



# 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><b>IL PROGETTISTA</b></p>  <p>Dott. Ing. D. Spoglianti          Ordine Ingegneri          Milano          n° 20953          Dott. Ing. E. Pagani          Ordine Ingegneri Milano          n° 15408</p> 	<p><b>IL DIRETTORE GENERALE</b></p> <p>Project Manager          (Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b>          Direttore Generale e          RUP Validazione          (Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b>          Amministratore Delegato          (Dott. P. Ciucci)</p>
---	---	---	--

<p><i>Unità Funzionale</i>  <i>Tipo di sistema</i></p> <p><i>Raggruppamento di opere/attività</i>  <i>Opera - tratto d'opera - parte d'opera</i>  <i>Titolo del documento</i></p>	<p>COLLEGAMENTI VERSANTE CALABRIA          RILIEVI ACCERTAMENTI E INDAGINI IN CAMPO –          INDAGINI AMBIENTALI (STUDI DI SETTORE)          ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE          STUDIO SUL RUMORE          RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN          FASE DI ESERCIZIO</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p><b>AC0081_F0</b></p> </div>
---	---	---

CODICE	C	G	0	7	0	0	A	R	G	D	C	I	7	0	0	R	M	0	0	0	0	0	2	F0
--------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	20/06/2011	EMISSIONE FINALE	A.CALEGARI	M.SALOMONE	D.SPOGLIANTI

Il presente studio è stato redatto da:

Dott. Arch. Anita Calegari

Tecnico Competente in Acustica Ambientale

Legge 447/95 Regione Emilia – Romagna

Provincia di Piacenza D.D. n. 466 del 09/03/2007

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## INDICE

INDICE.....	3
Premessa.....	7
1 Valutazione del vento di riferimento per le analisi aeroacustiche .....	9
1.1 Centraline di misura nell'area di studio.....	9
1.1.1 Descrizione della strumentazione anemometrica .....	11
1.1.2 Altra strumentazione .....	11
1.1.3 Generalità sulle modalità funzionali del sistema .....	14
1.1.4 Ruolo delle postazioni.....	15
1.1.5 Analisi dei dati rilevati .....	16
1.1.6 Velocità del vento .....	17
1.1.7 Direzione del vento .....	23
1.2 Dati da ricostruzione del campo di vento.....	26
1.3 Conclusioni .....	29
2 Analisi di sensibilità delle emissioni acustiche sull'elemento strutturale di riferimento .....	31
2.1 Modello di calcolo fluidodinamico .....	31
2.1.1 Metodi numerici per la soluzione delle equazioni URANS.....	32
2.1.2 Dominio di calcolo.....	34
2.1.3 Condizioni al contorno .....	36
2.1.4 Scelta dei parametri di calcolo .....	36
2.2 Modello di calcolo aeroacustico.....	37
2.2.1 Formulazione di Curle approssimata .....	37
2.2.2 Ffowcs Williams & Hawkings .....	39
2.2.3 Scelta dei parametri di calcolo .....	42
2.2.4 Campo di moto fluidodinamico.....	44
2.3 Emissioni acustiche .....	72
2.3.1.1 Validazione del modello aeroacustico .....	72
2.3.1.2 Sensibilità delle emissioni acustiche al variare della velocità.....	73
2.4 Conclusioni .....	75
3 Analisi fluidodinamica dell'impalcato .....	77
3.1 Impostazione delle simulazioni.....	77
3.1.1 Dominio di calcolo.....	78

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 16/06/2011

3.1.2	Condizioni al contorno .....	80
3.2	Modello di calcolo .....	81
3.3	Risultati delle simulazioni fluidodinamiche .....	81
3.4	Conclusioni .....	102
4	Individuazione degli elementi strutturali potenzialmente rumorosi .....	103
4.1	Elementi Lineari .....	105
4.1.1	Pendini .....	105
4.1.2	Cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria .....	106
4.1.3	Cavo di alimentazione ferroviaria .....	107
4.1.4	Cavo di terra .....	109
4.1.5	Cavo Principale .....	110
4.1.6	Piloni .....	110
4.2	Elementi non lineari .....	111
4.2.1	Barriere frangivento esterne .....	111
4.2.2	Ala di irrigidimento barriere frangivento esterne .....	123
4.3	Conclusioni .....	128
5	Analisi Aeroacustica elementi lineari .....	129
5.1	Pendini .....	129
5.1.1	Sezione F1 .....	130
5.1.2	Sezione F2 .....	136
5.1.3	Sezione F3 .....	141
5.1.4	Sezione F4 .....	146
5.2	Cavo supporto rete alimentazione ferroviaria .....	151
5.3	Cavo alimentazione ferrovia .....	158
5.4	Cavo terra ferrovia .....	165
5.5	Conclusioni .....	172
6	Propagazione acustica mediante ray-tracing .....	173
6.1	Modello di calcolo .....	173
6.1.1	Modello previsionale RAYNOISE .....	173
6.1.1.1	Modellazione della sorgente sonora .....	176
6.1.1.2	Modellazione dei ricettori .....	176
6.1.1.3	Modello della diffrazione .....	177
6.2	Impostazione delle simulazioni e scelta delle condizioni di emissione .....	177

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

6.2.1	Scopo della taratura.....	178
6.2.1.1	Taratura degli elementi verticali .....	179
6.2.1.2	Taratura degli elementi orizzontali .....	189
6.2.2	Implementazione del modello di calcolo .....	193
6.2.3	Scenari di calcolo.....	197
6.3	Risultati delle simulazioni .....	198
7	Soundscape.....	205
7.1	Introduzione.....	205
7.1.1	Tonica .....	206
7.1.2	Segnali.....	206
7.1.3	Impronta sonora.....	206
7.1.4	Suoni archetipi .....	207
7.2	Effetti sonori.....	207
7.2.1	Ubiquità.....	207
7.2.2	Delocalizzazione .....	209
7.2.3	Anamnesi .....	209
7.2.4	Anticipazione .....	210
7.3	Caratteristiche abiotiche del paesaggio sonoro locale .....	210
7.3.1	Il mare .....	210
7.3.2	Il vento .....	211
7.4	“Sound flag” aree di studio .....	212
7.4.1	Versante Calabria (Cannitello).....	214
7.4.2	Versante Sicilia (Ganzirri).....	223
7.5	I suoni dell’opera di attraversamento.....	232
7.6	L’effetto del vento sul livello di rumore di fondo.....	232
8	Risultati.....	235
8.1	Le emissioni aeroacustiche saranno udibili? .....	235
8.2	Quali saranno gli effetti uditivi?.....	238
8.3	I suoni emessi in che rapporto saranno rispetto al paesaggio sonoro locale? .....	238
8.4	I suoni dovuti al vento (impatto acustico diretto) saranno significativi rispetto al campo sonoro generato dall’esercizio autostradale (impatto indotto)? .....	239
9	Conclusioni .....	241
10	Bibliografia .....	243

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b></p>		
<p>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</p>		<p><i>Codice documento</i>          AC0081_F0.doc</p>	<p><i>Rev</i>          F0</p>	<p><i>Data</i>          20/06/2011</p>

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## Premessa

Nell'ambito delle "Specifiche tecniche per il progetto definitivo e il progetto esecutivo delle opere ambientali – Studi e approfondimenti di settore" la Società Stretto di Messina richiede al Contraente Generale la verifica dell'effetto acustico prodotto dal vento sulle strutture minori anche a velocità del vento maggiori di quella considerata (10 m/s) nelle precedenti fasi progettuali.

Il presente studio affronta l'argomento mediante un approccio scientifico basato su metodi analitici e modellizzazione numerica dei fenomeni di emissione aeroacustica derivanti dall'interazione del vento sulle strutture minori del ponte.

Le caratteristiche del vento di riferimento per le analisi aeroacustiche sono state individuate mediante un'analisi dei dati di vento rilevati dal Centro Meteorologico Stretto di Messina Spa (CMSM), dalle precedenti elaborazioni sulla "Valutazione del Vento di Progetto" (documento DT.ISP.V.E.R1.001) e dai dati del modello meteorologico LAMA di fonte pubblica.

Le emissioni dei singoli elementi indagati sono state quindi inserite all'interno di un modello di simulazione complessivo del ponte per calcolare i livelli acustici in corrispondenza delle aree abitate presenti nelle zone di attestamento dell'opera.

I risultati sono stati infine confrontati con i livelli di rumore ad oggi riscontrabili nelle aree di studio e con le immissioni derivanti dalle infrastrutture di trasporto in progetto.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 1 Valutazione del vento di riferimento per le analisi aeroacustiche

Le analisi svolte nelle fasi progettuali precedenti sulle emissioni acustiche derivanti dall'effetto del vento sulle strutture del ponte erano limitate alla velocità di 10 m/s. Di fatto l'ampia base di dati disponibile per l'area oggetto di studio evidenzia che velocità del vento superiori si rilevano correntemente. Nella scelta della velocità del vento da utilizzare per le valutazioni successive si è tenuto conto dei seguenti elementi:

- Le velocità del vento da considerare si devono collocare in un campo di esistenza reale del fenomeno. A differenza delle valutazioni di ordine strutturale o di sicurezza le valutazioni acustiche si riferiscono a condizioni che accadono con una frequenza non trascurabile.
- L'eventuale emissione di rumore deve presentare delle caratteristiche di persistenza su un arco temporale significativo, il cui ordine di grandezza deve essere confrontabile con la durata dei periodi di riferimento diurno/notturno (rispettivamente 16/8 ore) definiti dalla normativa italiana in relazione all'inquinamento acustico. Ne consegue che le velocità del vento considerate devono presentare le stesse caratteristiche di persistenza.

In base a queste considerazioni sono state eseguite analisi dettagliate sulle basi dati meteorologiche disponibili nell'area per individuare i valori utili alle valutazioni sulle emissioni acustiche.

Le basi dati sono sostanzialmente di due tipi:

- dati sperimentali rilevati dalle centraline meteorologiche presenti nell'area.
- risultati di elaborazioni numeriche di ricostruzione del campo di vento.

### 1.1 Centraline di misura nell'area di studio

Le centraline meteorologiche di maggior interesse per l'area dello stretto sono localizzate in corrispondenza del pilone ENEL di Torre Faro in località Ganzirri (lat. 38°15'56" N long. 15°39'04" E). La centralina è di pertinenza del Centro Meteorologico della Società Stretto di Messina S.p.A. ed è in funzione ininterrottamente dal 1985.

La stazione comprende cinque postazioni di misura con anemometri ultrasonici e una con anemometro a coppette e anemoscopio a banderuola, posizionate a diverse altezze sul livello del

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

terreno. Le suddette postazioni sono collocate su due differenti strutture:

- una torre abbattibile a sezione triangolare (h 10 m);
- un pilone dell'ENEL (h 232 m).

In **Figura 1.1** è riportata una vista aerea dell'area di Punta Faro con la localizzazione del pilone ENEL che supporta la strumentazione di misura.

Nella **Figura 1.2** è visibile il fabbricato che ospita il Centro Meteo e nella stessa immagine si distingue la struttura reticolare del pilone ENEL, costituita da 4 pilastri portanti convergenti alla sommità, il particolare della base in calcestruzzo armato a forma di croce greca ed il muro di recinzione che isola la struttura rispetto all'abitato circostante (muro recentemente abbattuto e sostituito da una recinzione in legno ed una duna artificiale). La torre anemometrica, non visibile in questa immagine è posta sulla duna artificiale in prossimità della recinzione a O-SO del pilone.



Figura 1.1 Vista aerea dell'area di Punta Faro

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

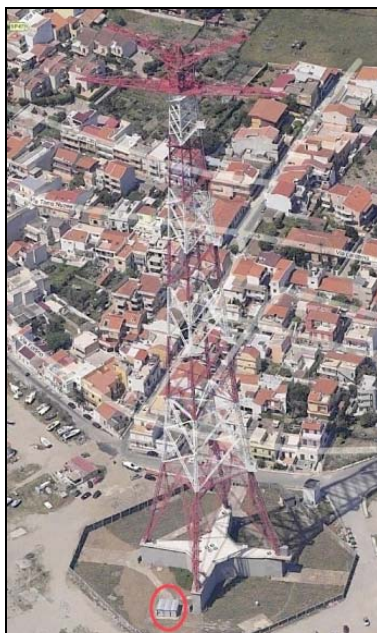


Figura 1.2 Pilone ENEL di supporto dei sensori meteorologici

### 1.1.1 Descrizione della strumentazione anemometrica

L'insieme degli strumenti presenti nella stazione meteo di Torre Faro è costituito dalle seguenti tipologie di anemometri:

- 1 postazione anemometrica tipo “Gill Microvane & 3-Cup Anemometer”, della R.M. Young Company, costituita da un sensore a coppette per la misura dell'intensità del vento e da una banderuola per la misura della direzione di provenienza del vento, in grado di rilevare soltanto la velocità orizzontale del vento (**Figura 1.3 sx**)
- 5 anemometri ultrasonici triassiali modello “Wind Master Pro” della GILL instruments (UK), in grado di misurare indipendentemente le tre componenti (uvz) del vento. (**Figura 1.3 dx**)

### 1.1.2 Altra strumentazione

Per quanto riguarda le misure di tipo climatico la stazione dispone dei seguenti sensori:

- Temperatura e Umidità: 2 postazioni rispettivamente a 117 m slm e 5 m slt
- Radiazione Solare: 1 postazione a 8 m slt

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- Pressione Atmosferica: 1 Postazione 1 m slt
- Quantità di pioggia: 1 Postazione 2 m slt

La **Figura 1.4** mostra la distribuzione degli strumenti rispetto alla torre anemometrica e al pilone ENEL. In particolare, la torre anemometrica ospita 1 postazione anemometrica di tipo Gill Microvane & 3-Cup Anemometer alla quota di 7 metri (anemometro 1150) s.l.t. e una postazione ultrasonica a 10 (anemometro 1170) metri s.l.t.

Il pilone ENEL ospita i restanti 4 anemometri ultrasonici, alle quote di 64 (anemometro 1111), 78 (anemometro 1121), 92 (anemometro 1131) metri e 128 metri s.l.m. (anemometro 1122).

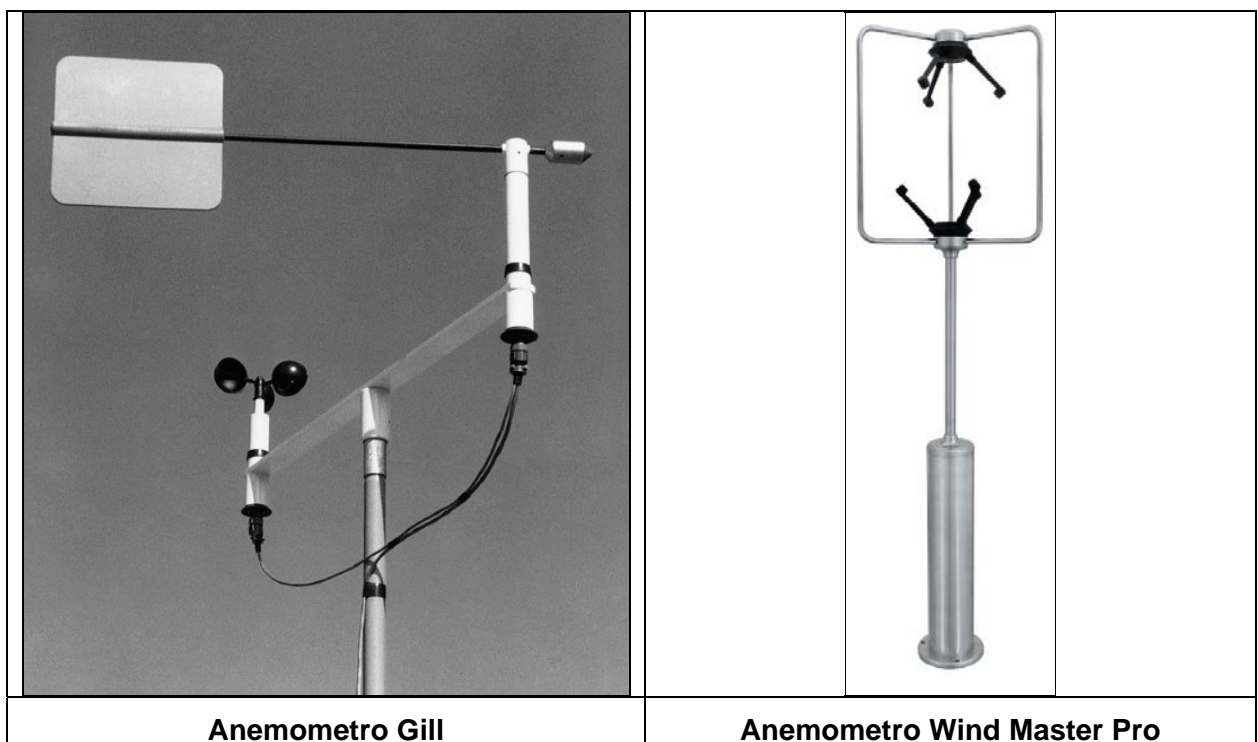


Figura 1.3 Dettaglio dei sensori anemometrici

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

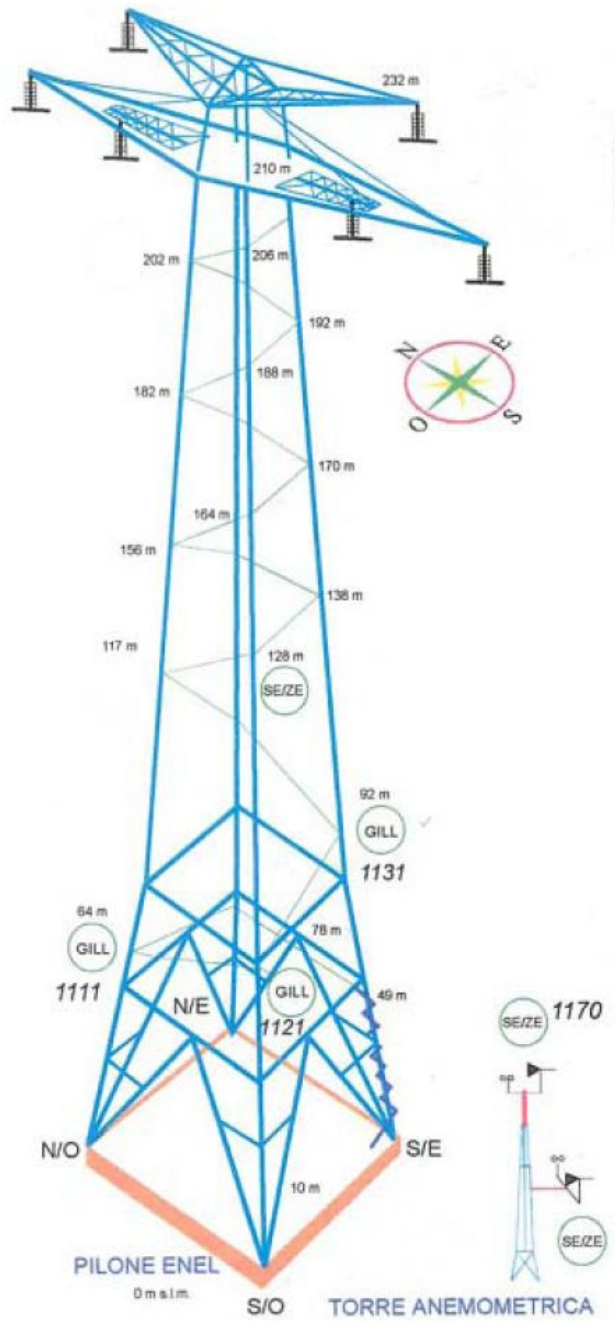


Figura 1.4 – Disposizione dei sensori su pilone ENEL e torre anemometrica

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 1.1.3 Generalità sulle modalità funzionali del sistema

La stazione meteo ha una struttura ad intelligenza distribuita: consta infatti di n. 5 postazioni ognuna delle quali è costituita da un datalogger Campbell Sci. CR1000 e da sensori annessi (**Figura 1.5**). Ogni postazione si occupa dell'acquisizione delle misure accumulandole in un'area di memoria. Tutte le 5 postazioni sono connesse tramite una tratta in fibra ottica ad un'ulteriore unità CR1000 (concentratore) con le seguenti funzioni:

- router (tramite essa è possibile accedere ad ognuna delle postazioni);
- acquisizione di tutte le misure provenienti dalle 5 postazioni;
- memoria ausiliaria per i dati istantanei (unità compact flash);
- generazione record dati.

