

# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO

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

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

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

<p><i>Unità Funzionale</i>  <i>Tipo di sistema</i>  <i>Raggruppamento di opere/attività</i>  <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>  <i>Titolo del documento</i></p>	<p>OPERA DI ATTRAVERSAMENTO                  STUDI DI BASE                  STUDI AERODINAMICI                  Generale                  Calcoli aerodinamici, cavi</p>	<p><b>PB0039_F0</b></p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------

CODICE	C G 1 0 0 0	P	C L	D	P	S B	S 3	0 0	0 0	0 0	0 0	0 4	F0
--------	-------------	---	-----	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

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



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## INDICE

INDICE.....		3
1 Relazione di sintesi.....		5
2 Sub-test C1.....		5
2.1 Angolo di afflusso .....		10
2.2 Velocità del vento galloping den Hartog .....		11
2.3 Velocità del vento di galloping di interferenza .....		14
2.4 Probabilità dell'evento di galloping di interferenza.....		15
3 Conclusione .....		17
4 Riferimenti.....		19



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 1 Relazione di sintesi

La presente relazione concerne le potenziali instabilità galloping, riscontrate durante i sub-test C1 di galleria del vento.

Sulla base delle prove in galleria del vento e dell'analisi quasi stazionaria si osserva che gli stralli sdoppiati del Ponte sullo Stretto di Messina, sono suscettibili al galloping den Hartog classico in quanto i singoli elementi dei cavi degli stralli sdoppiati sono soggetti a inclinazioni negative da sollevamento con vento orizzontale. Una seconda tipologia di instabilità galloping, galloping di interferenza, è stata riscontrata per il cavo sottovento quando il vento si trova agli angoli retti della linea del ponte. Confrontando le statistiche sul vento disponibili, si presume che le condizioni di innesco del galloping degli stralli si verifichino con occorrenze annuali di ca. lo 0,15% nel caso in cui non vengano adottate delle misure di mitigazione.

La misura di mitigazione privilegiata per le instabilità galloping di interferenza consiste in una piastra perforata inserita nel divario fra i cavi stralli sdoppiati. Tale piastra eviterà l'ingresso del flusso nel divario fra i cavi e dunque eliminerà il meccanismo di interruttore di flusso che genera il galloping den Hartog ed il galloping di interferenza.

## 2 Sub-test C1

Le prove condotte in galleria del vento pressurizzata presso la DLR, Göttingen, Germania [1] hanno dimostrato l'esistenza di un'instabilità galloping di interferenza per un modello di sistema cavi sdoppiati, Figura 1. Si nota che un'instabilità da vibrazione viene riscontrata in corrispondenza

degli angoli di afflusso nel campo compreso tra ca.  $4 \text{ deg} < \alpha < 12 \text{ deg}$  per  $Re = 5,6 \cdot 10^6$

corrispondente alla condizione SILS di  $z =$  livello di 250 m. Per velocità del vento inferiori a 28 m/s

( $Re < 2,4 \cdot 10^6$ ) l'intervallo di afflusso critico viene ridotto a  $8 < \alpha < 12 \text{ deg}$  dove l'inclinazione da

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

sollevamento viene stimata come  $\partial C_{L2}/\partial \alpha = 5,01$ . Accanto al campo di instabilità, l'inclinazione da sollevamento è negativa e indica il galloping den Hartog classico. Nell'angolo di afflusso nel campo  $-2 < \alpha < 4$  deg l'inclinazione da sollevamento viene stimata come  $\partial C_{L2}/\partial \alpha = -2,87$ .

La probabilità di incontrare velocità del vento superiori a 28 m/s è molto bassa secondo i dati sul vento disponibili. Quindi, l'intervallo di afflusso critico considerato in questo caso è di  $8 \text{ deg} < \alpha <$

