                  |
| <b>Copy</b>  | SAMI                                                                                   | <b>www.cowi.com</b>                                                                         |
| <b>From</b>  | ALN                                                                                    |                                                                                             |

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for conventional scale section model tests sub-test D3, D5 and D6 (deck), following the overall aerodynamic design methodology for the Progetto Definitivo phase.

The objective of these tests is to verify the aerodynamic properties of the preferred deck configuration for the in-service condition as well as during erection.

## 2 General Requirements

The geometrical scale of the section models shall be 1:80 or larger.

The model length to deck width ratio (aspect ratio) shall be larger than 3.

The blockage ratio of the wind tunnel shall be less than 10% for deck angles of attack in the range  $-10^0$  -  $+10^0$  with horizontal.

The pressure loss coefficient for the permanent external wind screens must be experimentally verified to be 2.7 with an error margin of 5%.

Smooth flow conditions in the wind tunnel shall be verified to have a turbulence level less than 2%.

Turbulent flow shall be verified to have a turbulence intensity of approximately 7%.

For elastically suspended models the spring suspension system must be designed in such a way that full scale wind speeds of 120 m/s can be reached.

The mechanical damping of spring suspended section models shall be less than 0.5% rel.-to-crit.

### 3 Sub-test D3

Sub-test D3 shall measure steady state wind load coefficients, aerodynamic derivatives and aerodynamic admittances for the preferred deck layout in the service condition as well as during erection.

#### 3.1 Steady state wind load coefficients

Steady state lift, drag and moment coefficients shall be measured in the angle of attack with horizontal in the range  $-10^0 < \alpha < +10^0$  at increments of  $0.5^0$ .

The sensitivity of the load coefficients to Reynolds' Number shall be checked by expanding one of the test runs at a selected angle of attack, say  $0^0$ , to measure the load coefficients in a range of wind speeds.

The tests shall be carried out in smooth and turbulent flow.

The results shall be presented in graphs giving the lift, drag and moment coefficients in a deck ( $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$ ) and fixed ( $C_Z$ ,  $C_X$ ,  $C_M$ ) frame of reference relative to the mean wind.

#### 3.2 Aerodynamic derivatives

Aerodynamic derivatives  $a^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $p^*_{1-6}$  following the convention given by Stretto di Messina (SdM) in ref. 1 shall be measured by the free decay method at deck angles of attack of  $\pm 6^0$ ,  $\pm 4^0$ ,  $\pm 2^0$ ,  $0^0$  with horizontal.

Conversion of aerodynamic derivatives obtained from the common Scanlan convention to the Stretto di Messina convention is presented in the appendix.

The tests shall be carried out in smooth flow only.

Tests shall be carried out at sufficiently high wind speeds to allow capture of flutter of the elastically suspended model and at sufficiently low wind speeds to identify vortex shedding excitation.

Each test run shall be repeated at least 10 times to increase the accuracy of the identification procedure.

The results shall be presented in graphs and as curve fits giving the aerodynamic derivatives as function of non-dimensional wind speed  $V/fB$ .

#### 3.3 Aerodynamic admittance

The aerodynamic admittances for lift, drag and twisting moment shall be measured by as the transfer functions between the incoming turbulent wind fluctuations and the resulting load fluctuations on the deck. The measurements shall be carried out by the force balance method and at deck angles of attack of  $\pm 6^0$ ,  $\pm 4^0$ ,  $\pm 2^0$ ,  $0^0$  with horizontal.

The tests shall be carried out in turbulent flow only.



The results shall be presented in graphs and as curve fits giving the aerodynamic admittances as function of non-dimensional frequency  $fB/V$ .

The spectral distribution and the root coherence of the along wind and vertical turbulence shall be documented.

Requirements to the measurement of aerodynamic admittances given in ref. 1 can not be honoured by measurements techniques, such as the force balance method, commonly employed by wind tunnel laboratories. In order to partially fulfil the SdM requirements it has been agreed to supply simultaneous time histories of forces on the deck model and along wind and vertical wind speeds measured by two fast responding anemometers located one deck width apart in the span wise direction and one half deck width upwind of the model for the angles of attack investigated. A minimum of one set of time series must be presented for each angle of attack.

#### 4 Sub-test D5

Sub-test D5 shall measure steady state wind load coefficients with and without traffic and at skew wind directions relative to the bridge line. Further the sub-test shall measure the mean wind and turbulence profiles at selected positions on the road and railways.