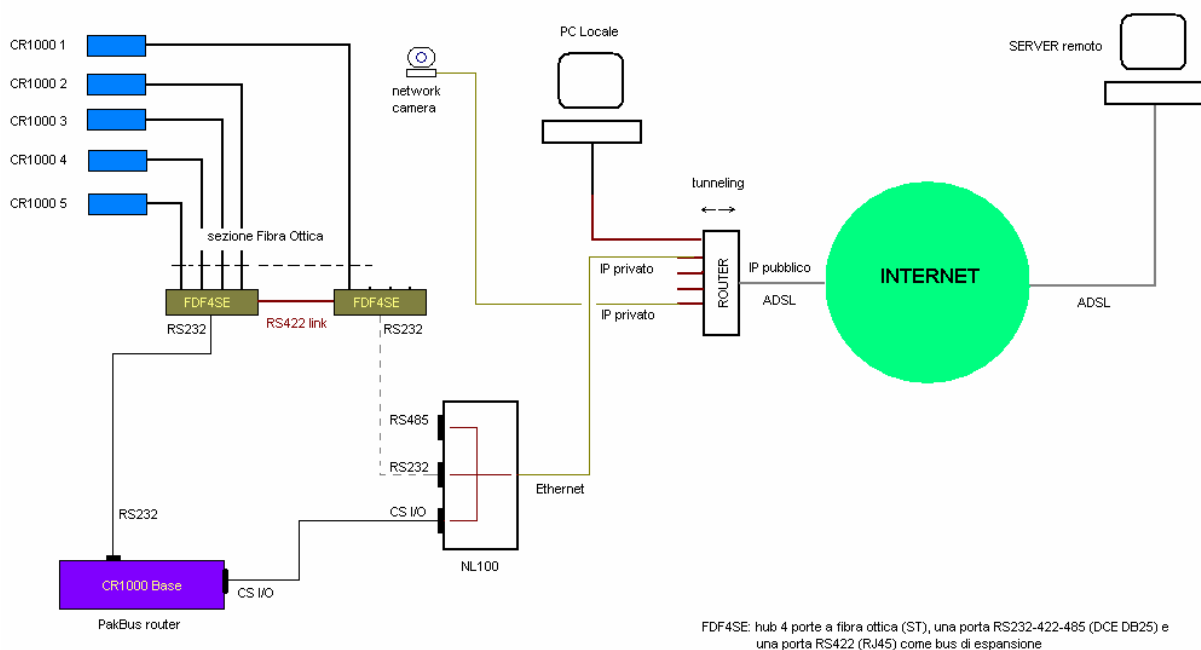


Figura 1.5 Schema di funzionamento del sistema di acquisizione dati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 1.1.4 Ruolo delle postazioni

Le postazioni, indipendentemente dal numero e tipologia dei sensori assegnati, hanno le seguenti funzioni:

- campionamento a 1 Hz via RS232 delle misure climatiche e anemometro Gill (Gli anemometri sonici sono configurati per restituire dati per ogni componente con un campionamento a 20 Hz);
- raccolta dei campioni a 1s in un'area di memoria dedicata per un intero minuto (60s) in attesa che vengano richiesti dal concentratore;
- supervisione del sistema di alimentazione locale.

Il ruolo del buffer è quello di accumulare i dati localmente in modo da compensare eventuali ritardi o blackout nella richiesta delle misure da parte del concentratore: il buffer è dato da record generati ogni 60s contenenti un intero minuto di dati. La supervisione del sistema di alimentazione richiede una breve descrizione.

Sistema di alimentazione della postazione. è costituito da un pannello solare, un regolatore di carica, una batteria tampone, un carica batterie connesso con la rete fissa a 24Vca. La supervisione consiste nel monitoraggio della tensione di batteria. In condizioni di normalità il sistema, per motivi di sicurezza, è sconnesso dalla rete fissa; in questo caso la ricarica della batteria è data dal pannello solare nel ciclo diurno. Se la tensione di batteria è al di sotto di una soglia minima configurabile, allora il supervisore commuta sul carica batterie per un certo tempo  $T_{max}$  configurabile. La commutazione avrà luogo se e solo se c'è presenza della rete fissa. Allo scadere di  $T_{max}$  se la tensione di batteria non ha ripristinato il suo valore nominale o se sopraggiunge una scarica immediata, allora sarà presente una anomalia del sistema di alimentazione.

Tutti gli eventi rilevati dal supervisore del sistema di alimentazione verranno registrati e comunicati al concentratore. Le funzioni assolate dal concentratore sono così riassunte:

- richiesta dei record dati memorizzati dalle postazioni ogni 60 s;
- invio comando di sincronizzazione del timer alle postazioni ogni 6 h;
- generazione dei record dati e registrazione nella memoria non volatile;
- supervisione del sistema di alimentazione locale;

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- memorizzazione su Compact Flash dei dati istantanei.

La richiesta dei record dalle postazioni avviene in modo sequenziale e la sincronizzazione è garantita dal periodico invio di un comando di aggiornamento dell'orologio interno delle postazioni: questo fa sì che gli orologi delle postazioni e del concentratore siano sempre in passo.

L'elaborazione standard dei dati rilevati prevede la memorizzazione di dati medi su base temporale di 10 minuti.

### 1.1.5 Analisi dei dati rilevati

I dati rilevati dal Centro Meteorologico di Stretto di Messina fino al 2002 sono stati oggetto delle analisi riportate nel documento DT.ISP.V.E.R1.001 - "Valutazione del vento di progetto". Le elaborazioni di dettaglio eseguite dal DISEG, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università degli Studi di Genova in collaborazione con il DIFI, Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Genova hanno consentito di definire i parametri utili al dimensionamento del ponte. In particolare i risultati forniti offrono un quadro delle proprietà del vento di progetto sul Ponte sullo Stretto di Messina e gli elementi necessari ad assegnare i profili della velocità media del vento e le proprietà spazio-temporali della turbolenza atmosferica al variare della direzione di provenienza, della probabilità d'occorrenza, del regime di stratificazione termica. Tali analisi hanno peraltro evidenziato alcune lacune nel sistema di acquisizione dati tali da rendere necessaria una fase di validazione dei singoli campioni acquisiti. Alla fine di tale processo i dati utilizzabili sono risultati essere un sottoinsieme significativamente ridotto rispetto alla mole iniziale, ma in ogni caso sufficiente a perseguire gli obiettivi del lavoro.

In seguito a tali considerazioni si è valutato utile nel presente studio puntare l'attenzione sui dati acquisiti dal Centro Meteorologico negli anni successivi allo studio di valutazione del vento di progetto, in particolare sugli anni dal 2006 al 2010, caratterizzati da una maggior continuità di funzionamento di tutti i sensori. Le elaborazioni sono in questo caso finalizzate all'individuazione delle velocità caratteristiche da utilizzare nelle successive analisi aeroacustiche, in particolar modo in corrispondenza degli impalcati stradale e ferroviario, e delle relative direzioni di provenienza. Questi elementi sono infatti deducibili in modo semplificato dalla sola analisi statistica dei dati acquisiti, senza ulteriori elaborazioni modellistiche.

Per tutti i parametri e le considerazioni che necessitano di specifiche simulazioni numeriche in relazione al campo di vento che si realizza nell'area dello stretto di Messina, ed in particolare le



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

caratteristiche dello strato limite terrestre e la distribuzione di velocità verticale e orizzontale, nonché le caratteristiche di turbolenza, si fa comunque riferimento ai risultati delle elaborazioni del modello WINDS utilizzato nello studio dell'Università di Genova.

### 1.1.6 Velocità del vento

Sono stati elaborati tutti i record di dati disponibili nell'arco temporale compreso tra il 19/09/2006 e il 31/05/2010 per i sei anemometri dislocati alle quote di 7, 10, 64, 78, 92 e 128 m s.l.t.

La consistenza del database di campioni da 10' è stata in primo luogo analizzata rispetto alla completezza dei contenuti, intesa come indicatore di affidabilità delle rilevazioni e di copertura rispetto al periodo teorico.

Anno	Dati Attesi	Dati rilevati (n° / percentuale)					
		H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
2006	14888	14702 / 98.75%	14702 / 98.75%	14666 / 98.51%	13572 / 91.16%	14463 / 97.15%	14661 / 98.48%
2007	52560	52363 / 99.63%	49451 / 94.08%	52321 / 99.55%	52517 / 99.92%	49299 / 93.80%	52477 / 99.84%
2008	52704	32012 / 60.74%	32216 / 61.13%	50741 / 96.28%	51208 / 97.16%	51097 / 96.95%	51364 / 97.46%
2009	52560	49418 / 94.02%	33047 / 62.87%	49294 / 93.79%	46754 / 88.95%	49447 / 94.08%	49605 / 94.38%
2010	21744	21508 / 98.91%	21508 / 98.91%	21570 / 99.20%	6830 / 31.41%	21570 / 99.20%	21472 / 98.75%
Tot	194456	170003 / 87.42%	150924 / 77.61%	188592 / 96.98%	170881 / 87.88%	185876 / 95.59%	189579 / 97.49%

Tabella 1.1 Copertura dei dati rilevati dal Centro Meteorologico

La **Tabella 1.1** riporta una sintesi relativa al confronto tra dati attesi e dati acquisiti per ciascun anno e per ciascun sensore. Da sottolineare che il 2006 e il 2010 presentano una quantità di dati attesi inferiore al 50% dell'intero anno per effetto delle date di avvio e di fine dell'acquisizione. Dal punto di vista climatologico, peraltro, i dati rilevati sono rappresentativi di periodi dell'anno quasi complementari e presentano pertanto caratteristiche differenti. Nel complesso l'acquisizione risulta essere piuttosto completa, con coperture che per i sensori a 64, 92 e 128 m di quota presentano oltre il 95% di dati acquisiti.

Nell'ottica di definire un valore di velocità utile al presente studio, e che pertanto può essere definito come la velocità più elevata in grado di determinare un'emissione acustica per un periodo di tempo confrontabile con la durata dei periodi di riferimento diurno o notturno, si è proceduto con una serie di valutazioni successive su aggregazioni differenti dei dati di base.

Per ciascun sensore sono state calcolate le statistiche di superamento dell'intera gamma di valori acquisiti classificati in 100 categorie, giungendo così al calcolo della distribuzione cumulativa e dei corrispondenti valori percentili. Da tali distribuzioni è possibile effettuare una stima sulla probabilità

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

di superamento del percentile corrispondente.

In **Figura 1.6 / Figura 1.11** sono riportate le cumulative per i sei sensori anemometrici. In ciascun grafico sono presenti le curve relative ai 5 anni di dati disponibili. Sono inoltre evidenziati i valori massimi rilevati nell'ambito dei valori medi su 10', riportati in forma numerica in **Tabella 1.2**. Ciascun punto delle curve dà evidenza della frazione di tempo caratterizzata da velocità del vento superiori al corrispondente valore in ordinata. Da sottolineare che il percentile 1 corrisponde a 1/100 dell'intero anno (per gli anni con base dati completa) e cioè circa 3 giorni e mezzo ed è il valore massimo raggiunto dalla curva a tratto continuo.

<b>Max 10'</b>	<b>H=7 m</b>	<b>H=10 m</b>	<b>H=64 m</b>	<b>H=78 m</b>	<b>H=92 m</b>	<b>H=128 m</b>
<b>2006</b>	14.14	15.00	18.10	15.49	17.50	16.52
<b>2007</b>	20.30	20.90	29.29	24.34	27.60	26.48
<b>2008</b>	17.70	21.00	27.18	24.47	25.36	27.42
<b>2009</b>	19.32	23.51	30.01	26.18	27.95	28.74
<b>2010</b>	19.46	24.37	31.66	22.20	29.49	30.01
<b>Max</b>	<b>20.30</b>	<b>24.37</b>	<b>31.66</b>	<b>26.18</b>	<b>29.49</b>	<b>30.01</b>

Tabella 1.2 Valori massimi rilevati (campioni da 10', [m/s])

I dati riportati in **Tabella 1.2** evidenziano un andamento verticale dei valori di velocità rilevati anomalo rispetto a quanto atteso, con valori massimi localizzati alla quota di 64 m e andamento non monotono. Tale comportamento, già evidenziato nel documento di valutazione del vento di progetto, è verosimilmente causato da interazioni locali con le strutture del pilone di sostegno e induce pertanto ad una lettura globale dei dati rilevati piuttosto che ad una valutazione puntuale. Un secondo aspetto da porre in relazione con la persistenza dei fenomeni di interesse per il presente studio è il fatto che il valore di riferimento cercato dovrà essere inferiore ai massimi riportati in tabella, in quanto il singolo campione da 10' non può essere assunto come riferimento. Considerando la quota degli impalcati del ponte, variabile da 58 a 78 m circa s.l.m., e le considerazioni pocanzi esposte, il valore di 30 m/s può essere considerato un limite superiore per il valore finale ricercato.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H = 7m

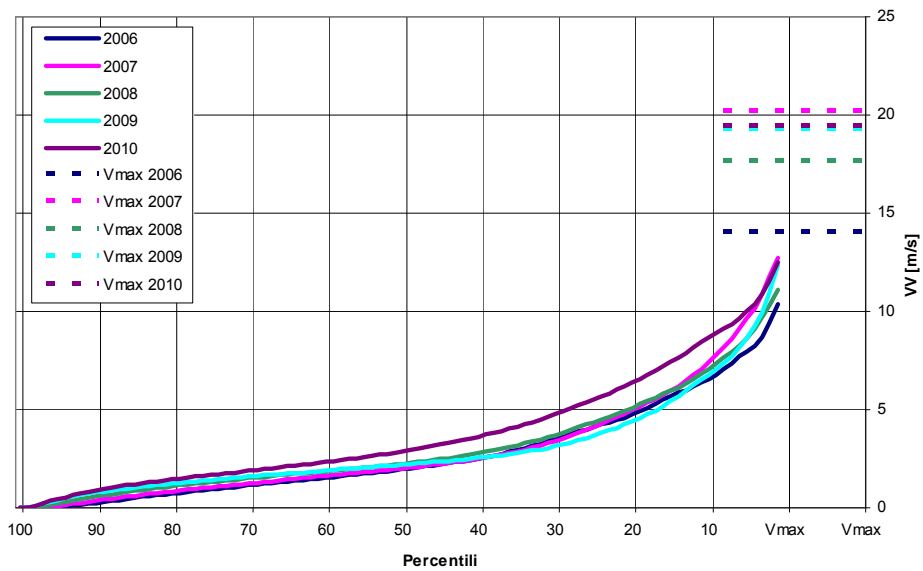


Figura 1.6 Distribuzione cumulativa sensore a 7 m di altezza

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H =10m

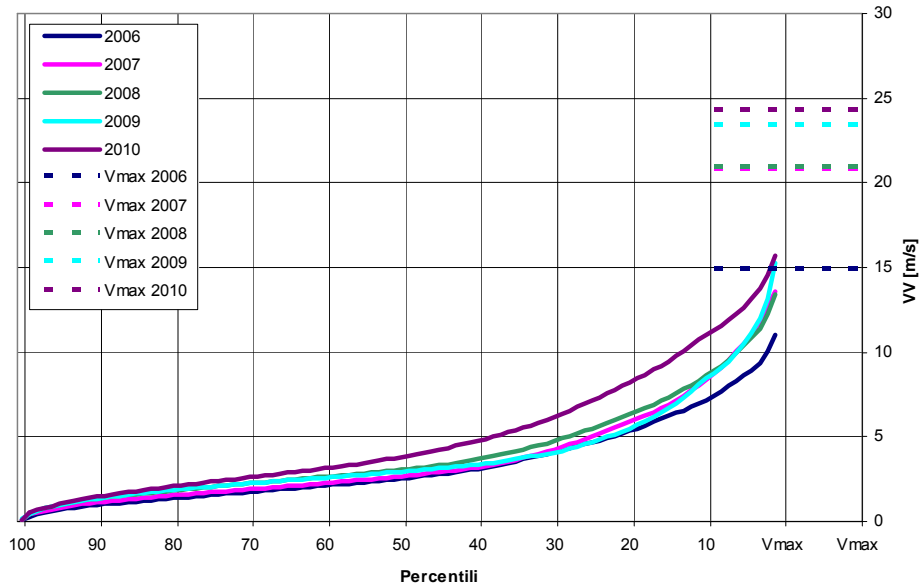


Figura 1.7 Distribuzione cumulativa sensore a 10 m di altezza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H =64m