12.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

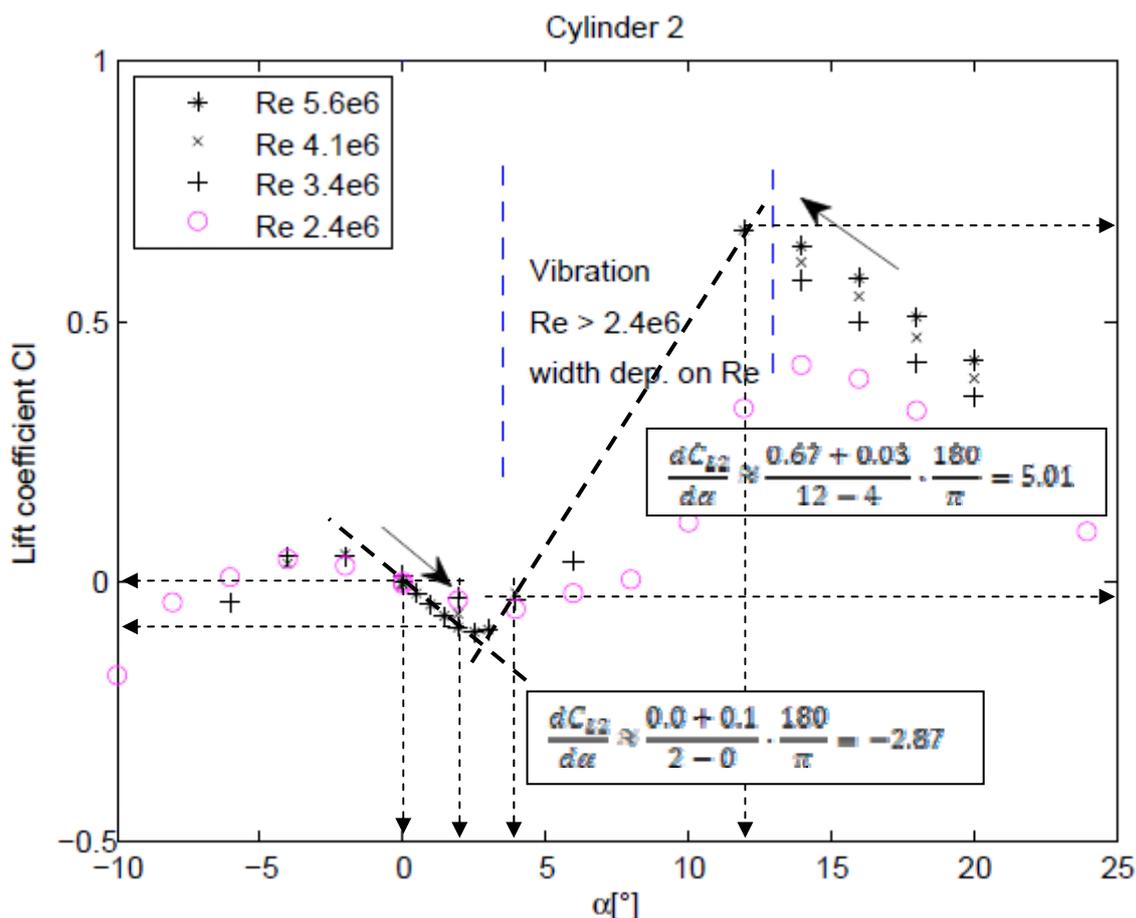


Figura 1 Coefficiente di sollevamento del cilindro sotto vento in funzione dell'angolo di afflusso  $\alpha$ , avendo come parametro il numero di Reynolds e come stima delle inclinazioni da sollevamento  $\partial C_{L2}/\partial \alpha$ . Regolazione di un alto numero di Reynolds.

Le prove in galleria del vento hanno dunque dimostrato un rischio di galloping den Hartog potenziale del cilindro sopravento del modello cavi, Figura 2. Si nota in questo caso che il coefficiente di sollevamento  $C_{L1}$  mostra un'inclinazione negativa nel campo di angoli di afflusso di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

ca.  $-6 < \alpha < 6$  deg per  $Re = 2,4 \cdot 10^6$

L'inclinazione da sollevamento del cilindro sopravento attorno ad  $\alpha = 0$  gradi viene stimata come

$\partial C_{L1}/\partial \alpha = -1,7$ . Viene così soddisfatto il criterio di galloping den Hartog:  $\partial C_{L1}/\partial \alpha + C_{D1} = -1,7 + 0,4 =$

$-1,3 < 0$ .

Hartog criterion for galloping is thus fulfilled:  $\partial C_{L1}/\partial \alpha + C_{D1} = -1.7 + 0.4 = -1.3 < 0$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