##### 4.1 Steady state wind load coefficients

Steady state lift, drag and moment coefficients shall be measured for the wind direction perpendicular to the bridge line  $\psi = 0^\circ$  and in skew wind directions  $\psi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  and  $45^\circ$  at angles of attack with horizontal in the range  $-10^\circ < \alpha < +10^\circ$  at increments of  $0.5^\circ$ . The measurements for  $\psi = 0^\circ$  shall be carried out for 3 different traffic set-ups to be defined and the measurements at skew angles  $\psi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  shall be carried out for 3 traffic set-ups and for no traffic.

The load tests shall be carried out in smooth and turbulent flow.

The results of the load tests shall be presented in graphs giving the lift, drag and moment coefficients in a deck ( $C_L, C_D, C_M$ ) and fixed ( $C_Z, C_X, C_Y$ ) frame of reference relative to the mean wind.

##### 4.2 Wind profiles

Vertical profiles of the mean wind and turbulence intensity ranging from deck level to 8-7 m above (full-scale) shall be measured by means of a hot wire probe at 8 stations across the deck corresponding to the centre of the roadway and railway lanes. The profile measurements shall be made for wind perpendicular to the bridge,  $\psi = 0^\circ$ , and at an angle of attack  $\alpha = 0^\circ$ . The wind profile measurements shall be made without traffic and in selected positions with 3 traffic configurations present.

The wind profile measurements shall be carried out in turbulent flow only.

The results of the wind profile measurements shall be presented in graphs giving the mean wind normalized by the free stream wind speed and turbulence intensity as function of height above roadway / railway surface for the various stations across the bridge deck.

## **5 Sub-test D6**

Sub-test D6 shall provide experimental data for verification of aerodynamic calculations of aerodynamic stability and buffeting responses using the three degree of freedom spring suspended section model.

### **5.1 Aerodynamic stability and buffeting**

The critical wind speed for onset of aerodynamic stability (flutter) and the buffeting responses shall be measured by slowly incrementing the wind speed until instability is observed. The static and dynamic response of the section is recorded for documentation.

The tests are carried out for 3 inflow angles with horizontal of:  $-4^0$ ,  $0^0$ ,  $+4^0$  in smooth flow and at  $0^0$  for turbulent flow.

Response measurements in turbulent flow shall be supplemented by simultaneous measurements of time histories of along wind and vertical flow fluctuations by means of two fast responding anemometers at one deck width spacing in the span wise directions and half a deck width upwind of the model, i.e. a similar set-up requested for the admittance tests. Simultaneous time series of vertical, twist and along wind response are delivered in calibrated form for processing by the client.

The aerodynamic damping in vertical motion and torsion motion are derived from decay tests in smooth flow at full scale wind speeds of 44, 47, 54, 60 and 75 m/s.

The tests are to be carried out for the deck without traffic as well as for the three traffic configurations investigated in sub-test D5.

The results of the stability/buffeting tests shall be documented in graphs giving the mean and root mean square vertical, along wind and torsion response of the deck section as function of full scale wind speed.

Aerodynamic damping levels measured at full scale wind speeds of 44, 47, 54, 60 and 75 m/s are reported in tabular form.

### **5.2 Documentation of turbulent flow**

Buffeting response is linked to the spatial and spectral distribution of the wind turbulence, thus these properties shall be fully documented.

The documentation comprises power spectral densities of along wind and vertical turbulence and their cross wind horizontal (along span) root coherences to

be obtained at the reference point for turbulence spectra applied for calculation of the aerodynamic admittances in sub-test D3.

## 6 Model parameters

The section model representing the in-service condition shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Inertia and frequencies to be modelled for the service condition are as follows:

- Full scale mass  $m = 54.33 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$
- Full scale mass moment of inertia  $I = 26.65 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2/\text{m}$
- Frequency of first asymmetric vertical bending mode  $f_v = 0.0648 \text{ Hz}$
- Frequency of first asymmetric torsion mode  $f_t = 0.0832 \text{ Hz}$
- Frequency of first asymmetric horizontal sway mode  $f_h = 0.055 \text{ Hz}$

Minor adjustments to the above data and corresponding data for the erection condition will be given prior to start of the tests.

## 7 Data analysis and reporting

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

The report shall be accompanied by high quality video recordings of selected test runs.