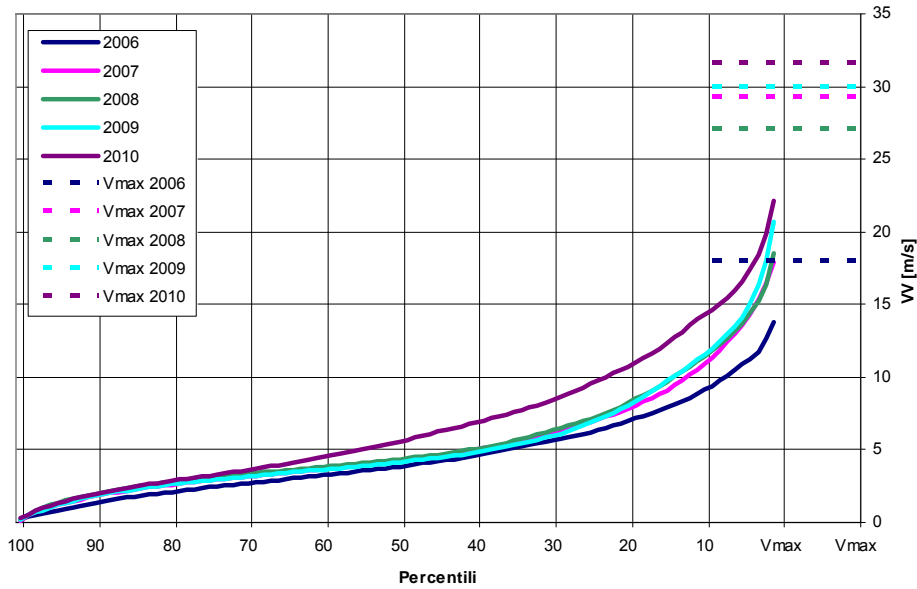


Figura 1.8 Distribuzione cumulativa sensore a 64 m di altezza

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H =78m

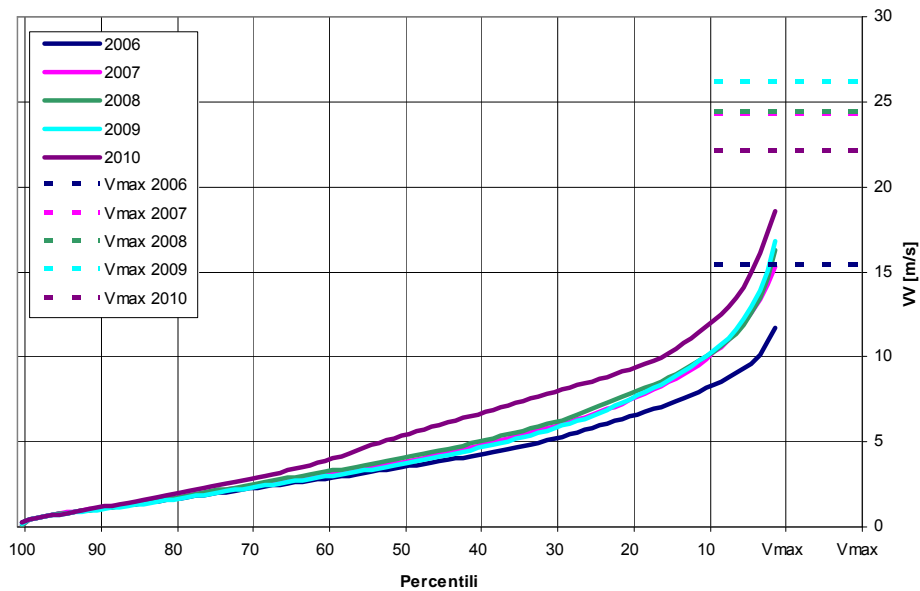


Figura 1.9 Distribuzione cumulativa sensore a 78 m di altezza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H =92m

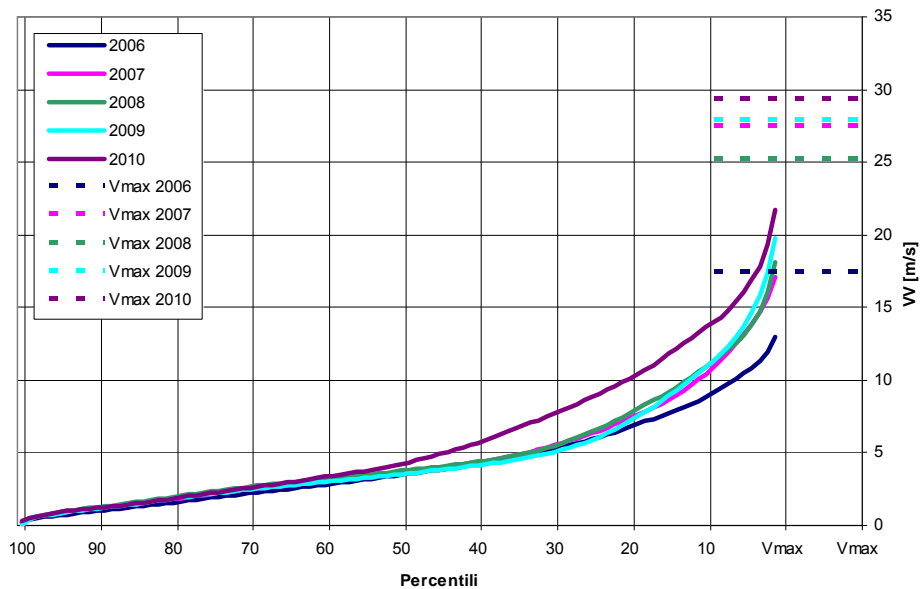


Figura 1.10 Distribuzione cumulativa sensore a 92 m di altezza

Distribuzione cumulativa delle velocità del vento H =128m

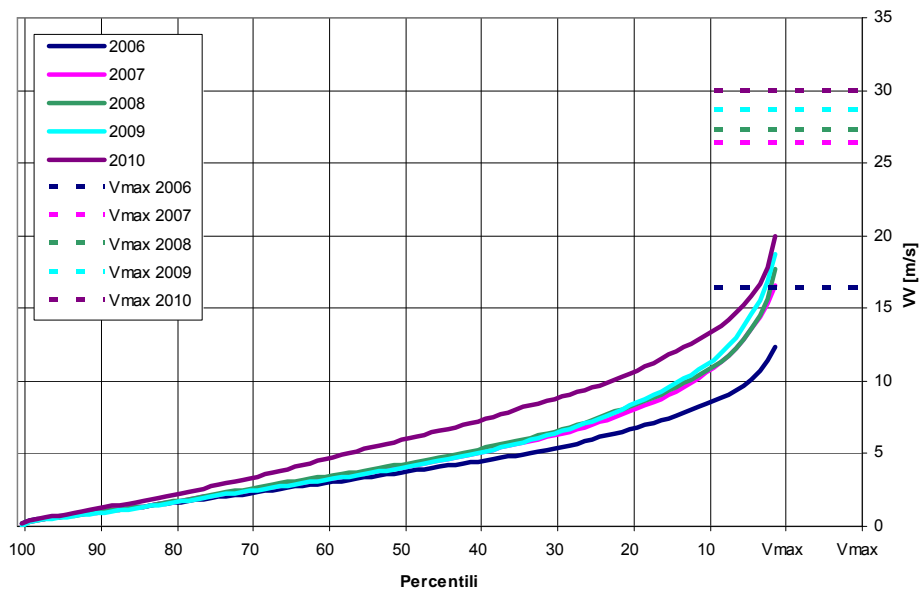


Figura 1.11 Distribuzione cumulativa sensore a 128 m di altezza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Max orario	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
<b>2006</b>	13.77	14.51	17.86	15.20	16.55	15.82
<b>2007</b>	19.53	20.14	28.46	23.59	24.35	25.86
<b>2008</b>	16.82	19.91	25.18	22.87	24.61	24.96
<b>2009</b>	16.20	20.23	27.73	22.37	26.16	24.56
<b>2010</b>	17.79	22.30	28.66	21.10	27.31	27.54
<b>Max</b>	<b>19.53</b>	<b>22.30</b>	<b>28.66</b>	<b>23.59</b>	<b>27.31</b>	<b>27.54</b>

Tabella 1.3 Sintesi valori massimi delle medie orarie

Max media 24H	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
<b>2006</b>	8.98	9.65	11.80	10.17	11.50	10.80
<b>2007</b>	12.87	13.67	18.22	15.24	17.49	16.58
<b>2008</b>	10.59	12.10	19.52	16.12	19.31	17.60
<b>2009</b>	11.99	14.68	20.30	16.38	19.13	17.57
<b>2010</b>	10.65	13.54	18.13	15.06	17.88	16.44
<b>Max</b>	<b>12.87</b>	<b>14.68</b>	<b>20.30</b>	<b>16.38</b>	<b>19.31</b>	<b>17.60</b>

Tabella 1.4 Sintesi valori massimi delle medie di 24 ore

Max media 6-22	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
<b>2006</b>	9.50	10.27	13.01	10.94	12.47	11.37
<b>2007</b>	14.22	15.03	20.15	16.88	19.44	18.40
<b>2008</b>	10.83	12.54	21.26	17.55	21.07	19.16
<b>2009</b>	13.81	15.66	23.47	18.82	22.15	20.21
<b>2010</b>	13.66	17.26	23.20	15.10	22.02	20.66
<b>Max</b>	<b>14.22</b>	<b>17.26</b>	<b>23.47</b>	<b>18.82</b>	<b>22.15</b>	<b>20.66</b>

Tabella 1.5 Sintesi valori massimi delle medie sul periodo diurno 6-22

Max media 22-6	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
<b>2006</b>	8.09	8.76	9.98	9.26	9.97	9.84
<b>2007</b>	12.35	13.19	17.50	14.69	16.08	16.27
<b>2008</b>	10.11	11.75	18.84	15.36	17.91	16.95
<b>2009</b>	13.15	16.33	21.21	15.87	19.61	19.39
<b>2010</b>	10.28	12.99	17.96	14.98	17.64	16.41
<b>Max</b>	<b>13.15</b>	<b>16.33</b>	<b>21.21</b>	<b>15.87</b>	<b>19.61</b>	<b>19.39</b>

Tabella 1.6 Sintesi valori massimi delle medie sul periodo notturno 22-6

Per valutare la persistenza dei fenomeni di maggiore intensità, i dati disponibili sono stati quindi aggregati su periodi di tempo di durata differente. In particolare in **Tabella 1.3** - **Tabella 1.6** sono

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

riportate le sintesi per anno e per sensore dei valori massimi delle medie calcolate su base oraria, su 24 ore, sul periodo di riferimento diurno 6-22 e sul periodo di riferimento notturno 22-6.

Se si esclude il dato a 64 m di quota, che presenta valori sempre anomali rispetto alla progressione in funzione dell'altezza dal suolo, si osserva che i valori mediati sui periodi di tempo più grandi, alle quote prossime a quelle degli impalcati del ponte, presentano valori sempre inferiori a 20 m/s. Tale valore può essere pertanto assunto come limite inferiore per il parametro ricercato. Considerando infine il massimo delle medie orarie, lo stesso parametro può essere approssimato, in via cautelativa con il valore di 25 m/s, che peraltro si colloca nel mezzo del range definito dai valori estremi definiti in precedenza.

### 1.1.7 Direzione del vento

In analogia alle elaborazioni svolte per la velocità del vento, si è proceduto ad un'analisi delle direzioni di provenienza, limitatamente ai fenomeni caratterizzati da intensità significativa.

Considerando l'insieme dei dati rilevati con cadenza di 10' è stato applicato un filtro per estrarre i valori con velocità del vento rilevata a H=10 m superiore a 10 m/s. Le velocità del vento corrispondenti, per tutti i sensori, sono state quindi analizzate in merito alla direzione di provenienza. I risultati delle elaborazioni sono riportati in forma numerica in **Tabella 1.7** e in forma grafica in **Figura 1.12**.

Le analisi sono state eseguite sull'intera sequenza temporale dal 2006 al 2010, in quanto l'applicazione del filtro a 10 m/s comporta una forte riduzione della consistenza dei dati. Peraltro i risultati documentano una connotazione assolutamente chiara che risulta essere caratterizzata da provenienze da SSW largamente dominanti. Quattro anemometri su sei presentano oltre il 50% delle provenienze da tale angolo. Una frazione compresa tra 11.6% e 45.8% riguarda provenienze da S. La direzione SW rappresenta l'1.4-24.5%, mentre le altre direzioni costituiscono nel complesso il 2-3% delle occorrenze.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Dir	Numero di campioni						Frequenza di accadimento					
	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m	H=7 m	H=10 m	H=64 m	H=78 m	H=92 m	H=128 m
<b>N</b>	39	7	7	7	7	7	0.4%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
<b>NNE</b>	24	5	1	1	32	35	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.3%	0.4%
<b>NE</b>	61	75	67	6	51	35	0.6%	0.8%	0.7%	0.1%	0.5%	0.4%
<b>ENE</b>	0	4	16	3	1	14	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.1%
<b>E</b>	5	6	6	3	5	6	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%
<b>ESE</b>	1	0	0	0	0	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>SE</b>	47	45	6	51	5	45	0.5%	0.5%	0.1%	0.7%	0.1%	0.5%
<b>SSE</b>	279	231	168	418	83	364	2.8%	2.3%	1.7%	5.8%	0.8%	3.7%
<b>S</b>	2710	3086	4352	3313	1158	4393	27.2%	30.9%	44.2%	45.8%	11.6%	44.3%
<b>SSW</b>	5950	5719	5011	3203	6060	4705	59.6%	57.3%	50.9%	44.2%	60.8%	47.5%
<b>SW</b>	771	716	135	180	2437	215	7.7%	7.2%	1.4%	2.5%	24.5%	2.2%
<b>WSW</b>	28	24	15	10	46	12	0.3%	0.2%	0.2%	0.1%	0.5%	0.1%
<b>W</b>	58	55	59	35	67	43	0.6%	0.6%	0.6%	0.5%	0.7%	0.4%
<b>WNW</b>	7	7	6	8	7	32	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.3%
<b>NNW</b>	0	0	0	1	0	1	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
<b>N</b>	0	0	0	0	0	0	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabella 1.7 Frequenze di provenienza del vento per VV > 10 m/s



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

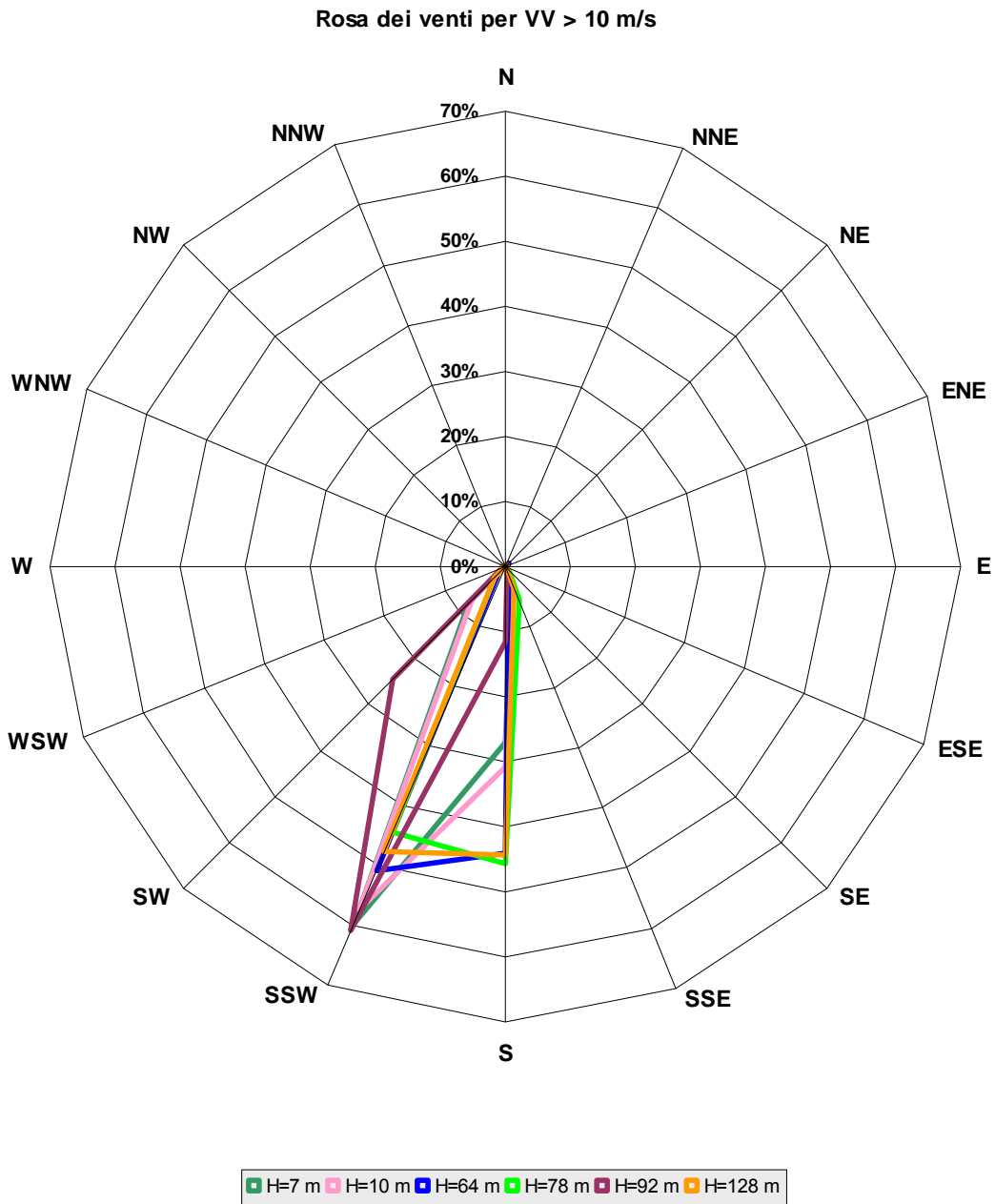


Figura 1.12 Rosa dei venti per velocità del vento a 10 m s.l.t. superiori a 10 m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 1.2 Dati da ricostruzione del campo di vento

Da diversi anni sono disponibili dati di fonte pubblica derivanti da applicazioni dei modelli meteorologici relativi allo stato dei principali parametri termofluidodinamici dell'atmosfera. In particolare il Servizio IdroMeteoClima della Regione Emilia Romagna fornisce su tutto il territorio nazionale i risultati del modello LAMA, prodotto utilizzando il modello meteorologico ad area limitata COSMO (ex Lokal Modell).