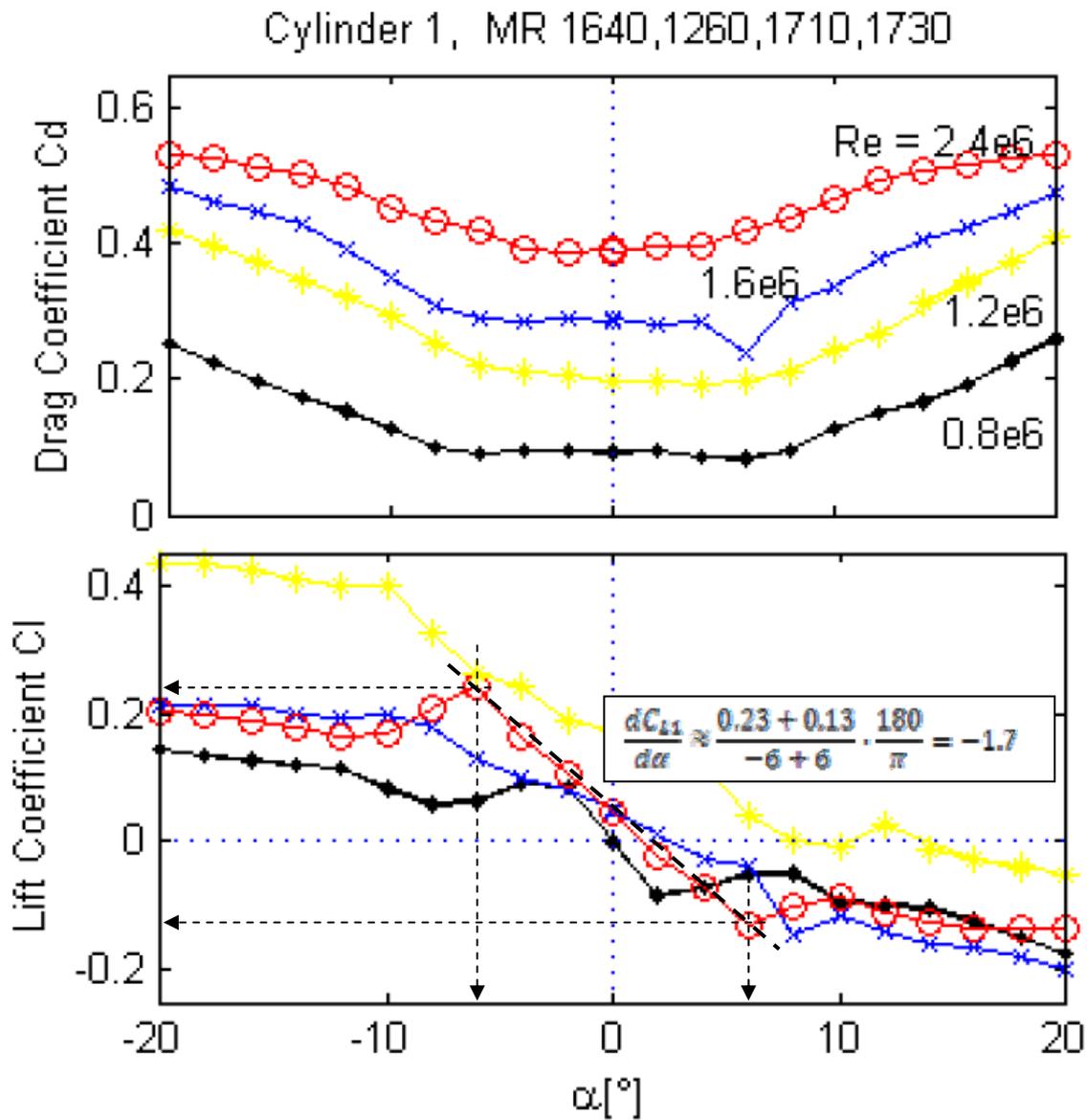


Figura 2 Coefficiente di trascinamento e sollevamento del cilindro sopravento in funzione dell'angolo di afflusso  $\alpha$ , avendo come parametro il numero di Reynolds e come stima dell'inclinazione da sollevamento  $\partial C_{L1} / \partial \alpha$ .

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

## 2.1 Angolo di afflusso

Nella Figura viene illustrata la relazione tra l'angolo di afflusso,  $\beta$ , sul piano orizzontale e l'angolo di afflusso sul piano normale del cavo,  $\alpha$ . L'angolo tra lo strallo ed il piano orizzontale viene indicato con  $\theta$ . Un angolo di afflusso sul piano orizzontale,  $\beta$ , perpendicolare all'allineamento del ponte ( $\beta = 0$ ) porta ad un angolo di afflusso sul piano normale del cavo,  $\alpha$ , uguale a zero. La funzione  $\alpha = f(\beta, \theta)$  viene derivata usando proiezioni del vettore. Utilizzando tale funzione si verifica

in quali angoli,  $\beta$ , l'angolo di afflusso,  $\alpha$ , si troverà nell'intervallo critico  $8 \text{ deg} < \alpha < 12 \text{ deg}$ .