Test data shall be provided in digital form upon request.

## 8 References

- 1 Stretto di Messina. Technical specifications for the final and the executive plan of the bridge. Requirements and guidelines for the development of the project - Aerodynamic Design. Doc. code. F.05.03, 22 Oct. 2004.

## 9 Appendix - Aerodynamic Derivatives

The self excited forces, drag D, lift L and moment M acting on bridge decks are commonly expressed as aerodynamic derivatives  $P^*_{1-6}$ ,  $H^*_{1-6}$ ,  $A^*_{1-6}$  following Scanlan's original definition:

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

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

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

with a vertical axis h, and thus L, positive *downwards*. K is the reduced frequency,  $K = \omega B/V$ .

Reference 1 defines the aerodynamic derivatives  $p^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $a^*_{1-6}$  as follows:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 B \left( -p_1^* \frac{i\omega z}{V} + p_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - p_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + p_3^* \theta - p_5^* \frac{i\omega y}{V} + p_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 B \left( -h_1^* \frac{i\omega z}{V} + h_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - h_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + h_3^* \theta - h_5^* \frac{i\omega y}{V} + h_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 \left( -a_1^* \frac{i\omega z}{V} + a_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - a_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + a_3^* \theta - a_5^* \frac{i\omega y}{V} + a_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

Assuming harmonic motion  $h = h_0 e^{i\omega t}$   $y = y_0 e^{i\omega t}$   $\theta = \theta_0 e^{i\omega t}$  and inserting  $h = -z$  into the Scanlan expressions yields the following relationships between the SdM form ( $p^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $a^*_{1-6}$ ) and Scanlan form ( $P^*_{1-6}$ ,  $H^*_{1-6}$ ,  $A^*_{1-6}$ ) of aerodynamic derivatives:

|                                                 |                                                 |                                                                  |                                            |                                                 |                                            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $P_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_5^*$ | $P_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_2^*$ | $P_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 p_3^*$  | $P_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_6^*$  | $P_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_1^*$  | $P_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_4^*$ |
| $H_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_1^*$ | $H_2^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_2^*$  | $H_3^* = -\frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 h_3^*$ | $H_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_4^*$  | $H_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_5^*$  | $H_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_6^*$ |
| $A_1^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_1^*$  | $A_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_2^*$ | $A_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 a_3^*$  | $A_4^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_4^*$ | $A_5^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_5^*$ | $A_6^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_6^*$  |

*Relation between aerodynamic derivatives following Scanlan's original definition and the definition preferred by Stretto di Messina.*

It is noted that in later work Scanlan changed the definition of the aerodynamic derivatives in accordance with the following definition which yields a factor of 2 between the original and the new definition of the aerodynamic derivatives.

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

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

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

**Memo**

**Title** Eurolink s.c.p.a.  
Wind tunnel tests deck, Sub-tests D4, Scope of work

**Date** 25 June 2010

**To** Eurolink, EYA

**Copy** SAMI

**From** ALN

**COWI A/S**

Parallelvej 2  
DK-2800 Kongens Lyngby  
Denmark

Tel +45 45 97 22 11  
Fax +45 45 97 22 12  
www.cowi.com

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for conventional scale section model tests sub-test D4 (deck), following the overall aerodynamic design methodology for the Progetto Definitivo phase.

The objective of this test is to verify the aerodynamic properties of the preferred deck configuration obtained from sub-test D3.

## 2 General Requirements

The geometrical scale of the section models shall be 1:80 or larger.

The model length to deck width ratio (aspect ratio) shall be larger than 3.

The blockage ratio of the wind tunnel shall be less than 10% for deck angles of attack in the range  $-10^0$  -  $+10^0$  with horizontal.

The pressure loss coefficient for the permanent external wind screens must be experimentally verified to be 2.7 with an error margin of 5%.

Smooth flow conditions in the wind tunnel shall be verified to have a turbulence level less than 2%.

Turbulent flow shall be verified to have a turbulence intensity of approximately 7%.

## 3 Sub-test D4

Sub-test D4 shall verify steady state wind load coefficients, aerodynamic derivatives and aerodynamic admittances for the preferred deck layout in the service condition as well as during erection.

### 3.1 Steady state wind load coefficients

Steady state lift, drag and moment coefficients shall be measured in the angle of attack with horizontal in the range  $-10^0 < \alpha < +10^0$  at increments of  $0.5^0$ .