Un modello meteorologico è uno strumento che, partendo dallo stato dell'atmosfera in un certo istante, ne descrive l'evoluzione risolvendo numericamente le equazioni fluidodinamiche. In pratica, l'atmosfera o una sua porzione viene suddivisa con una griglia tridimensionale: per ciascuna cella viene stimato il valore medio dei principali parametri atmosferici (temperatura, pressione, vento, umidità e altri) all'istante iniziale, e il modello simula numericamente l'evoluzione di questi parametri.

Uno strumento di questo tipo può essere usato sia per produrre previsioni, sia per ricostruire lo stato dell'atmosfera nel passato (analisi). In questo caso, il modello può tenere conto delle osservazioni disponibili, e sono state sviluppate tecniche specifiche (assimilazione dati) per mantenere piccole le discrepanze tra i valori osservati e quelli simulati. L'insieme di dati così ottenuto rappresenta quindi un compromesso tra la coerenza interna del modello e la rispondenza con le misure.

Il dataset LAMA (Limited Area Meteorological Analysis) è stato prodotto con una tecnica di questo tipo, sfruttando le simulazioni operative del modello meteorologico COSMO e le osservazioni della rete meteorologica internazionale (dati GTS).

Nell'ambito di tale dataset è disponibile un punto localizzato all'incirca nella mezzeria del ponte (Lat 38.243° N, Long. 15.644° E). Le grandezze calcolate dal modello LAMA contengono i valori di velocità e direzione del vento alla quota di 10, 34, 69, 116, 178, 258, 357 e 476 m di altezza s.l.m. per ciascuna ora dell'anno considerato. I risultati delle elaborazioni che seguono si riferiscono all'anno 2009.

In analogia al metodo utilizzato nel paragrafo precedente, i dati sono stati aggregati su durate differenti. I risultati delle elaborazioni sono riportati nella **Tabella 1.8**. Rispetto ai risultati delle rilevazioni sperimentali si evidenziano valori massimi orari significativamente più elevati, fenomeno facilmente riconducibile alle differenti condizioni dello strato limite terrestre che si sviluppano sul mare rispetto alla terraferma in presenza di un'orografia terrestre che comprende rilievi dello stesso ordine di grandezza delle quote di misura. I valori medi risultano invece sostanzialmente

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

allineati con i rilievi sperimentali. Da sottolineare, infine, che, sia il profilo medio che quello massimo orario documentano uno sviluppo verticale coerente con le indicazioni del documento realizzato dall'Università di Genova, dove si riportava un rapporto compreso tra 1.1 e 1.4 tra le velocità a quota impalcato e le velocità alla sommità delle torri in funzione della direzione di provenienza del vento.

Nell'ottica della definizione delle velocità del vento per gli elementi strutturali con sviluppo verticale, si può pertanto ipotizzare di segmentare la distribuzione in due parti, una più bassa, centrata sull'impalcato, con estensione da 0 a 150 m s.l.m., con velocità pari a quanto individuato in corrispondenza dello stesso (25 m/s), e la rimanente parte caratterizzata da una velocità media determinata supponendo una variazione lineare del profilo verticale di velocità, che pertanto assume nel punto di mezzo di tale segmento valori prossimi a 30 m/s.

	H=10m	H=34m	H=69 m	H=116 m	H=178 m	H=258 m	H=357 m	H=476m
<b>Media oraria</b>	3.3	3.73	4.01	4.26	4.49	4.8	5.16	5.63
<b>Max orario</b>	23.6	27.7	30.3	32.7	35.3	38.1	39.9	41.8
<b>Max media 24 ore</b>	14.13	16.09	17.35	18.47	19.53	20.31	20.8	20.56
<b>Max media 6-22</b>	13.21	15.04	16.24	17.34	18.36	19.08	19.45	19.95
<b>Max media 22-6</b>	16.88	19.23	20.68	21.86	23.04	23.95	24.61	24.65

Tabella 1.8 Sintesi dati modello LAMA

In **Figura 1.13** si riporta infine la rosa dei venti calcolata con le stesse modalità dei dati sperimentali. Il grafico conferma la marcata dominanza dei venti dai quadranti meridionali, con una leggera rotazione verso Sud.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Rosa dei venti per VV > 10 m/s

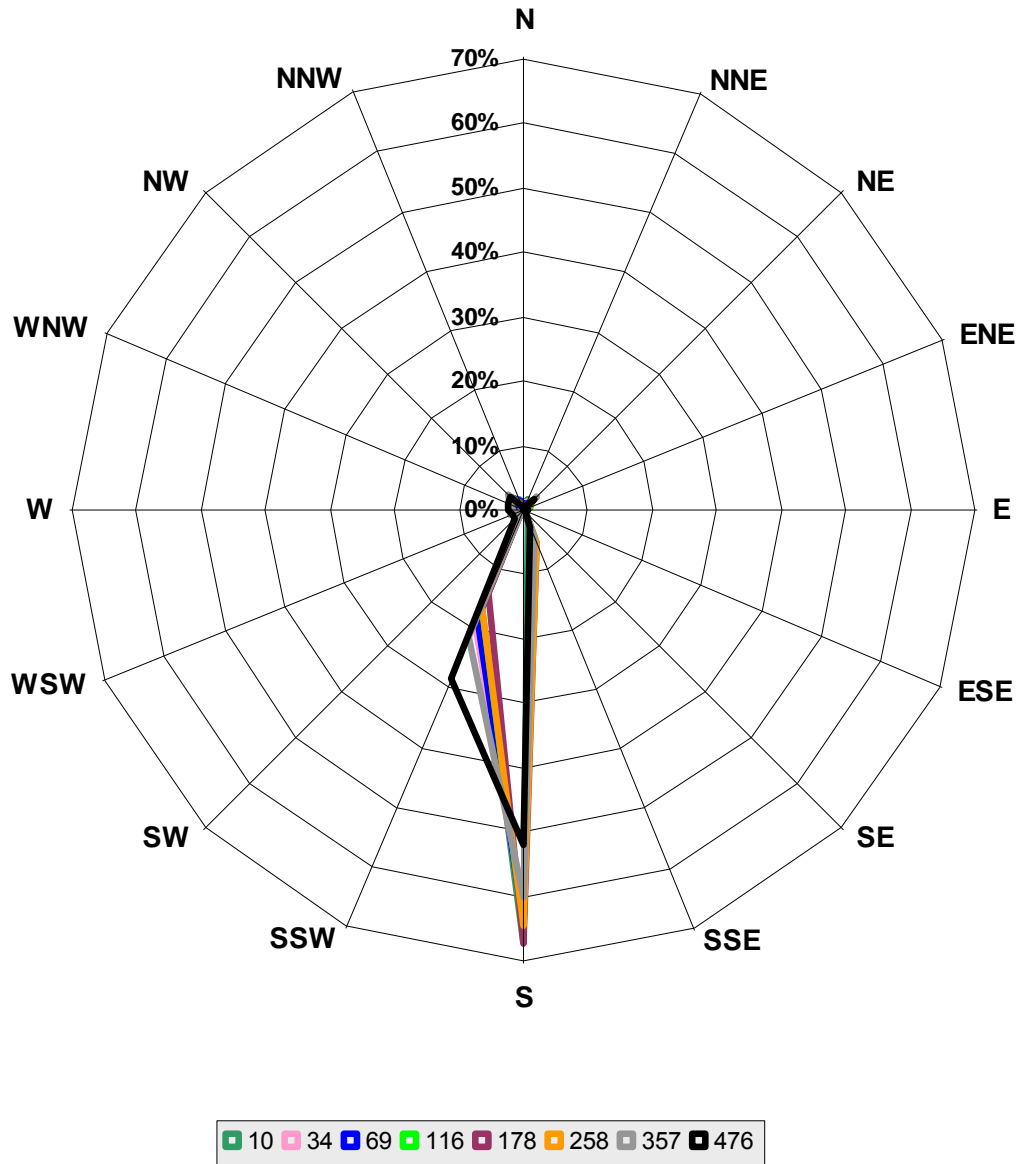


Figura 1.13 Rosa dei venti per velocità del vento a 10 m s.l.t. superiori a 10 m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 1.3 Conclusioni

I dati meteorologici disponibili nell'area dello stretto di Messina sono stati analizzati con l'obiettivo di definire i parametri utili alla valutazione delle possibili emissioni di natura aeroacustica derivanti dalle strutture minori del ponte.

In particolare l'attenzione è stata posta sulle velocità del vento superiori a 10 m/s, con l'obiettivo di definire un valore caratteristico in corrispondenza della quota degli impalcati.

Sulla base delle frequenze di accadimento dei fenomeni anemologici, in relazione allo scopo di individuare il più alto valore che presenta frequenze non trascurabili, sono state effettuate analisi sui dati sperimentali acquisiti dal Centro Meteorologico della Stretto di Messina che hanno consentito di valutare pari a 25 m/s il dato indagato. Tale valore presenta una probabilità di accadimento stimabile in circa un'ora all'anno, ed è pertanto da considerare cautelativo nell'ottica del presente studio.

In merito alla direzione di provenienza i dati evidenziano una netta dominanza dei quadranti meridionali, in particolar modo delle direzioni da SSW per le condizioni di velocità del vento superiori a 10 m/s.

I risultati sono stati confermati dai dati modellistici ricavati dal dataset LAMA fornito dal Servizio IdroMeteoClima della Regione Emilia Romagna, disponibile su tutto il territorio nazionale.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 2 Analisi di sensibilità delle emissioni acustiche sull'elemento strutturale di riferimento

Analizzando gli elementi strutturali oggetto dell'analisi aeroacustica si evince che la geometria della maggior parte di essi (pendini, cavo di alimentazione ferroviaria, etc.) può essere ricondotta ad un elemento di riferimento cilindrico avente diametro  $D$  e lunghezza  $L$ , con  $L \gg D$ . In particolare, si è scelto, come elemento di riferimento, il pendino F1 di lunghezza massima, il quale presenta un diametro  $D = 0.106 \text{ m}$  ed una lunghezza  $L \gg D$ . Su tale elemento è condotta un'analisi acustica di sensibilità al variare della velocità del vento. Obiettivo di questa fase iniziale è valutare il fenomeno aeroacustico per velocità del vento superiori a 10 m/s. A seguito delle analisi condotte in questa fase iniziale, sarà possibile individuare gli elementi lineari potenzialmente sorgenti di rumore. Nei capitoli successivi, su tali elementi verranno effettuate analisi aeroacustiche dettagliate.

L'analisi aeroacustica sull'elemento di riferimento viene condotta attraverso una metodologia *ibrida* che prevede di disaccoppiare il campo fluidodinamico da quello acustico. In prima istanza, si calcola il campo di moto da cui si estraggono le sorgenti acustiche, successivamente si utilizza un metodo basato sull'analogia acustica per la propagazione del rumore.

### 2.1 Modello di calcolo fluidodinamico

Prendendo in esame un cilindro a base circolare di diametro  $D$ , investito da un flusso uniforme con velocità  $U$ , il numero di Reynolds, relativo al diametro, è definito come:

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu}$$

dove  $\nu$  rappresenta la viscosità cinematica del fluido. Al variare di questo parametro il flusso attorno al cilindro assume diverse configurazioni. Nel caso considerato, il numero di Reynolds ha un valore dell'ordine di  $10^5$ . Pertanto, lo strato limite attorno al corpo è turbolento ed è caratterizzato da una separazione a circa  $90^\circ$  rispetto alla corrente indisturbata. Tale fenomeno produce, a valle del cilindro, due flussi di taglio turbolenti che diventano instabili e formano la cosiddetta "scia di von Karman", ossia una scia non stazionaria caratterizzata da un distacco alternato di vortici (*vortex-shedding*) trasportati dal flusso verso valle. Conseguentemente, sul corpo si sviluppano forze di portanza e resistenza che variano nel tempo ad una frequenza proporzionale a

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

quella di distacco dei vortici. Tali fluttuazioni delle forze aerodinamiche sono all'origine di una sorgente acustica dipolare conosciuta come tono eolico. In aggiunta a quest'ultimo è presente anche un rumore *broadband* dovuto alla turbolenza del flusso a valle del cilindro. Tale componente è però trascurabile, sia perché presenta un'intensità di diversi ordini di grandezza inferiore a quella del tono eolico, sia perché un rumore *broadband* risulta meno fastidioso di un rumore tonale. Per questo motivo, si è scelto di simulare il campo fluidodinamico utilizzando un metodo URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes equations) valido per flussi compressibili il quale consente di risolvere sia i moti idrodinamici sia le sorgenti acustiche responsabili della generazione del rumore tonale. Inoltre, considerando le geometrie in oggetto, non è restrittivo ipotizzare che il campo fluidodinamico sia bidimensionale. Il metodo URANS è accoppiato ad un modello di turbolenza " $k - \omega$  SST" [1]. Tale modello di turbolenza è largamente utilizzato in letteratura per flussi in condizioni analoghe, e fornisce risultati accurati nel caso di gradienti di pressione avversi. Per garantire un'accurata risoluzione del punto di separazione la griglia è opportunamente raffinata a parete in modo da avere valori della lunghezza adimensionale  $y^+$  minori dell'unità ed evitare, così, l'utilizzo di "*wall functions*". Tutte le simulazioni fluidodinamiche sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo *OpenFOAM*®.

### 2.1.1 Metodi numerici per la soluzione delle equazioni URANS

*OpenFOAM*® è un codice di calcolo per la risoluzione di sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali, basato sul *Metodo dei Volumi Finiti* (FVM). La gestione delle griglie di calcolo è tale per cui è possibile utilizzare sia griglie strutturate che non strutturate, sfruttando i vantaggi di accuratezza numerica delle prime e di semplicità di utilizzo con geometrie complesse delle seconde. Le variabili di calcolo sono posizionate nella griglia secondo un criterio detto "collocato", ovvero associate tutte al centro-cella di ogni volume di controllo. Il solutore di *OpenFOAM*® che risolve le equazioni URANS (*rhoPisoFoam*) adotta un approccio "segregato", ovvero le singole equazioni che formano il sistema differenziale (pressione, velocità, temperatura, modelli di turbolenza) sono risolte in modo sequenziale. È noto che la risoluzione numerica delle equazioni della fluidodinamica mediante un approccio collocato genera oscillazioni del campo di pressione dovute all'accoppiamento tra questo ed il campo di velocità. Per prevenire questo problema, *rhoPisoFoam* adotta l'algoritmo *PISO* (Pressure Implicit with Splitting of Operators) per l'accoppiamento pressione-velocità [20], descritto schematicamente in Figura 2.1. Gli operatori differenziali sono discretizzati utilizzando schemi numerici *linearUpwind* per i termini convettivi,



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento <i>AC0081_F0.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

lineari per i termini diffusivi, e backward-Euler impliciti per le derivate temporali, in modo da ottenere un'accuratezza numerica del 2° ordine, preservando ciononostante la stabilità della soluzione. I sistemi algebrici derivanti dalla discretizzazione delle equazioni sono stati risolti mediante metodi Algebraic Multi-Grid (AMG) per l'equazione della pressione, e Gradiente Bi-Coniugato Precondizionato (PBCG) per le restanti equazioni. Maggiori dettagli sui modelli e metodi numerici implementati in *OpenFOAM*® sono presenti in [20].