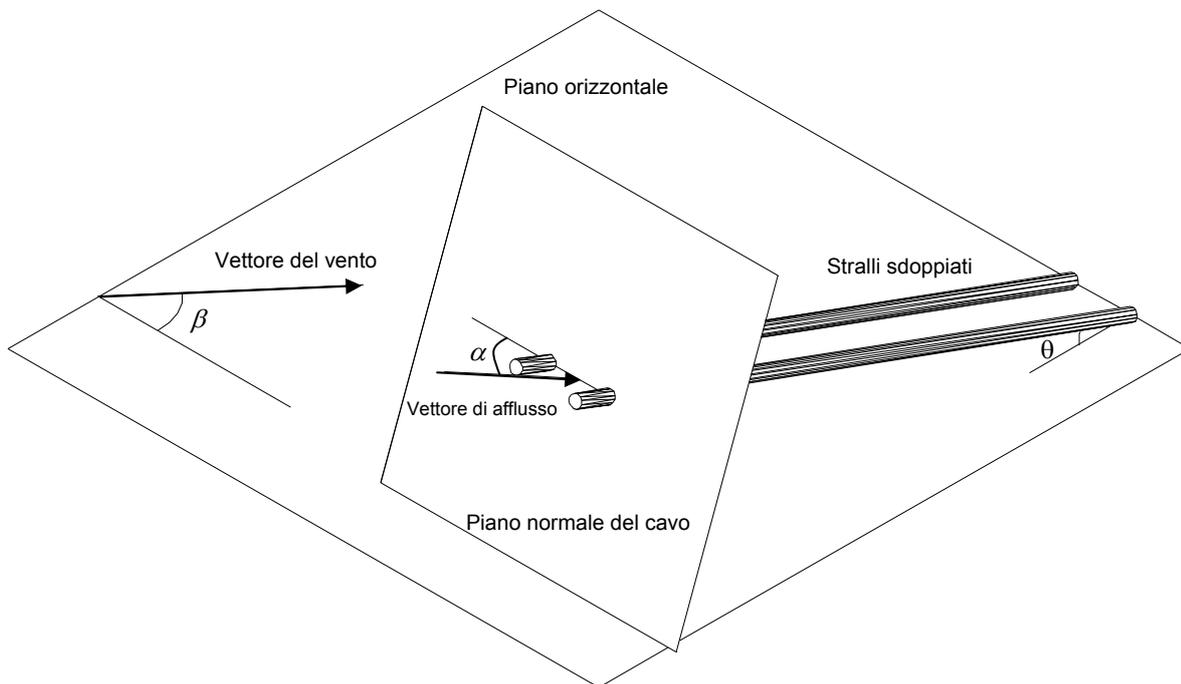


Figura 3 Relazione tra il vento sul piano orizzontale ed il vento sul piano normale del cavo.

In Tabella 1 vengono elencati gli intervalli degli angoli orizzontali (*angoli*  $\beta$ ) che portano ad angoli di afflusso,  $\alpha$ , nell'intervallo critico. Gli intervalli critici  $\beta$  relativamente all'allineamento del ponte sono illustrati in Figura 4.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

Tabella 1 Intervalli del vento critici sul piano orizzontale (angoli  $\beta$ ). Gli intervalli da 1 a 4 sono associati al galloping di interferenza del cavo sottovento, mentre gli intervalli 5 e 6 sono associati al galloping den Hartog classico del cavo sopravvento.

Intervalli	$\beta_{start}$	$\beta_{end}$
1	20	29
2	331	340
3	151	160
4	200	209
5	355	5
6	175	185

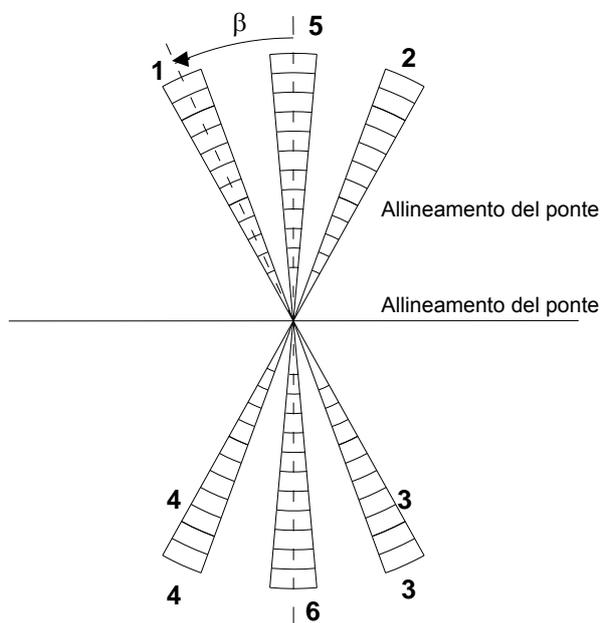


Figura 4 Intervalli di vento critici sul piano orizzontale.

## 2.2 Velocità del vento galloping den Hartog

Il galloping den Hartog è un fenomeno ben noto associato agli autostati della struttura.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

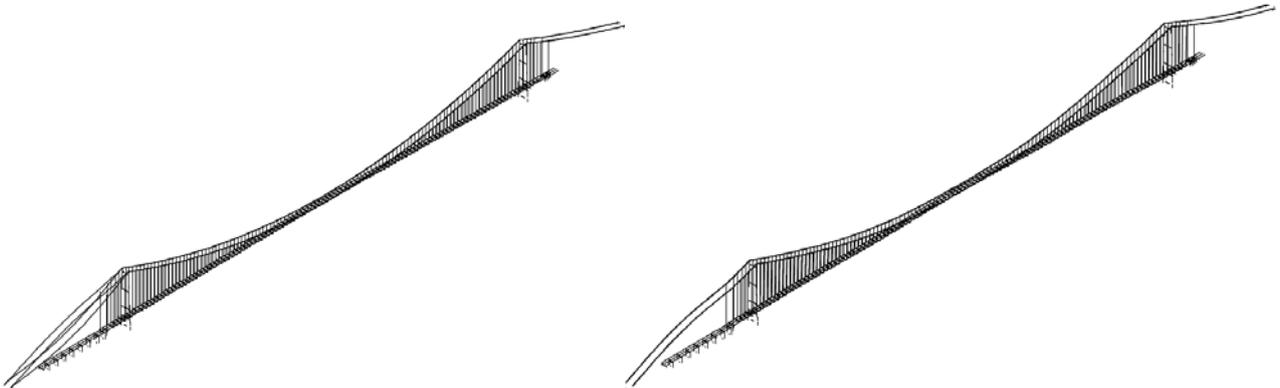


Figura 5 Autostati più bassi che mostrano il movimento degli stralli. A sinistra: torsione o movimento sfasato dei cavi,  $f = 0,166$  Hz. A destra: movimento verticale o in fase dei cavi,  $f = 0,168$  Hz.