The sensitivity of the load coefficients to Reynolds' Number shall be checked by expanding one of the test runs at a selected angle of attack, say  $0^\circ$ , to measure the load coefficients in a range of wind speeds.

The tests shall be carried out in smooth and turbulent flow.

The results shall be presented in graphs giving the lift, drag and moment coefficients in a deck ( $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$ ) and fixed ( $C_Z$ ,  $C_X$ ,  $C_Y$ ) frame of reference relative to the mean wind.

### 3.2 Aerodynamic derivatives

Aerodynamic derivatives  $a^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $p^*_{1-6}$  following the convention given by Stretto di Messina (SdM) in ref. 1 shall be measured by the forced oscillation method at deck angles of attack of  $\pm 6^\circ$ ,  $\pm 4^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ ,  $0^\circ$  with horizontal.

Conversion of aerodynamic derivatives obtained from the common Scanlan convention to the Stretto di Messina convention is presented in the appendix.

The tests shall be carried out in smooth flow as well as in turbulent flow.

Tests shall be carried out at sufficiently high wind speeds to allow capture of flutter of the elastically suspended model and at sufficiently low wind speeds to identify vortex shedding excitation.

Each test run shall be repeated at least 10 times to increase the accuracy of the identification procedure.

The results shall be presented in graphs and as curve fits giving the aerodynamic derivatives as function of non-dimensional wind speed  $V/fB$ .

### 3.3 Aerodynamic admittance

The aerodynamic admittances for lift, drag and twisting moment shall be measured by as the transfer functions between the incoming turbulent wind fluctuations and the resulting load fluctuations on the deck. The measurements shall be carried out by the force balance method and at deck angles of attack of  $\pm 6^\circ$ ,  $\pm 4^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ ,  $0^\circ$  with horizontal.

The tests shall be carried out in turbulent flow only.

The results shall be presented in graphs and as curve fits giving the aerodynamic admittances as function of non-dimensional frequency  $fB/V$ .

The spectral distribution and the root coherence of the along wind and vertical turbulence shall be documented.

Requirements to the measurement of aerodynamic admittances given in ref. 1 can not be honoured by measurements techniques, such as the force balance method commonly employed by wind tunnel laboratories. In order to partially fulfil the SdM requirements it has been agreed to supply simultaneous time histories of fluctuating forces on the deck model and along wind and vertical wind

speeds measured by two fast responding anemometers located one deck width apart in the span wise direction and one half deck width upwind of the model. A minimum of one set of time series must be presented for each angle of attack investigated.

#### 4 Model parameters

The section model representing the in-service condition shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Inertia and frequencies to be modelled for the service condition are as follows:

- Full scale mass  $m = 54.33 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$
- Full scale mass moment of inertia  $I = 26.65 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2/\text{m}$
- Frequency of first asymmetric vertical bending mode  $f_v = 0.0648 \text{ Hz}$
- Frequency of first asymmetric torsion mode  $f_t = 0.0832 \text{ Hz}$
- Frequency of first asymmetric horizontal sway mode  $f_h = 0.055 \text{ Hz}$

Minor adjustments to the above data and corresponding data for the erection condition will be given prior to start of the tests.

#### 5 Data analysis and reporting

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

The report shall be accompanied by high quality video recordings of selected test runs.

Test data shall be provided in digital form upon request.

#### 6 References

- 1 Stretto di Messina. Technical specifications for the final and the executive plan of the bridge. Requirements and guidelines for the development of the project - Aerodynamic Design. Doc. code. F.05.03, 22 Oct. 2004.



## 7 Appendix - Aerodynamic Derivatives

The self excited forces, drag D, lift L and moment M acting on bridge decks are commonly expressed as aerodynamic derivatives  $P^*_{1-6}$ ,  $H^*_{1-6}$ ,  $A^*_{1-6}$  following Scanlan's original definition:

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

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

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

with a vertical axis h, and thus L, positive *downwards*. K is the reduced frequency,  $K = \omega B/V$ .