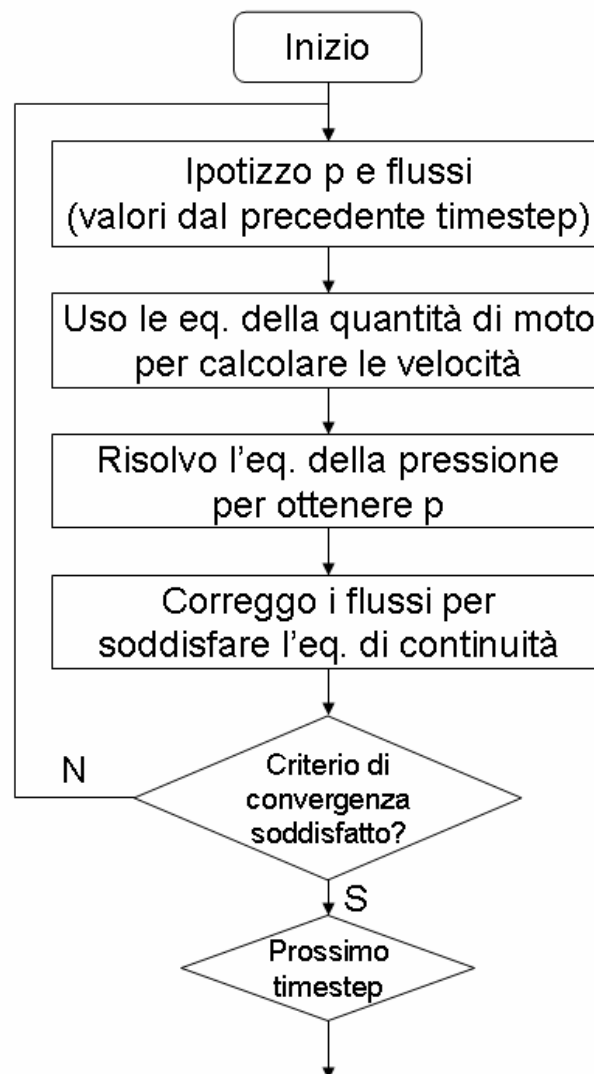


Figura 2.1 Diagramma di flusso dell' algoritmo PISO

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

### 2.1.2 Dominio di calcolo

Dovendo simulare il flusso attorno ad un cilindro di diametro  $D$ , si è scelto di considerare un dominio di calcolo avente la forma e le dimensioni riportate in Figura 2.2. La discretizzazione è fatta usando una griglia di calcolo strutturata (Figura 2.3) formata da circa 80000 elementi quadrangolari e raffinata a parete in modo da garantire una  $y^+$  minore dell'unità su tutto il cilindro.

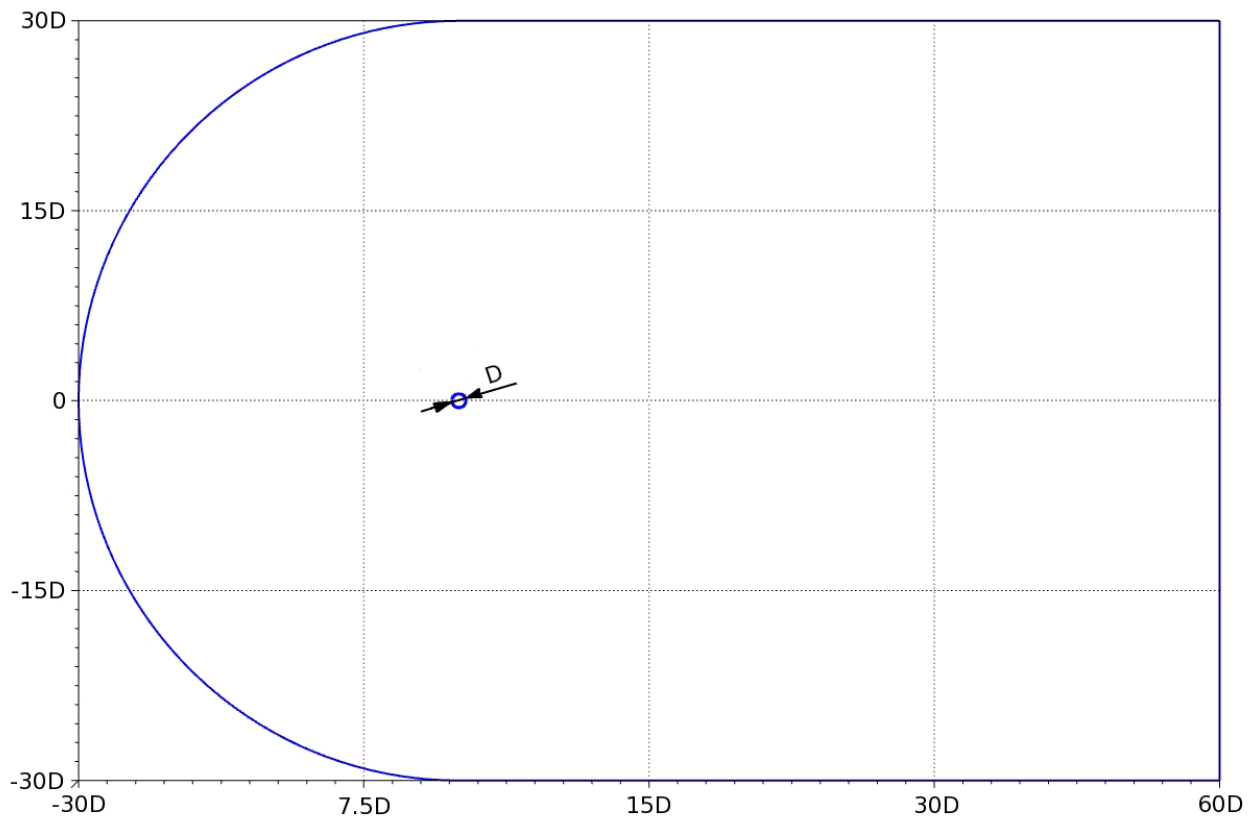


Figura 2.2 - Dominio di calcolo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

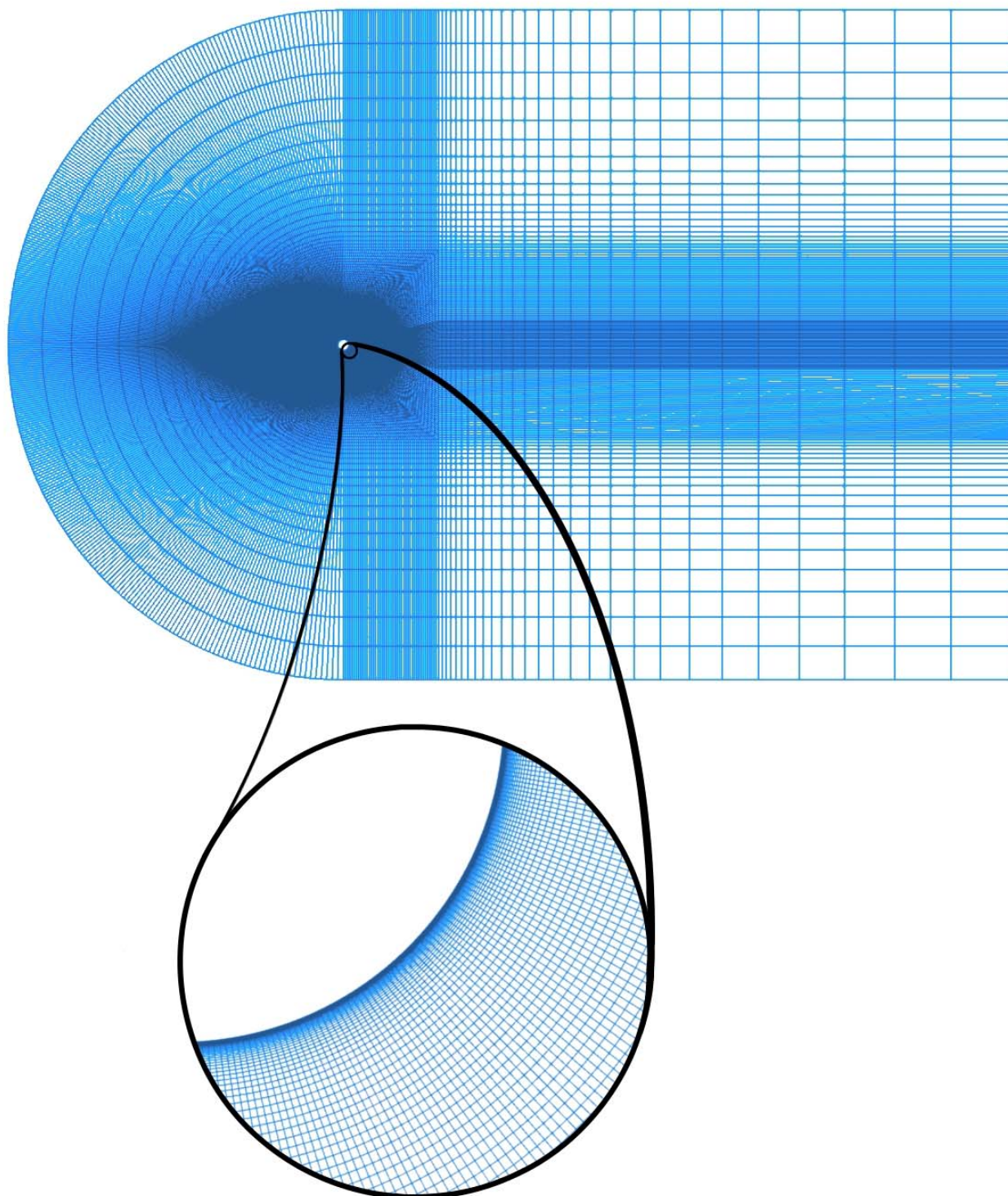


Figura 2.3 - Griglia di calcolo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 2.1.3 Condizioni al contorno

Il modello di calcolo deve essere associato ad opportune condizioni al contorno. In particolare, il modello URANS, utilizzato per la simulazione dell'elemento di riferimento, richiede le seguenti condizioni al contorno:

- all' ingresso del dominio occorre imporre: la velocità,  $U$ , la pressione,  $p$ , la densità,  $\rho$ , l'energia cinetica turbolenta,  $k$ , e la frequenza di dissipazione,  $\omega$ . Le grandezze fluidodinamiche, ossia velocità, pressione e densità, sono scelte in base alle caratteristiche del flusso da risolvere. Noti tali valori è possibile valutare i parametri relativi al modello di turbolenza: l'energia cinetica turbolenta è calcolata a partire dall'intensità turbolenta della corrente indisturbata,  $I$ , mediante la seguente formula :

$$k = \frac{3}{2}(I \cdot U)^2$$

mentre per la frequenza di dissipazione si è utilizzata la relazione fornita in [1] :

$$\omega = 5 \frac{U}{L_d}$$

dove  $L_d$  è la dimensione massima del dominio computazionale;

- sul bordo superiore ed inferiore del dominio si suppone di essere in campo, indisturbato, quindi si applicano condizioni di slip wall;
- all'uscita del dominio si impone una condizione di gradiente nullo per la velocità e una condizione non riflessiva per la pressione;
- sulla parete si impone che la velocità sia nulla.

### 2.1.4 Scelta dei parametri di calcolo

Le condizioni atmosferiche di riferimento sono state imposte scegliendo una temperatura ambiente pari a  $T_0 = 293.15 \text{ K}$  ed una densità uguale a  $\rho_0 = 1.204 \text{ kg/m}^3$ . Fissate queste grandezze è possibile ottenere la pressione di riferimento mediante l'equazione di stato,  $p_0 = 101399 \text{ Pa}$  e la viscosità cinematica mediante l'equazione di Sutherland,  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . L'intensità turbolenta in ingresso è posta pari al 10%. Tale valore è stato ricavato dal documento "Valutazione del Vento di Progetto" (documento DT.ISP.V.E.R1.001) scegliendo una media tra le intensità turbolente lungo le tre direzioni. Dalle simulazioni numeriche è emerso che, con un'intensità turbolenta pari al 10%, si ha uno strato limite completamente turbolento. Di conseguenza, anche aumentando tale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

parametro non si avranno variazioni sostanziali del campo di moto in quanto la separazione avviene in regime turbolento.

- Come descritto nella Sezione 1, si è scelto di studiare un intervallo di velocità compreso tra i 10m/s e i 40 m/s, in particolare le velocità analizzate sono: 10 m/s, 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s e 40 m/s.

Il *solver* URANS varia in modo dinamico l'intervallo di integrazione temporale,  $dt$ , in modo da garantire che il parametro  $CFL_{MAX}$ , definito come, essendo  $dx_{min}$  la dimensione caratteristica della cella di calcolo,

$$CFL_{MAX} = \frac{dt}{dx_{MIN}} U ,$$

risulti minore di un valore soglia prefissato in tutte le celle del dominio di calcolo. Nei casi in esame si è scelto un CFL massimo di 0.5.

I dati per il calcolo aeroacustico sono stati raccolti con una frequenza di campionamento pari a  $50f_{sh}$ , dove  $f_{sh}$  è la frequenza principale di *shedding* del cilindro. La simulazione comprende una prima fase, della durata di 100 periodi di *shedding*, in cui il campo di moto raggiunge una configurazione periodica stabile, ed una seconda, lunga anch'essa 100 periodi, in cui sono stati campionati i dati aeroacustici.

## 2.2 Modello di calcolo aeroacustico

### 2.2.1 Formulazione di Curle approssimata

Una prima stima dell'emissione acustica di un cilindro a sezione circolare immerso in un campo di moto uniforme può essere fatta utilizzando la formulazione di Curle, secondo cui la pressione acustica  $p(\mathbf{x}, t)$ , emessa da una superficie solida acusticamente compatta su cui agisce una forza  $\mathbf{F}$ , è data dalla relazione

$$p(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi c_0} \frac{r_i}{r^2} \frac{\partial}{\partial t} \left( F_i \left( t - r/c \right) \right)$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

dove  $r$  rappresenta la distanza tra l'osservatore ed il centro della superficie, la formulazione è quindi valida quando  $r > D$  nel caso di un cilindro di diametro  $D$  e  $c_0$  è la velocità del suono. Un corpo può essere definito acusticamente compatto se la sua lunghezza di riferimento è più piccola della lunghezza d'onda del suono emesso dal corpo stesso [2]. Per i toni eolici, la lunghezza caratteristica è definita come la distanza, in direzione *spanwise*, entro cui le fluttuazioni di pressione sono correlate,  $L_C$ .

Se l'osservatore è posizionato in direzione normale all'asse del cilindro (ossia  $r_i / r = 1$ ), la formula di Curle può essere semplificata e si ottiene la seguente equazione per il valore quadratico medio (RMS) delle fluttuazioni acustiche [3]

$$p_{RMS}^2 = \frac{\rho^2 U^6 St^2 L^2 C_{L,RMS}^2}{16 c_0^2 r^2}$$

dove  $\rho$  e  $U$  corrispondono rispettivamente alla densità del fluido ed alla velocità del suono del campo medio,  $L$  è la lunghezza del cilindro in direzione *spanwise*,  $St$  è lo Strouhal di *shedding* (definito come  $St = fD/L$  con  $f$  frequenza di shedding e  $D$  il diametro del cilindro) e  $C_{L,RMS}$  è il valore RMS del coefficiente di portanza.

La suddetta formula analitica presenta alcune limitazioni che ne impediscono l'uso per il caso in esame:

- è valida solo in direzione normale al cilindro;
- ipotizza che l'emissione acustica avvenga in fase su tutta la lunghezza  $L$  del cilindro, ovvero ipotizza che la lunghezza di correlazione  $L_C$  sia uguale alla lunghezza stessa del cilindro,  $L_C = L$ . Questo è, però, in contraddizione con quanto avviene nella realtà. Dagli esperimenti in galleria del vento si osserva, infatti, che il campo di moto di un cilindro immerso in un flusso uniforme presenta, in direzione *spanwise*, delle celle di dimensione limitata all'interno delle quali si ha un'emissione acustica coerente. Il risultato è che la lunghezza di correlazione  $L_C$  risulta minore della lunghezza del cilindro;
- è valida solo se la superficie può essere considerata acusticamente compatta, ovvero solo se  $L_C < \lambda$  dove  $\lambda$  rappresenta la lunghezza d'onda del tono eolico. Dato che questa formulazione prevede che  $L_C = L$ , la condizione di compattezza diventa  $L < \lambda$ . Nel presente studio si vogliono analizzare le emissioni acustiche di cavi aventi un'estensione dell'ordine delle decine o delle centinaia di metri. I toni eolici associati a cavi di dimensioni comparabili con quelle dell'elemento di riferimento presentano una frequenza di picco di circa un centinaio di Hz, ossia  $\lambda \approx 3.4m$ . Pertanto, risulta evidente che la condizione di superficie

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

acusticamente compatta non potrà valere in questo contesto.

Sebbene la formulazione di Curle approssimata non potrà essere usata direttamente per la caratterizzazione acustica dell'elemento di riferimento, essa verrà utilizzata per validare la procedura di calcolo.

### 2.2.2 Ffowcs Williams & Hawkings

Per la valutazione delle emissioni acustiche, il segnale emesso dalle sorgenti acustiche ricavate risolvendo il campo di moto fluidodinamico sono state propagate usando un modello basato sulla formulazione tridimensionale di Ffowcs Williams & Hawkings [19]. Tale modello prevede di individuare una superficie permeabile contenente tutti i corpi solidi presenti all'interno del dominio. Il campo acustico verrà poi valutato integrando le grandezze fluidodinamiche su tale superficie, indicata con  $f(x, y, z) = 0$ . Trascurando il rumore *broadband* dovuto alla turbolenza, la formulazione integrale di Ffowcs Williams & Hawkings può essere scritta, nel dominio delle frequenze, come

$$H(f)\hat{p}'(\mathbf{y}, \omega) = - \int_{f=0} i\omega\hat{Q}(\xi, \omega)G(\mathbf{y}; \xi)ds - \int_{f=0} \hat{F}_i(\xi, \omega)\frac{\partial G(\mathbf{y}; \xi)}{\partial y_i} ds$$

dove  $H$  è la funzione di *Heaviside*,  $G$  è un'opportuna funzione di Green, i vettori  $\xi$  rappresentano le coordinate della superficie di integrazione ed  $\mathbf{y}$  le coordinate dell'osservatore. Le sorgenti acustiche  $\hat{Q}$  e  $\hat{F}_i$  sono valutate a partire dai dati fluidodinamici e poi trasformate nel dominio delle frequenze. Supponendo che all'esterno della superficie di integrazione il campo acustico possa essere considerato uniforme ed uguale al campo indisturbato le sorgenti  $Q$  e  $F_i$  nel dominio del tempo hanno la seguente espressione

$$F_i = [\delta_{ij}p + \rho U_j(U_i - 2U_{0i}) + \rho U_{0i}U_{0j}] \hat{n}_j$$

$$Q = (\rho U_i - \rho_0 U_{0i}) \hat{n}_i$$

dove  $p$ ,  $\rho$  e  $U$  sono le grandezze locali del campo fluidodinamico e  $p_0$ ,  $\rho_0$  e  $U_0$  rappresentano le stesse in campo indisturbato. Nell'ipotesi che all'esterno della superficie di integrazione la velocità sia uniforme, la funzione di Green da usare può essere ottenuta a partire da quella in campo libero, applicando la trasformazione di Prandtl-Glauert :

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$G = \frac{1}{4R\pi\beta} e^{-ik(r/\beta - Mz/\beta^2)}$$

dove  $R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} / \beta^2$ ,  $M$  è il numero di Mach in direzione  $z$  ossia  $M = (U_z)_0 / c_0$ ,  $k = \omega / c_0$  è il numero d'onda e  $\beta = \sqrt{1 - M^2}$ .