La velocità del vento di innesco del galloping den Hartog verticale può essere previsto come [4]:

$$U_{g,dH} = -\frac{4M\delta f}{\rho d} \cdot \frac{1}{\frac{\partial C_{L1}}{\partial \alpha} + C_D}$$

dove  $M$  è la massa sezionale del cavo,  $\delta$  il decremento di smorzamento strutturale,  $\rho$  la densità dell'aria,  $f$  la frequenza di vibrazione del cavo e  $d$  il diametro del cavo. Nel caso degli stralli del ponte di Messina, dove i singoli cavi sono identici e ammorsati ad intervalli di 30 m, l'equazione sopra citata viene riscritta come segue:

$$U_{g,dH} = -\frac{8M\delta f}{\rho d} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\partial C_{L1}}{\partial \alpha} + C_D\right) + \left(\frac{\partial C_{L2}}{\partial \alpha} + C_D\right)}$$

Inserendo i dati strutturali relativi:  $M = 8500$  kg/m,  $\delta = 0,02$ ,  $\rho = 1,25$  kg/m<sup>3</sup>,  $f = 0,168$  Hz,  $d = 1,27$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left; padding: 2px;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 2px;">F0</td> <td style="text-align: center; padding: 2px;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

$m, \partial C_{L1}/\partial\alpha + C_{D1} = -1,3, \partial C_{L2}/\partial\alpha + C_{D2} = -2,8$  si ottiene una velocità del vento di galloping stimata

pari a  $U_{g,dH} = 35$  m/s

Per la torsione od il modo sfasato, la velocità critica del vento per l'innescio del galloping può essere stimata secondo [4] come:

$$U_{g,dH} = -\frac{4I\delta f}{\rho d^3 R} \cdot \frac{1}{\frac{\partial C_M}{\partial \alpha}}$$

dove le nuove variabili sono: I momento di inerzia della massa / unità di lunghezza, R raggio caratteristico che definisce la velocità relativa e  $dC_M/d\alpha$  inclinazione del momento. Assumendo  $I =$

$2 \cdot M \cdot (a/2)^2$  dove a è la distanza interasse dei cavi,  $R = a/2$  e  $dC_M/d\alpha = dC_{L1}/d\alpha \cdot a/2d + dC_{L2}/d\alpha \cdot a/2d$

l'equazione sopra riportata può essere riscritta come segue:

$$U_{g,dH} = -\frac{8M\delta f}{\rho d} \cdot \frac{1}{\frac{\partial C_{L1}}{\partial \alpha} + \frac{\partial C_{L2}}{\partial \alpha}}$$

Inserendo i relativi dati strutturali di velocità del vento di galloping compresi nel campo  $-6 < \alpha < 6$

deg. si ottiene una velocità del vento di galloping torsionale critica di ca.  $U_{g,dH} = 30$  m/s dovuta a torsione del gruppo cavi sdoppiati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 2.3 Velocità del vento di galloping di interferenza

Rusheweyh [2] ha studiato il fenomeno del galloping di interferenza di cilindri elastici a distanza ravvicinata ed ha sviluppato un'espressione relativa alla velocità del vento critica o di innesco  $U_g$  per l'innesco del fenomeno:

$$U_{g,in} = \sqrt{\frac{2M\delta}{\rho d^2} 2fd} \sqrt{\frac{-\pi \frac{a}{d}}{\frac{dC_{L2}}{d\alpha} \sin(\varphi)}}$$

Tutte le grandezze dell'equazione succitata si riferiscono ad un cilindro sottovento dove  $d$  è il diametro del cilindro,  $a$  la distanza dal centro del cilindro sopravvento al cilindro sottovento,  $M$  è la

massa / unità di lunghezza,  $\delta$  lo smorzamento strutturale log-dec.,  $f$  la frequenza propria,  $dC_{L2}/d\alpha$

l'inclinazione da sollevamento e  $\varphi$  l'angolo di fase tra il movimento del cilindro e la forza di eccitazione. Si nota che  $\varphi$  deve assumere valori negativi affinché la forzante aerodinamica comandi il movimento.

L'inclinazione da sollevamento del cavo sottovento viene stimata come  $dC_{L2}/d\alpha = 5,01$  in Figura 1.