Reference 1 defines the aerodynamic derivatives  $p^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $a^*_{1-6}$  as follows:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 B \left( -p_1^* \frac{i\omega z}{V} + p_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - p_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + p_3^* \theta - p_5^* \frac{i\omega y}{V} + p_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 B \left( -h_1^* \frac{i\omega z}{V} + h_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - h_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + h_3^* \theta - h_5^* \frac{i\omega y}{V} + h_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 B^2 \left( -a_1^* \frac{i\omega z}{V} + a_4^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{z}{B} - a_2^* \frac{i\omega B\theta}{V} + a_3^* \theta - a_5^* \frac{i\omega y}{V} + a_6^* \frac{\pi}{2V^{*2}} \frac{y}{B} \right)$$

Assuming harmonic motion  $h = h_0 e^{i\omega t}$   $y = y_0 e^{i\omega t}$   $\theta = \theta_0 e^{i\omega t}$  and inserting  $h = -z$  into the Scanlan expressions yields the following relationships between the SdM form ( $p^*_{1-6}$ ,  $h^*_{1-6}$ ,  $a^*_{1-6}$ ) and Scanlan form ( $P^*_{1-6}$ ,  $H^*_{1-6}$ ,  $A^*_{1-6}$ ) of aerodynamic derivatives:

|                                                 |                                                 |                                                                  |                                            |                                                 |                                            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $P_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_5^*$ | $P_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_2^*$ | $P_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 p_3^*$  | $P_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_6^*$  | $P_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} p_1^*$  | $P_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} p_4^*$ |
| $H_1^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_1^*$ | $H_2^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_2^*$  | $H_3^* = -\frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 h_3^*$ | $H_4^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_4^*$  | $H_5^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} h_5^*$  | $H_6^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} h_6^*$ |
| $A_1^* = \frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_1^*$  | $A_2^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_2^*$ | $A_3^* = \frac{1}{2} \left( \frac{V}{\omega B} \right)^2 a_3^*$  | $A_4^* = -\frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_4^*$ | $A_5^* = -\frac{1}{2} \frac{V}{\omega B} a_5^*$ | $A_6^* = \frac{1}{2} \frac{\pi}{2} a_6^*$  |

*Relation between aerodynamic derivatives following Scanlan's original definition and the definition preferred by Stretto di Messina.*

It is noted that in later work Scanlan changed the definition of the aerodynamic derivatives in accordance with the following definition which yields a factor of 2 between the original and the new definition of the aerodynamic derivatives.

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

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

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

**Memo**

**Title** Wind tunnel tests, Sub-test D7, Scope of work  
**Date** 12 August 2010  
**To** Eurolink, EYA  
**Copy** SAMI  
**From** ALN

**COWI A/S**

Parallevej 2  
DK-2800 Kongens Lyngby  
Denmark

Tel +45 45 97 22 11  
Fax +45 45 97 22 12  
www.cowi.com

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for 1:65 scale section model tests sub-test D7 (deck), following directions given by Stretto di Messina.

The objective of these tests is to verify the validity of the vortex shedding excitation performance of the deck using a very stiff model.

## 2 Requirements to testing

The tests shall be carried out as a conventional deck section model test covering:

- Steady state wind load coefficients, force balance
- Vortex shedding excitation, stiff springs

The pressure loss coefficient for the permanent external wind screens must be experimentally verified to be 2.7 with a 5% error margin.

The tests are to be carried out in smooth flow.

The spring suspension system for the vortex shedding tests must be designed in such a way that the model wind speed in the tunnel must be above 2 m/s at a non-dimensional wind speed  $V/fB = 0.5$  where  $f$  is model bending frequency and  $B$  is over all deck width = 60.4 m.

The model mechanical damping shall be less than 0.5% rel.-to-crit.

A model scale of 1:65 is selected to match existing model suspension rigs and the over all dimensions of the wind tunnel.

The model must be built in such a way that the lowest natural frequency in vertical bending of the model is above 10 Hz.

### 3 Configurations to be tested

The general lay out of the bridge deck section to be tested is given in the enclosed drawings 100 - 104. The configuration of screens constitutes external wind screens of 55% void with airfoil dampers, internal safety screens of 55% void attached to the roadway crash barriers and solid railway screens attached to the handrails of the railway inspection walkway. This screen configuration is referred to as C5.

Three different geometries of the railway girder shall be investigated having different width of the horizontal bottom plate and thus inclinations of the lower inclined side panels.

For the C5/28 configuration the angle between the inclined lower side panels and horizontal is approximately 28 deg.

For the C5/45 configuration the angle between the inclined lower side panels and horizontal is approximately 45 deg.