Prima di trasformare le sorgenti acustiche  $Q$  e  $F_i$  nel dominio delle frequenze è necessario applicare una funzione di *windowing* per renderle strettamente periodiche. La funzione usata è quella di Hann [4], definita dalla seguente espressione

$$W(n) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$$

dove  $n$  rappresenta il generico istante temporale,  $N$  il numero totale di istanti di tempo considerati ed i coefficienti  $a_i$  valgono

$$a_0 = 0.5$$

$$a_1 = -0.5.$$

La funzione di *windowing* deve essere applicata in modo da conservare l'energia del segnale, per questo motivo, dopo avere trasformato le sorgenti acustiche nel dominio delle frequenze è necessario moltiplicarle per un coefficiente correttivo  $C_w$ , la cui espressione è

$$C_w = \left( \frac{1}{N} \sum_N W(n)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Essendo il calcolo fluidodinamico bidimensionale, in sede di analisi aeroacustica bisogna tenere conto della de-correlazione spaziale e temporale del fenomeno di *shedding* dei vortici dal cilindro. Sperimentalmente si osserva che, per numeri di Reynolds paragonabili al caso in esame, si ha una modulazione in fase del fenomeno di distacco dei vortici, legata a variazioni casuali dell'ampiezza delle quantità fluttuanti nella scia vicina. Tali variazioni sono dovute a non uniformità delle condizioni di ingresso, rugosità superficiale, etc. Questo fa sì che il distacco dei vortici avvenga in modo obliquo rispetto all'asse del cilindro [5]. Trattare anche l'emissione acustica come se fosse bidimensionale porterebbe a delle emissioni acustiche troppo elevate, frutto dell'aver assunto il distacco dei vortici in fase lungo tutta l'estensione dell'elemento. La decorrelazione spaziale della scia può essere modellizzata assumendo che le grandezze fluidodinamiche siano sfasate casualmente lungo la direzione *spanwise* [6].



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

Secondo il teorema del limite centrale, si può assumere che la fase abbia una densità di probabilità gaussiana la cui varianza è funzione lineare della posizione *spanwise*  $\eta$  :

$$w(\eta) = 2w_{\max}|\eta|$$

dove  $w_{\max} = 1/L_c$ . Dato il campo fluidodinamico nel piano  $\eta = 0$ , le grandezze negli altri piani sono ottenute variando la fase in modo *random* secondo una gaussiana, la cui varianza sia zero nel piano  $\eta = 0$  ed aumenti spostandosi verso le estremità ( $\eta = \pm 1/2$ ).

La tridimensionalità del fenomeno interviene anche decorrelando lo *shedding* nel tempo. Una grandezza fluidodinamica relativa allo *shedding* tridimensionale può essere vista come la media di  $N$  segnali URANS, ciascuno dei quali sfasato nel tempo [7]. Per  $N \rightarrow \infty$  e assumendo che lo sfasamento abbia una statistica Gaussiana, si ottiene che il segnale tridimensionale è dato dal prodotto tra segnale URANS e una funzione che decade esponenzialmente al crescere della varianza  $\sigma(t)^2$  della distribuzione Gaussiana che identifica lo sfasamento

$$S_{3D}(t) \approx CS_{URANS}(t) \exp\left(-\frac{\sigma(t)^2}{2}\right)$$

dove  $C$  è un fattore di scala usato per garantire che il segnale decorrelato abbia la stessa potenza del segnale URANS.

E' ragionevole assumere che il segnale sia progressivamente decorrelato all'avanzare del tempo. Se la varianza è esprimibile come

$$\sigma(t)^2 = \sqrt{\frac{t}{\tau_c}},$$

dove  $\tau_c$  è la scala temporale del rumore di turbolenza,  $S_{3D}$  può scriversi come

$$S_{3D}(t) \approx CS_{URANS}(t) \exp\left(-\sqrt{\frac{t}{4\tau_c}}\right).$$

Le correzioni necessarie per decorrelare il segnale nello spazio e nel tempo vengono applicate, per ciascun punto della superficie di integrazione, direttamente alla storia temporale ottenuta dalle equazioni URANS. Il segnale URANS decorrelato è poi usato per calcolare le sorgenti aeroacustiche,  $F_i$  e  $Q$ , nel dominio del tempo. Date le sorgenti nel dominio del tempo, ad esse è

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

applicato il filtro di *windowing* e successivamente le si trasforma nel dominio delle frequenze in modo da poterle inserire nell'equazione di Ffowcs Williams and Hawkings.

### 2.2.3 Scelta dei parametri di calcolo

La formulazione di Ffowcs Williams & Hawkings è stata applicata scegliendo come superficie di integrazione la superficie stessa del cilindro. Dato che la lunghezza *spanwise* del corpo da analizzare è diversi ordini di grandezza più grande del diametro, per limitare i costi computazionali si è deciso di simulare solo una porzione compresa nell'intervallo  $[-L_s, L_s]$ . Ciò è possibile perché il contributo alla pressione acustica dovuto ad una sezione del cilindro decresce all' aumentare della distanza tra tale sezione e l'osservatore.

Per determinare il minimo valore di  $L_s$  che permetta di ottenere una pressione acustica rappresentativa di tutto il cilindro di lunghezza  $L$ , sono state eseguite diverse simulazioni tridimensionali al crescere di  $L_s$ . Il valore di  $L_s$  oltre il quale l'emissione acustica può essere considerata indipendente dalla lunghezza *spanwise* simulata rappresenta la lunghezza limite cercata.

Come ulteriore verifica, si sono confrontati gli spettri ottenuti dalle simulazioni tridimensionali con lo spettro ottenuto da un calcolo bidimensionale.

Se ipotizziamo una lunghezza di correlazione *spanwise* infinita,  $L_c \rightarrow \infty$  (ossia nel modello tridimensionale non si decorre il segnale nel tempo e nello spazio) e ponendo l'osservatore ad una distanza dell'ordine di  $D$ , un cilindro molto allungato,  $L_s \gg D$ , può essere considerato di lunghezza infinita. In queste condizioni, lo spettro acustico tende a quello derivante da un calcolo bidimensionale.

In Figura 2.4 sono riportati gli spettri di pressione acustica per un osservatore posto ad una distanza di  $r = 100D$  e relativi ad una velocità del flusso pari a  $40 \text{ m/s}$ . Si osserva come, per valori di  $L_s$  superiori a  $35D$  gli spettri di pressione siano sostanzialmente indipendenti dalla lunghezza *spanwise* simulata e tendano allo spettro valutato con la simulazione bidimensionale.

Va notato che i valori riportati in Figura 2.4 non sono rappresentativi della vera emissione acustica del cilindro, in quanto, come spiegato precedentemente, non sono stati corretti per tener conto degli effetti tridimensionali del fenomeno in esame.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

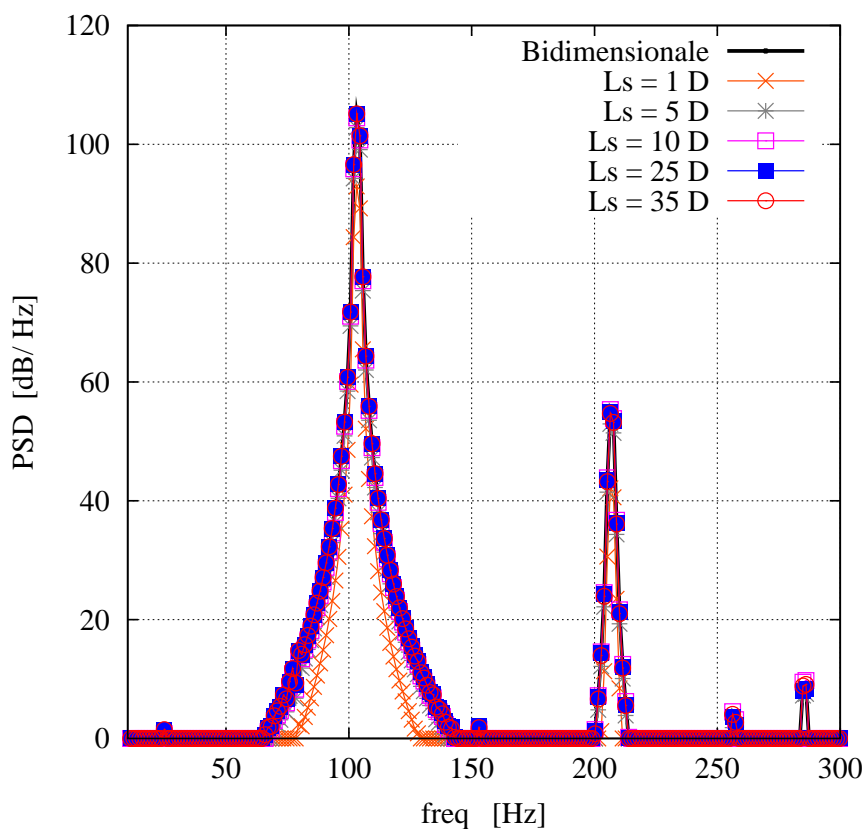


Figura 2.4 Sensibilità dello spettro al crescere della lunghezza spanwise simulata

La superficie di integrazione scelta è, pertanto, un cilindro di diametro  $D$  e lunghezza  $L_s = 35D$ . Tale superficie è stata discretizzata con 361 punti lungo la circonferenza e 400 punti in direzione *spanwise*. La differente densità di punti è giustificata dal fatto che in direzione *spanwise* si hanno variazioni graduali delle grandezze e quindi per una corretta integrazione numerica sono sufficienti meno punti di integrazione.

La lunghezza di correlazione *spanwise*,  $L_c$  e la scala temporale  $\tau_c$  posso essere stimate da dati sperimentali. Per il caso in esame si assume  $L_c = 1.66D$  [8] e  $\tau_c = 1.25T$  con  $T$  periodo di shedding dei vortici [7].

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 2.2.4 Campo di moto fluidodinamico

Si riportano di seguito le mappe di velocità mediata nel tempo, velocità istantanea, pressione mediata nel tempo, energia cinetica turbolenta mediata nel tempo, e le storie temporali dei coefficienti di portanza  $C_l$  e resistenza  $C_d$  sul cilindro.

E' possibile osservare nei grafici di velocità media che la bolla di separazione, presente a valle del cilindro, tende ad accorciarsi all'aumentare della velocità di ingresso  $U_{in}$ , e quindi del numero di Reynolds. Ciò comporta una riduzione del  $C_d$  del cilindro all'aumentare del  $Re$ , dovuto al minore ingombro della scia.

Nelle immagini della velocità istantanea è presente, per tutti i valori di  $U_{in}$ , la *scia di Von Karman*. La frequenza del tono principale presente nel campo acustico è legata alla frequenza di distacco dei vortici (*frequenza di shedding,  $f_{sh}$* ).

I campi di pressione media presentano la stessa configurazione topologica, pur mostrando un incremento della differenza tra valore minimo e massimo al crescere della  $U_{in}$ .

L'energia cinetica turbolenta media presenta un comportamento simile per tutte le  $U_{in}$ , con un valore massimo che aumenta all'aumentare della stessa. Il massimo valore è presente in tutte le immagini nella zona di ricircolo, simmetrico rispetto all'asse orizzontale. Si osserva come, per tutte le  $U_{in}$ , si hanno valori elevati di energia cinetica turbolenta in tutta la zona di flusso non separato intorno al cilindro, quindi lo strato limite è completamente turbolento. Questo fenomeno è dovuto al valore dell'intensità turbolenta di ingresso adottato, e conferma che anche per valori superiori la separazione dello strato limite risulta essere turbolenta. E si deduce che il valore adottato di intensità turbolenta all'ingresso è conservativo.

Le storie temporali dei coefficienti  $C_l$  e  $C_d$  sono state riportate su un intervallo temporale tale per cui si hanno cinque cicli di shedding per ogni  $U_{in}$ . Si osserva che, coerentemente con quanto riportato in letteratura, il  $C_d$  presenta una frequenza principale doppia rispetto alla frequenza principale del  $C_l$ . Inoltre, mentre la storia temporale del  $C_l$  è sostanzialmente sinusoidale, quella del  $C_d$  presenta delle modulazioni periodiche sovrapposte alla frequenza principale.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