Il resto dei dati di input necessari per una valutazione della velocità del vento di innesco del galloping di interferenza della campata laterale Sicilia è uguale a prima:  $M = 8500 \text{ kg/m}$ ,  $\delta = 0,02$ ,  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $f = 0,166 \text{ Hz}$ ,  $a = 2,0 \text{ m}$ ,  $d = 1,27 \text{ m}$ ,  $\varphi = [-2 \text{ deg}; -90 \text{ deg}]$

Il risultato della valutazione viene riportato in Figura 6 sotto forma di velocità del vento di innesco del galloping in funzione dell'angolo di fase. Da notare che la velocità del vento di galloping varia nel campo compreso tra 20 m/s e 4 m/s dipendentemente dall'angolo di fase. E' probabile che il movimento stia solo ritardando di poco la forza di eccitazione e che quindi la velocità del vento di innesco del galloping sia superiore a 20 m/s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
Calcoli aerodinamici, cavi		<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

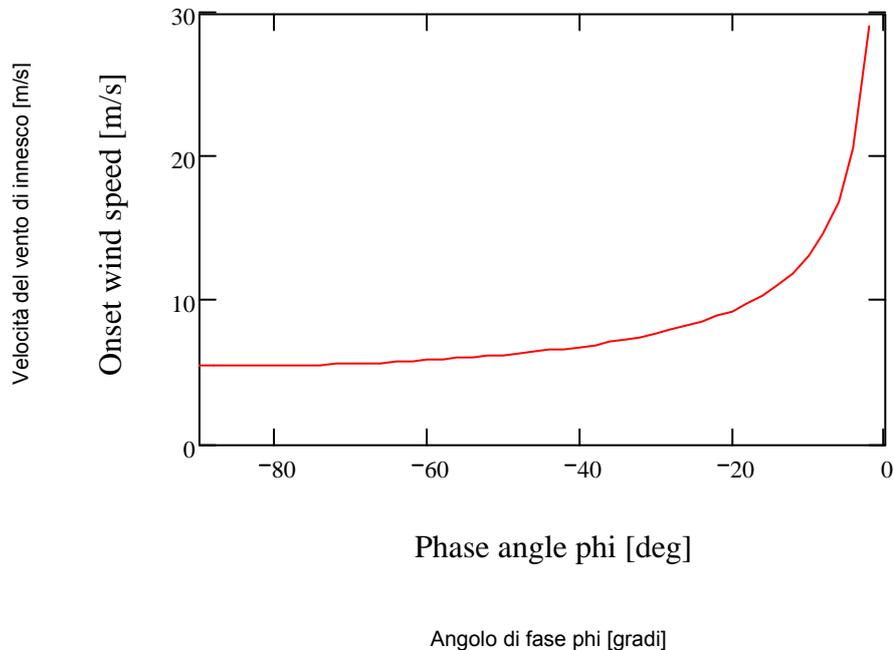


Figura 6 Velocità del vento di innesco del galloping  $U_{g-in}$  in funzione dell'angolo di fase  $\varphi$ .

Il galloping di interferenza verticale del cavo sottovento non è assolutamente possibile in quanto i singoli cavi sono ammortati ad intervalli di 30 m. Idealmente, si sarebbe dovuto sviluppare il modello di galloping di interferenza per prevedere il galloping torsionale come nel caso del modello den Hartog, ma ciò non è stato possibile a causa delle incertezze intrinseche del modello che non possono essere eliminate a meno che non vengano tarate a fronte di un test aeroelastico in galleria del vento. A tale scopo, si assume che la velocità del vento di galloping del movimento torcente sia identica a quella del movimento verticale.

## 2.4 Probabilità dell'evento di galloping di interferenza

Una rosa dei venti per velocità superiori a 0 m/s per il lato Calabria è indicata in [3] insieme all'allineamento del ponte ed alle direzioni del vento in cui può verificarsi l'instabilità galloping di interferenza.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

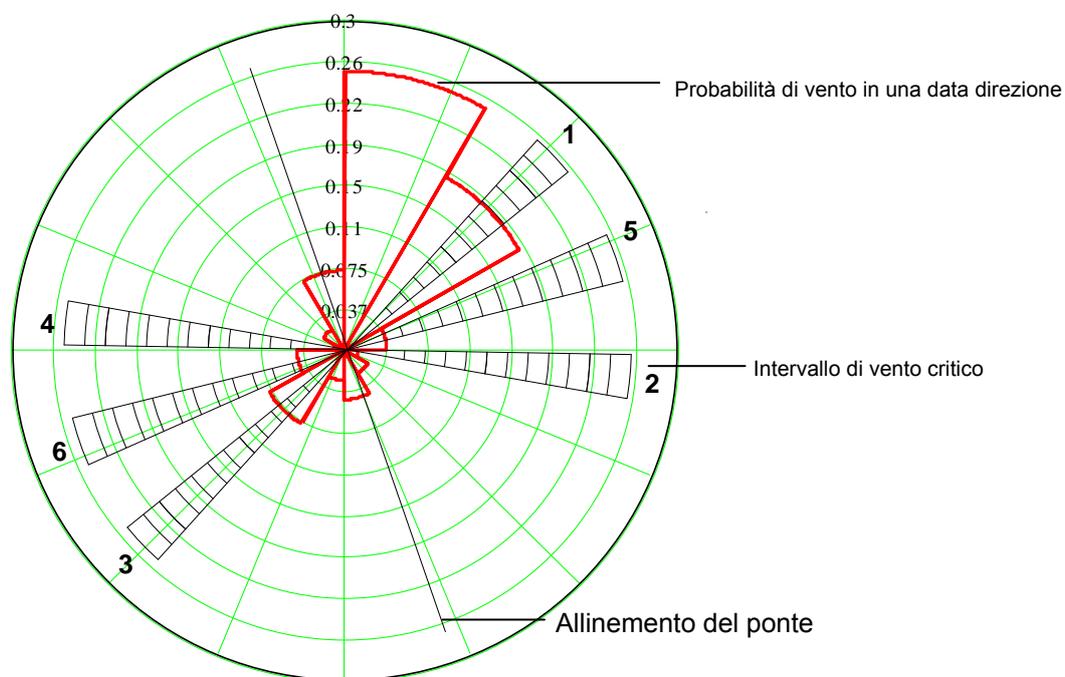


Figura 7 Rosa dei venti per tutte le velocità e gli intervalli in cui può verificarsi il galloping.