For the C5/63 configuration the angle between the inclined lower side panels and horizontal is approximately 63 deg.

The different railway girder configurations are shown in the enclosed drawings.

### 4 Test programme

The sub-test 7 programme shall include the elements outlined in the following sections.

#### 4.1 Verification of pressure loss coefficient, wind screens

It must be verified that the perforated plates used for modelling of the 55% void screens displays a pressure loss coefficient of 2.7

#### 4.2 Steady state wind load coefficients

Steady state wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  yielding lift, drag and overturning moment are to be measured in smooth flow for the C5/63 configuration at inflow angles of - 10 deg. to , + 10 deg. at increments of 1 deg.

The results shall be given in diagrams displaying the wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  as function of inflow.

#### 4.3 Vortex shedding excitation

Vortex shedding excitation, is expected to occur in the non-dimensional wind speed range  $0.5 < V/fB < 2.0$  where  $V$  is wind speed,  $f$  is deck bending frequency in vertical motion and  $B$  is the over all deck width of 60.4 m.

The wind speed range and bending and/or torsion rms response amplitudes due to vortex shedding excitation shall be measured in smooth flow at 0 deg. of inflow angle with horizontal.

The measurements shall be made for configurations C5/28, C5/45 and C5/63 by slowly incrementing the wind speed and recording the dynamic response. A minimum of 40 measurement points shall be taken over the wind speed range.

For each configuration the rms amplitudes shall be measured for the inherent damping level of the dynamic rig as well as for three higher damping levels where the highest damping level is chosen such that the vortex response is just eliminated.

The results shall be presented in diagrams giving the dynamic root mean square displacements as function of non-dimensional wind speed with Scruton number as parameter. The Scruton number being defined as:

$$Sc = \frac{\delta m}{\rho B^2}$$

Where  $\delta$  is mechanical damping (logarithmic decrement),  $m$  is deck unit mass or mass moment of inertia,  $\rho$  is air density and  $B$  is deck width.

## 5 Model parameters

The section model shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Preliminary inertia and frequencies to be modelled are as follows:

- Full scale mass  $m = 54.33 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$
- Full scale mass moment of inertia  $I = 26.65 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2/\text{m}$
- First bending frequency  $f_b = 0.0648 \text{ Hz}$
- First torsion mode  $f_t = 0.0832 \text{ Hz}$

## 6 Data analysis and reporting

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

The report shall be accompanied by high quality video recordings of selected test runs.

Test data shall be provided in digital form upon request.

**Memo**

**Title** Eurolink s.c.p.a.  
**Title** Wind tunnel tests, Sub-test D8, Scope of work  
**Date** 28 February 2011  
**To** Eurolink, EYA, LSJ  
**Copy** SAMI  
**From** ALN

**COWI A/S**

Parallelsvej 2  
DK-2800 Kongens Lyngby  
Denmark

Tel +45 45 97 22 11  
Fax +45 45 97 22 12  
www.cowi.com

## 1 Introduction

This memo details the scope of work for 1:65 scale section model tests sub-test D8 (deck), following directions given by Stretto di Messina.

The objective of these tests is to verify by duplication the validity of the vortex shedding excitation performance of the deck using a very stiff model (similar sub-test D7) and in addition investigate the effect of horizontal grids between the railway and roadway girders on the vortex shedding excitation, the aeroelastic stability and the static wind load coefficients.

## 2 Requirements to testing

The tests shall be carried out as a conventional deck section model test covering:

- Steady state wind load coefficients, force balance
- Vortex shedding excitation, stiff springs, at an inflow angle of 0 deg. and for a minimum of 4 damping levels.
- Critical wind speed for onset of flutter instability at inflow angles of -4, -2, 0, + 2, +4 deg. and measurement of the aerodynamic damping at full scale wind speeds of 54 m/s and 75 m/s

The tests shall be carried out for two configurations of the permanent external wind screens both fulfilling the SdM requirement for the pressure loss coefficient of 2.7 with a 5% error margin corresponding to 55% porosity.

The tests are to be carried out in smooth flow.

The spring suspension system for the vortex shedding tests must be designed in such a way that the model wind speed in the tunnel must be above 2 m/s at a non-dimensional wind speed  $V/fB = 0.5$  where  $f$  is model bending frequency and  $B$  is over all deck width = 60.4 m.