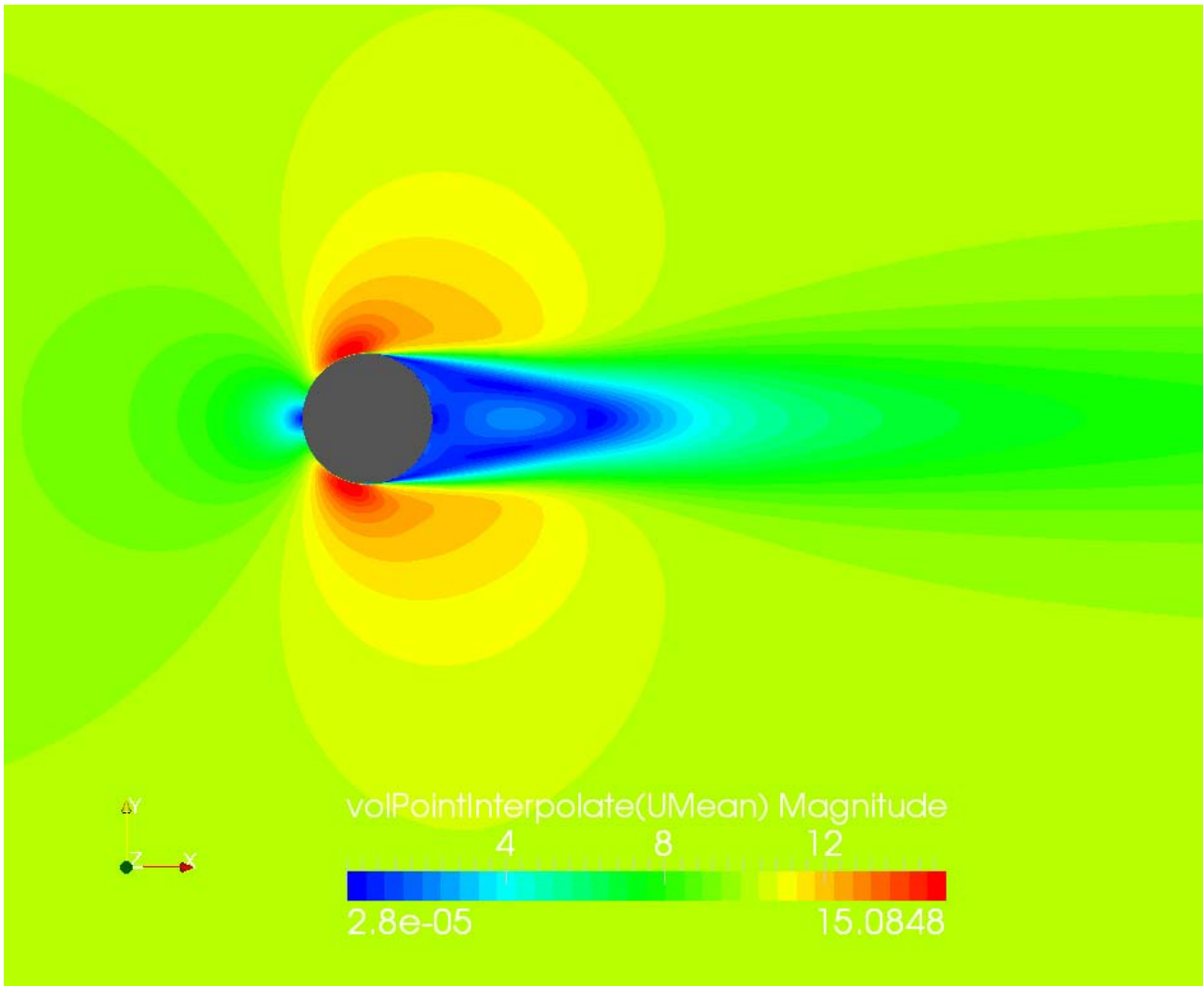


Figura 2.5 Campo di moto per una corrente a 10 m/s: modulo della velocità media

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

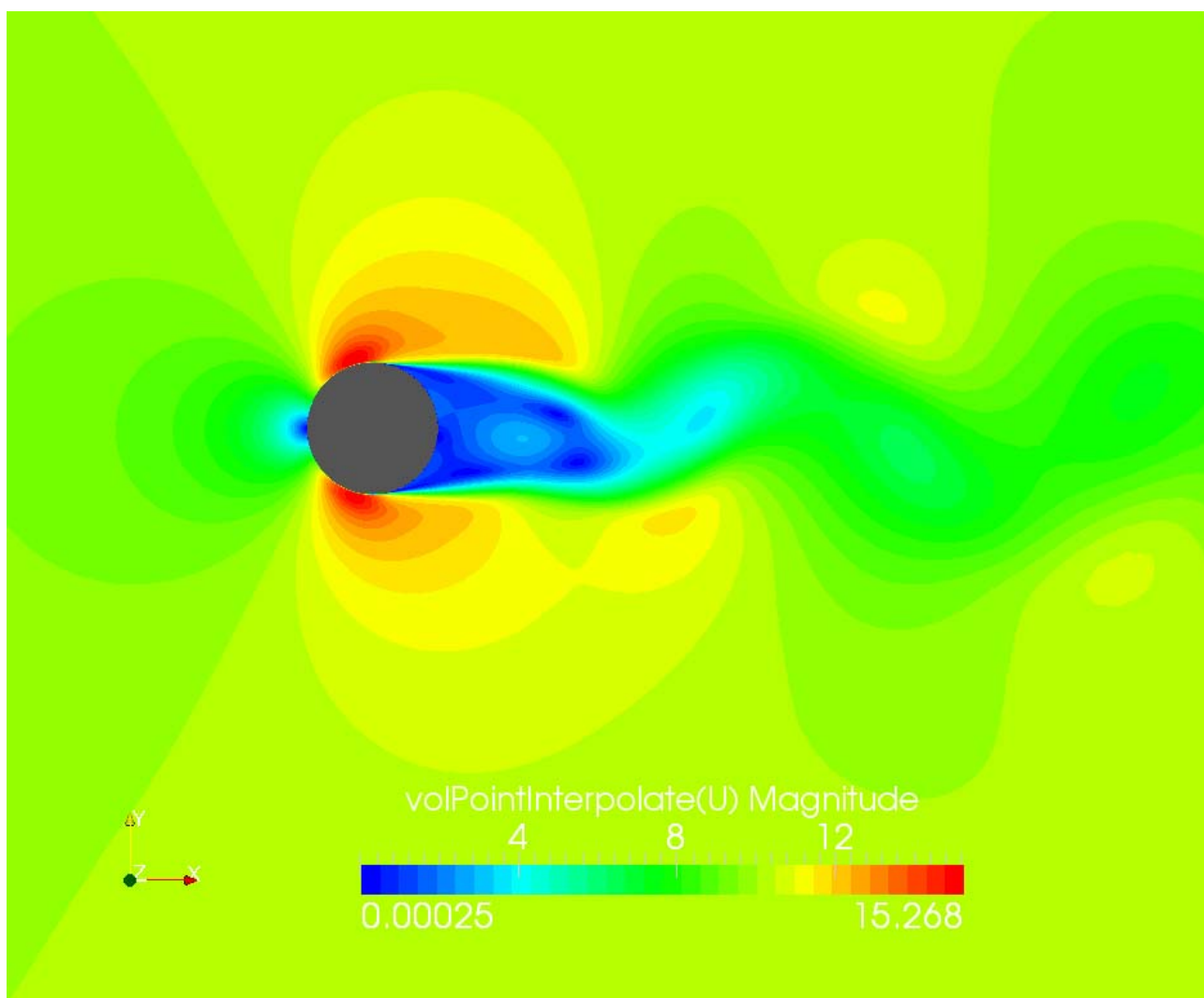


Figura 2.6 Campo di moto per una corrente a 10 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

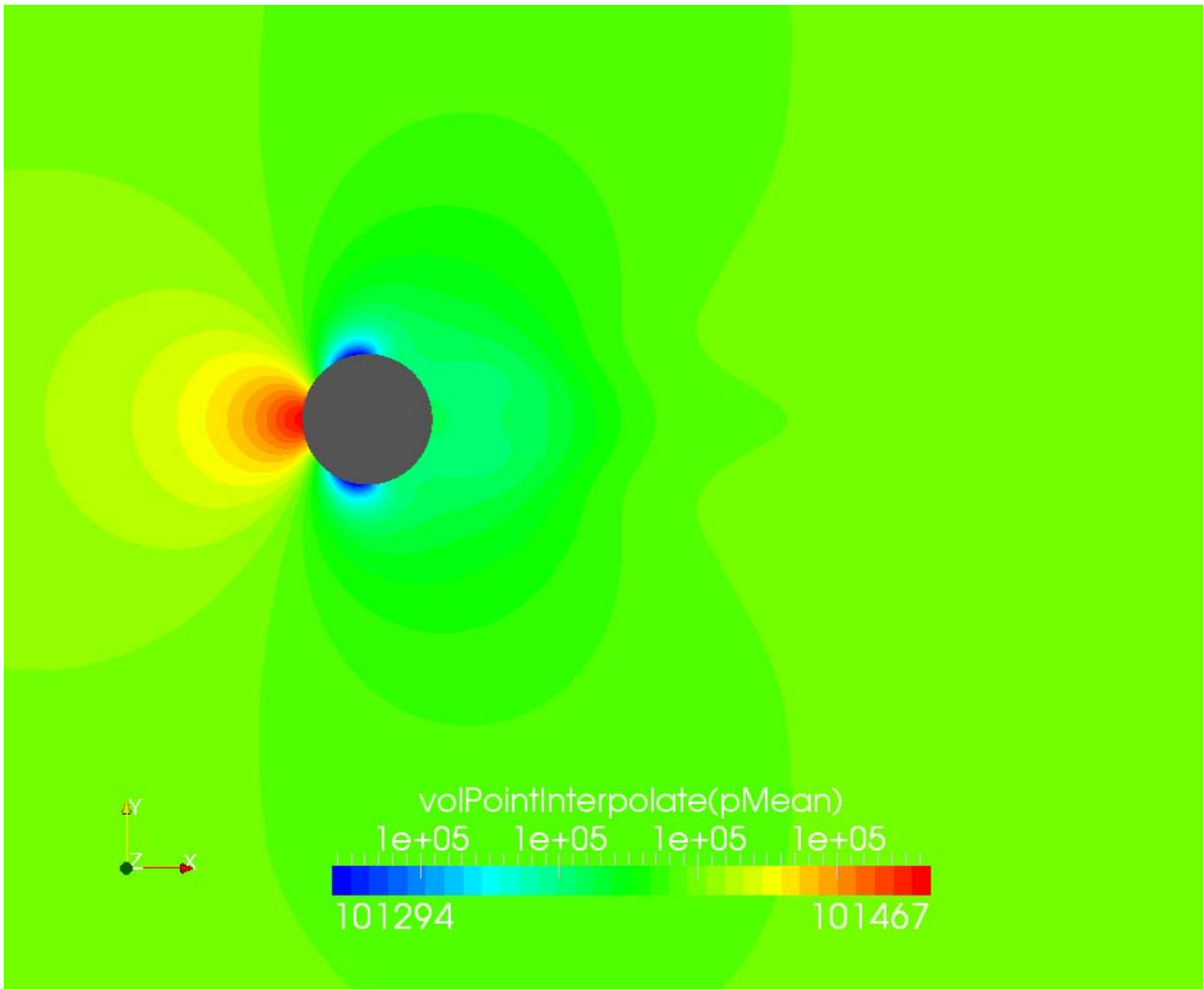


Figura 2.7 Campo di moto per una corrente a 10 m/s: pressione media

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

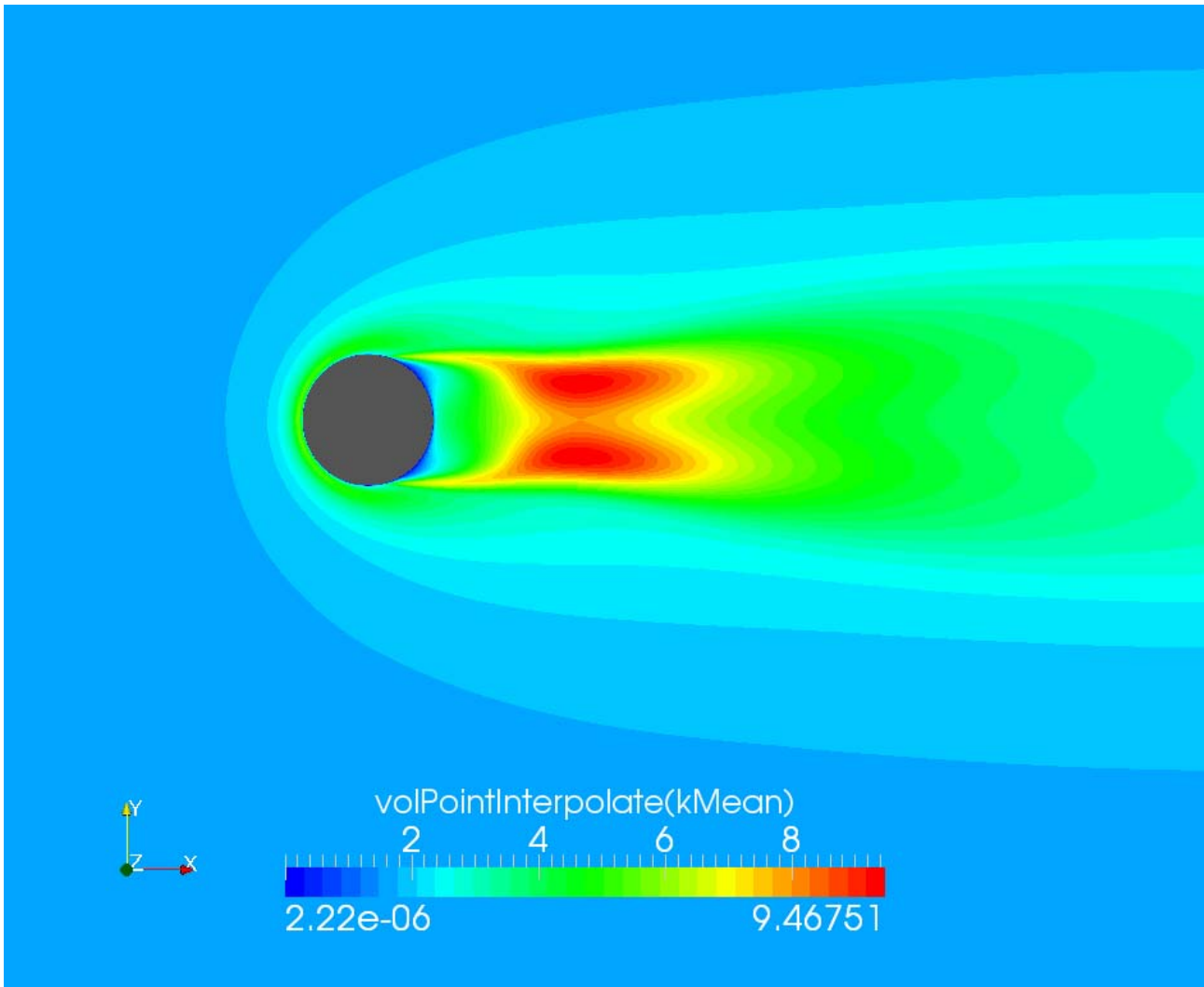
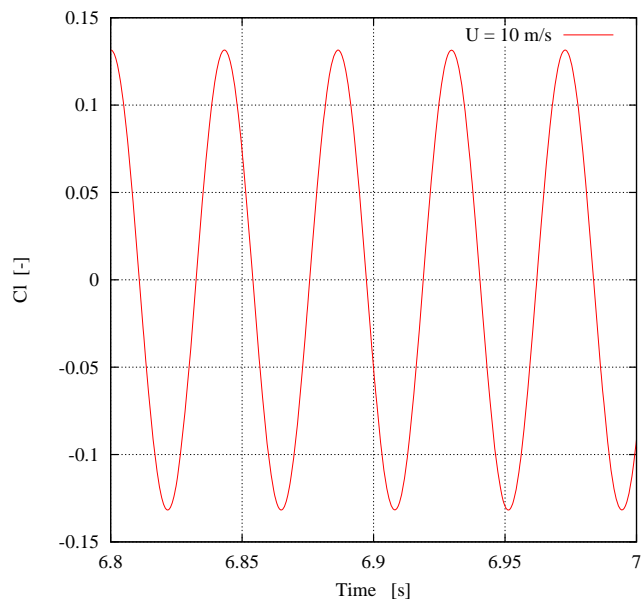


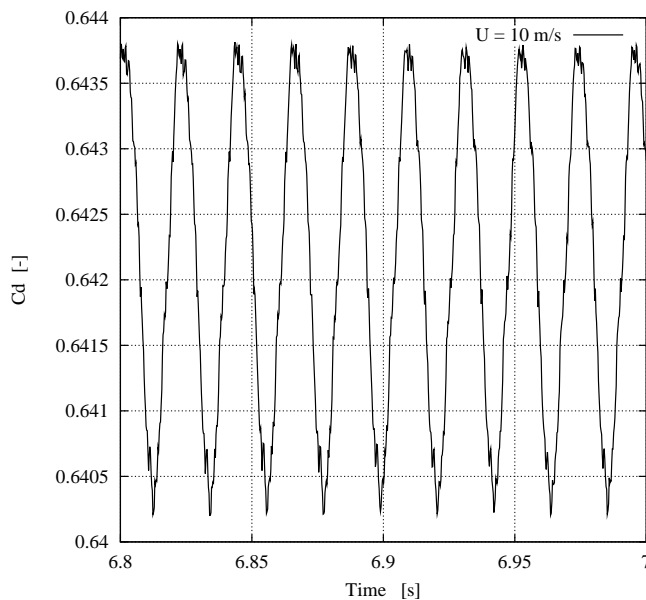
Figura 2.8 Campo di moto per una corrente a 10 m/s: energia cinetica turbolenta



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**(a)**



**(b)**

Figura 2.9 Coefficienti di forza per una corrente a 10 m/s: a) coefficiente di portanza, b) coefficiente di resistenza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