Le probabilità di velocità del vento al di sopra di 20 m/s nei quattro intervalli di vento critici sono elencate in Tabella 2. E' da notare che la Tabella 2 contiene probabilità di velocità del vento superiori a 20 m/s, mentre la rosa dei venti in Figura 7 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** illustra le probabilità di tutte le velocità del vento.

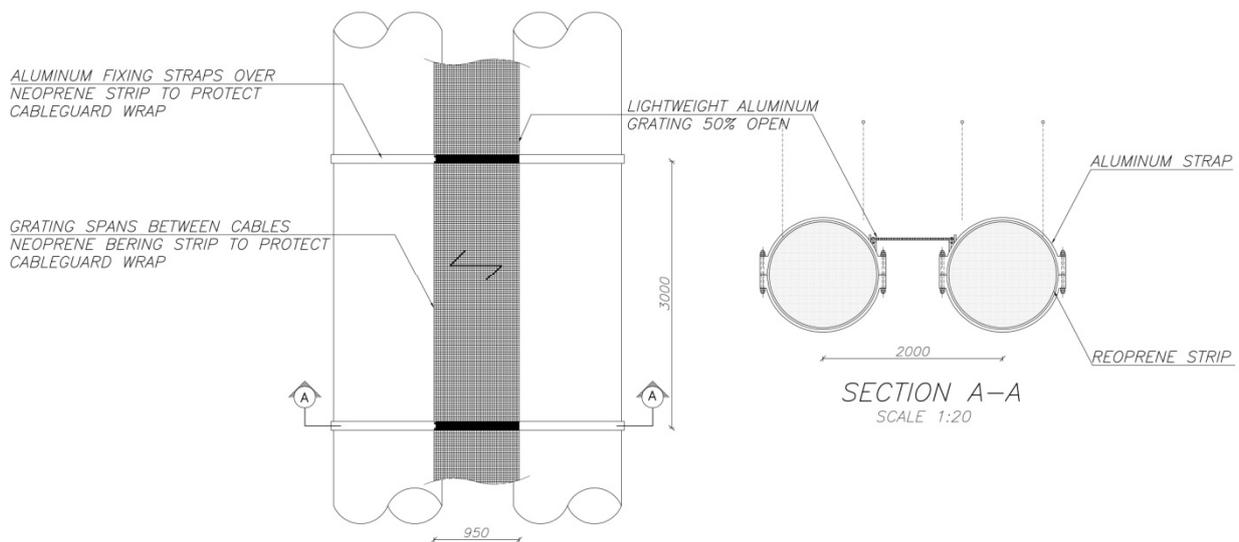
Tabella 2 Probabilità che si verifichi un'instabilità galloping di interferenza (intervallo 1-4) e den Hartog (intervalli 5,6) dei singoli cavi.

Intervallo	Probabilità
1	0.036 %
2	0.014 %
3	0.064 %
4	0.007 %
5	0.005 %
6	0.023 %
<b>Total</b>	<b>0.15 %</b>

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	Codice documento <i>PB0039_F0_ITA.doc</i>	Rev F0	Data 20/06/2011

### 3 Conclusione

La presente analisi ha identificato un piccolo rischio di galloping degli stralli. Il galloping di interferenza e quello di den Hartog sono stati identificati come meccanismi potenziali di instabilità che potrebbero essere soppressi prevenendo il flusso d'aria nell'interstizio tra i cavi mediante l'inserimento di una piastra porosa tra i cavi stessi. La Figura 8 mostra una disposizione pratica possibile di tale piastra. Il peso stimato della griglia in alluminio compresi i fissaggi è di 25 kg/m o 0,1% del peso del cavo principale.