A model scale of 1:65 is selected to match that of the existing section model.

### 3 Configurations to be tested

The general lay out of the bridge deck section to be tested is given in the enclosed drawings 100 - 104. The configuration of screens constitutes external wind screens of 55% perforation with airfoil dampers, internal safety screens of 55% void attached to the roadway crash barriers and solid railway screens attached to the handrails of the railway inspection walkway. This screen configuration is referred to as C5.

Three tests are carried out for the C5/63 configuration. The angle between the inclined lower side panels and horizontal is approximately 63 deg.

The different railway girder configurations are shown in the enclosed drawings.

### 4 Test programme

The sub-test 8 programme shall include the elements outlined in the following sections.

#### 4.1 Verification of pressure loss coefficient, wind screens

It must be verified that the two sets of perforated plates used for modelling of the 55% void screens displays a pressure loss coefficient of 2.7 with a 5% error margin.

#### 4.2 Vortex shedding excitation

Vortex shedding excitation, is expected to occur in the non-dimensional wind speed range  $0.5 < V/fB < 2.0$  where V is wind speed, f is deck bending frequency in vertical motion and B is the over all deck width of 60.4 m.

The wind speed range and bending and/or torsion rms response amplitudes due to vortex shedding excitation shall be measured in smooth flow at 0 deg. of in-flow angle with horizontal.

The measurements shall be made for configuration C5/63 by slowly incrementing the wind speed and recording the dynamic response. A minimum of 40 measurement points shall be taken over the wind speed range.

For each configuration the rms amplitudes shall be measured for the inherent damping level of the dynamic rig as well as for three higher damping levels where the highest damping level is chosen such that the vortex response is just eliminated.

The results shall be presented in diagrams giving the dynamic root mean square displacements as function of non-dimensional wind speed with Scruton number as parameter. The Scruton number being defined as:

$$Sc = \frac{\delta m}{\rho B^2}$$

Where  $\delta$  is mechanical damping (logarithmic decrement),  $m$  is deck unit mass or mass moment of inertia,  $\rho$  is air density and  $B$  is deck width.

#### 4.3 Steady state wind load coefficients

Steady state wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  yielding lift, drag and overturning moment are to be measured in smooth flow for the C5/63 configuration at inflow angles of - 10 deg. to , + 10 deg. at increments of 1 deg.

The results shall be given in diagrams displaying the wind load coefficients  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_M$  as function of inflow.

#### 4.4 Aerodynamic stability

The measurements shall be made for configuration C5/63 by slowly incrementing the wind speed starting at a wind speed below 54 m/s full scale and ending when divergent response is encountered. The aerodynamic damping is recorded at full scale wind speeds of 54 m/s and 75 m/s as is the divergent dynamic response at the instability limit.

The model mechanical damping for the stability tests shall be less than 0.3% rel.-to-crit.

#### 4.5 Overview of tests

The following table gives an overview of tests carried out as part of the sub-test D7 programme and new tests to be carried out during sub-test D8

| Configuration | Static | Vortex | Stability |
|---------------|--------|--------|-----------|
| Screens A     | √      | √      | +         |
| Screens A + H | +      | √      | +         |
| Screens B     | +      | +      | +         |

Outer wind screens A: As tested during sub-tests D7

Horizontal screens H: As tested during sub-tests D7

Outer wind screens B: To be tested during sub-tests D8

√: Tests replicating sub-test D7

+: New tests D8

### 5 Model parameters

The section model shall be built to faithfully replicate the attached drawings.

Preliminary inertia and frequencies to be modelled are as follows:

- Full scale mass  $m = 57.66 \cdot 10^3 \text{ kg/m}$
- Full scale mass moment of inertia  $I = 28.89 \cdot 10^6 \text{ kgm}^2/\text{m}$



- First bending frequency  $f_b = 0.063$  Hz
- First torsion mode  $f_t = 0.080$  Hz

## **6 Data analysis and reporting**

The results of test runs shall be documented in a data report, which shall also documents the particulars of the section model.

The results of the analyses shall be reported with a complete documentation of the applied procedures and observations made in course of the tests.

The report shall be accompanied by high quality video recordings of selected test runs.

Test data shall be provided in digital form upon request.

## **7 Wind Tunnel Crew**

It is a condition that the wind tunnel crew executing the sub-test D8 and analysing the data are different from the crew that executed sub-test D7.