Reggette di fissaggio in alluminio su nastro in neoprene a salvaguardia dell'avvolgimento della protezione cavi

Luci della griglia tra i cavi, nastro portante in neoprene a salvaguardia dell'avvolgimento della protezione cavi

Griglia in alluminio leggera aperta al 50%

Reggetta in alluminio

Nastro in neoprene

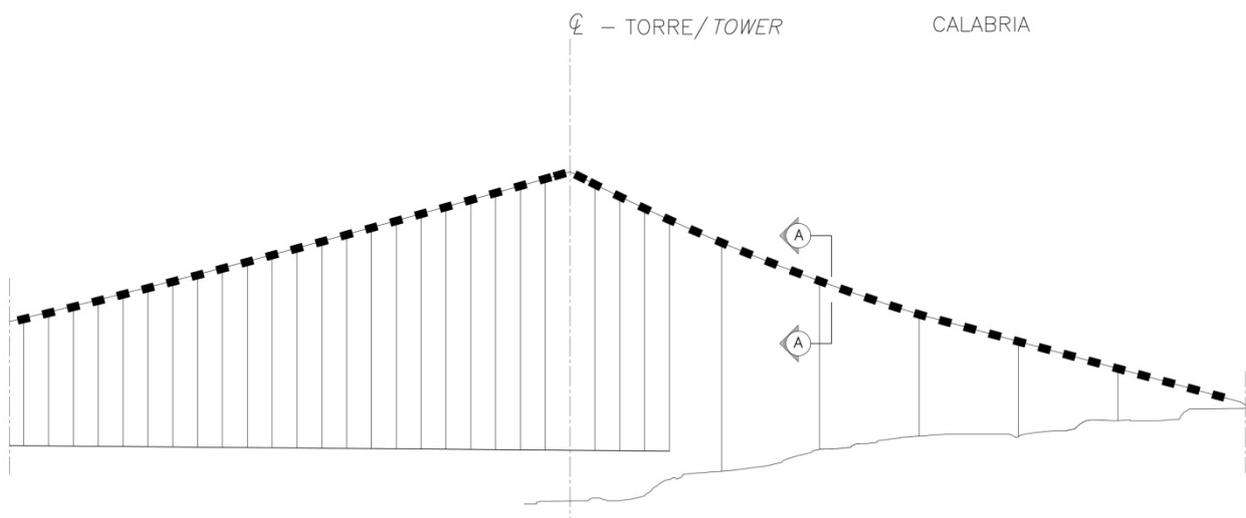
Sezione A-A

**Figura 8** *Rappresentazione della possibile disposizione della griglia tra i cavi principali*

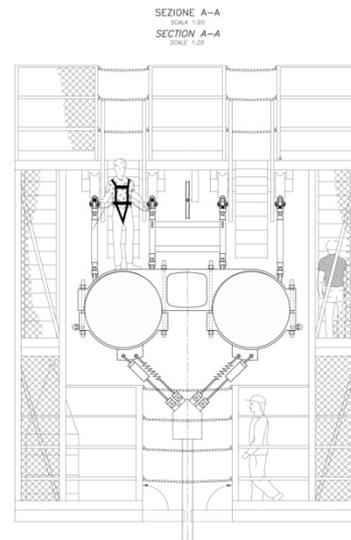
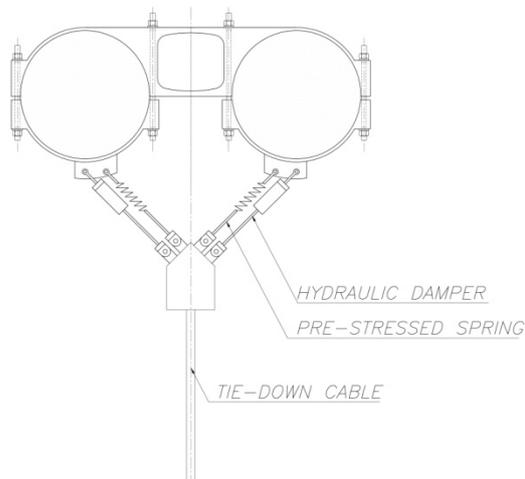
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

In considerazione del fatto che per l'impalcato le velocità del vento galloping stimate sono assai inferiori alla velocità del vento flutter, si consiglia di verificare il fenomeno galloping e la misura di mitigazione proposta in una prova aeroelastica con elevato numero di Reynolds da effettuare prima o durante la fase del Progetto Esecutivo.

Nel caso in cui le prove in galleria del vento proposte dimostrino che il galloping den Hartog o il galloping di interferenza non può essere soppresso con la griglia in alluminio, verrà fatta una controproposta basata sullo smorzamento meccanico come indicato in Figura 9. In questo caso, viene inserito uno smorzatore idraulico in parallelo con una molla meccanica tra i singoli cavi ed il cavo di tie down ancorato alle strutture del viadotto di avvicinamento od al terreno.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
Calcoli aerodinamici, cavi	<i>Codice documento</i> PB0039_F0_ITA.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



smorzatore idraulico  
 molla pre-tensionata  
 cavo di tie-down

*Figura 9 Rappresentazione della possibile disposizione delle molle pre-tensionate e degli smorzatori idraulici che collegano i cavi principali della campata posteriore ai cavi di tie-down verticali*

## 4 Riferimenti

- 1 CG1000-P-RG-D-P-SB-S3-00-00-00-00-03\_A: Prove in Galleria del Vento, Cavi
- 2 Rusheweyh, H.: Dynamische Windwirkung an Bauwerken 2. Bauverlag 1982
- 3 DT.ISP.V.E.R1.001. Revision A. Valutazione del Vento di Progetto. 30 April 2004.
- 4 Blevins, R.D.: Flow-induced Vibrations. Van Nostrand Reinhold, New York, 1997.