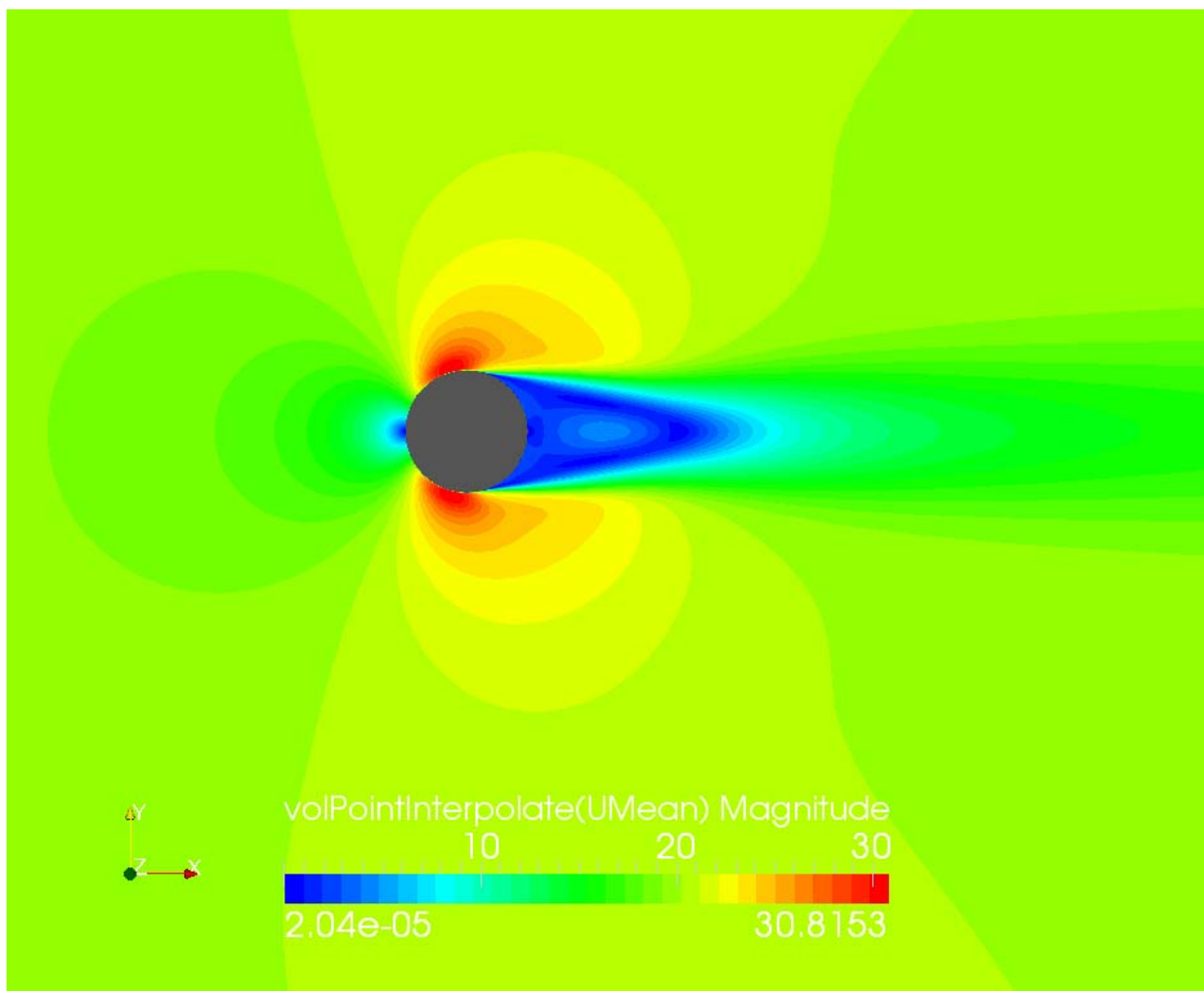


Figura 2.10 Campo di moto per una corrente a 20 m/s: modulo della velocità media

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

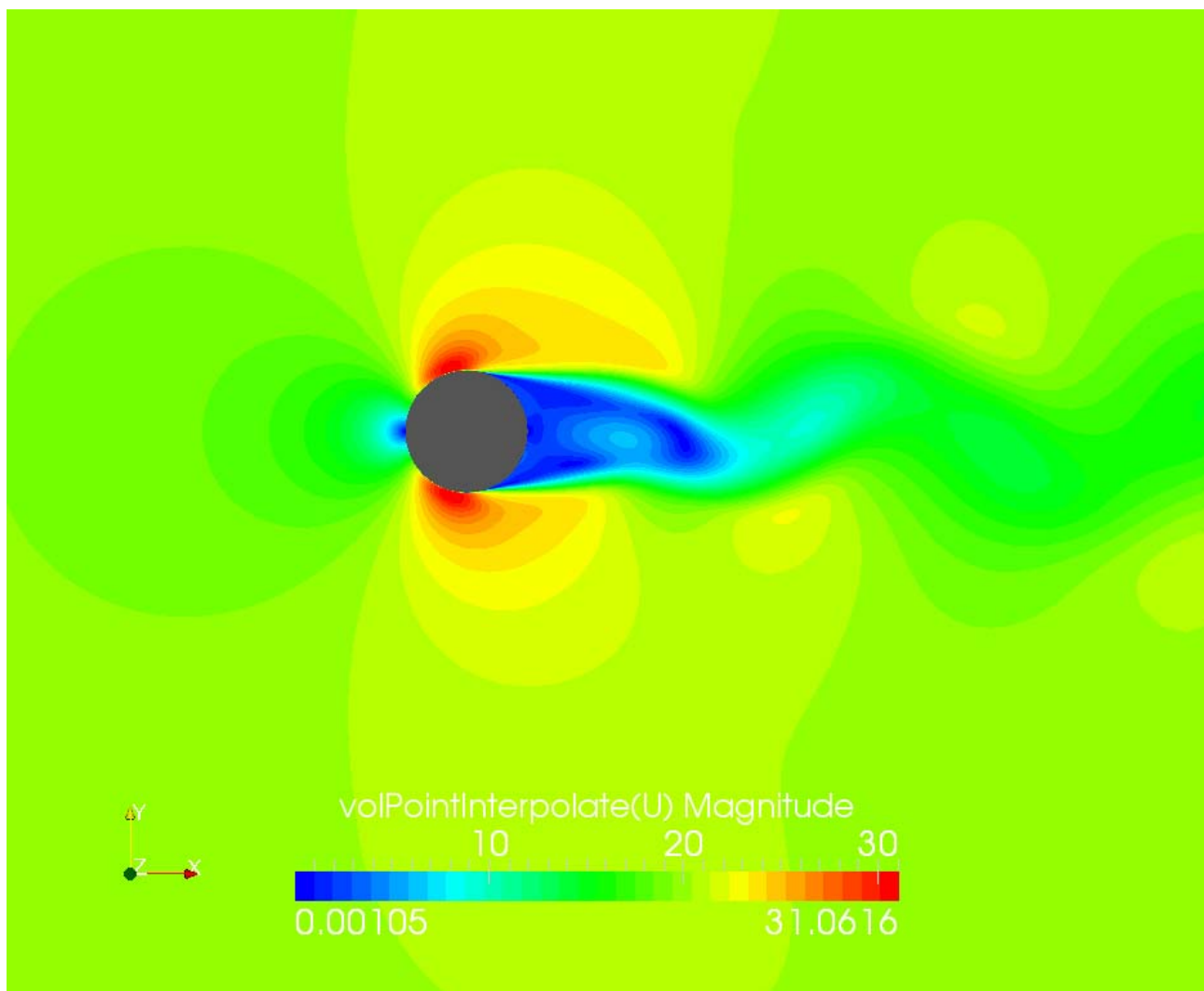


Figura 2.11 Campo di moto per una corrente a 20 m/s: modulo della velocità istantanea



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

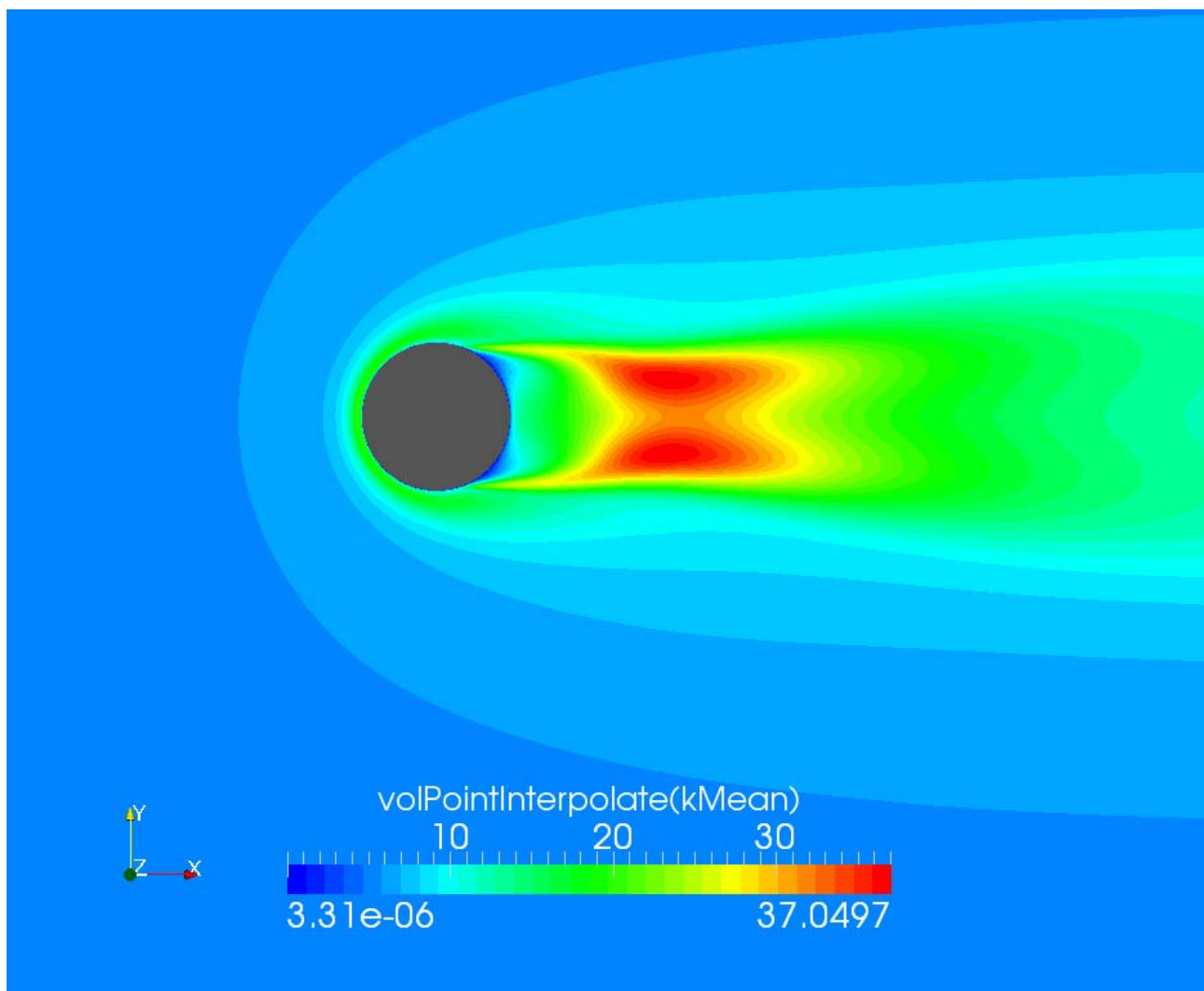
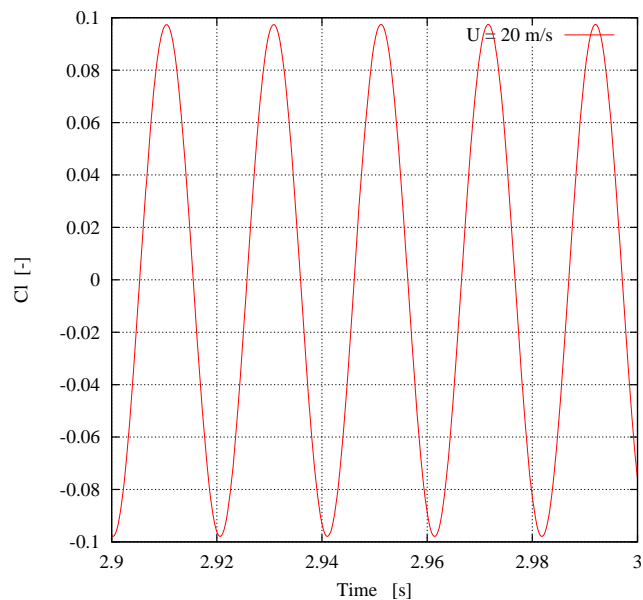
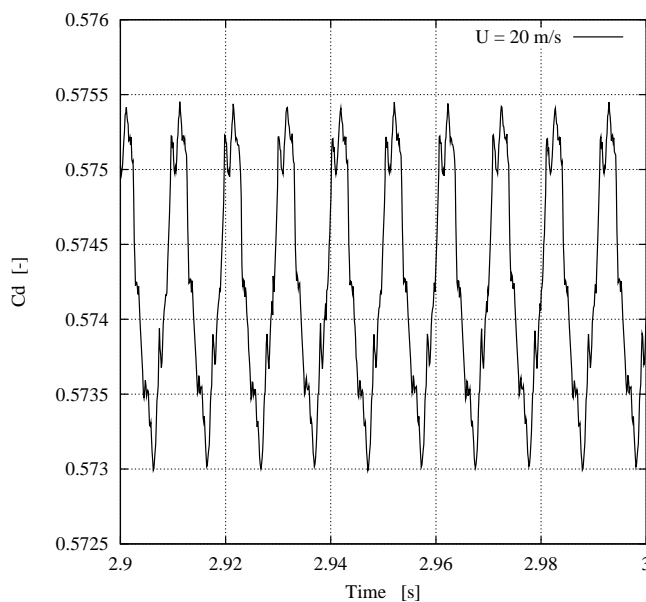


Figura 2.13 Campo di moto per una corrente a 20 m/s: energia cinetica turbolenta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						



**(a)**



**(b)**

Figura 2.14 Coefficienti di forza per una corrente a 20 m/s: a) coefficiente di portanza, b) coefficiente di resistenza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

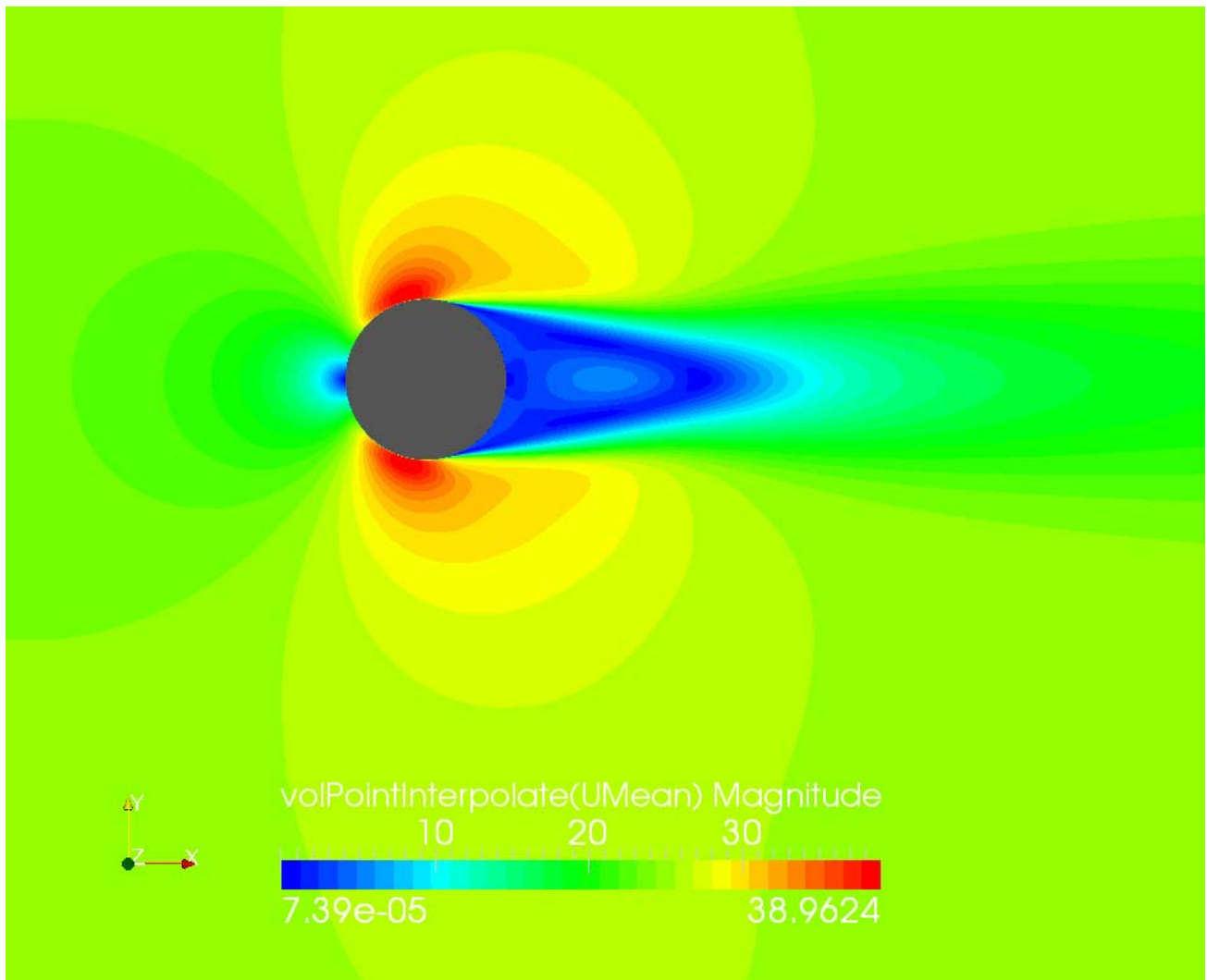


Figura 2.15 Campo di moto per una corrente a 25 m/s: modulo della velocità media

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

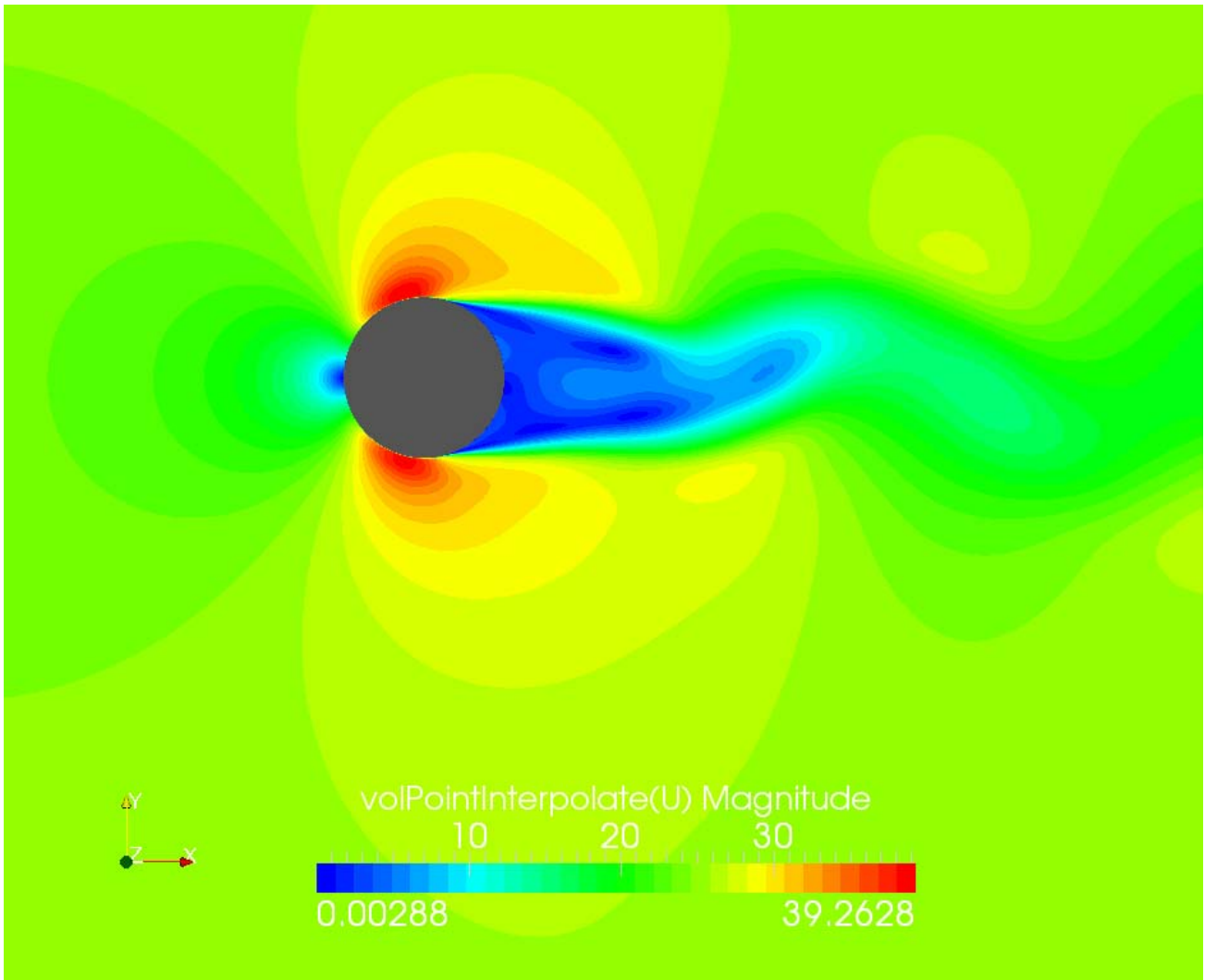


Figura 2.16 Campo di moto per una corrente a 25 m/s: modulo della velocità istantanea



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

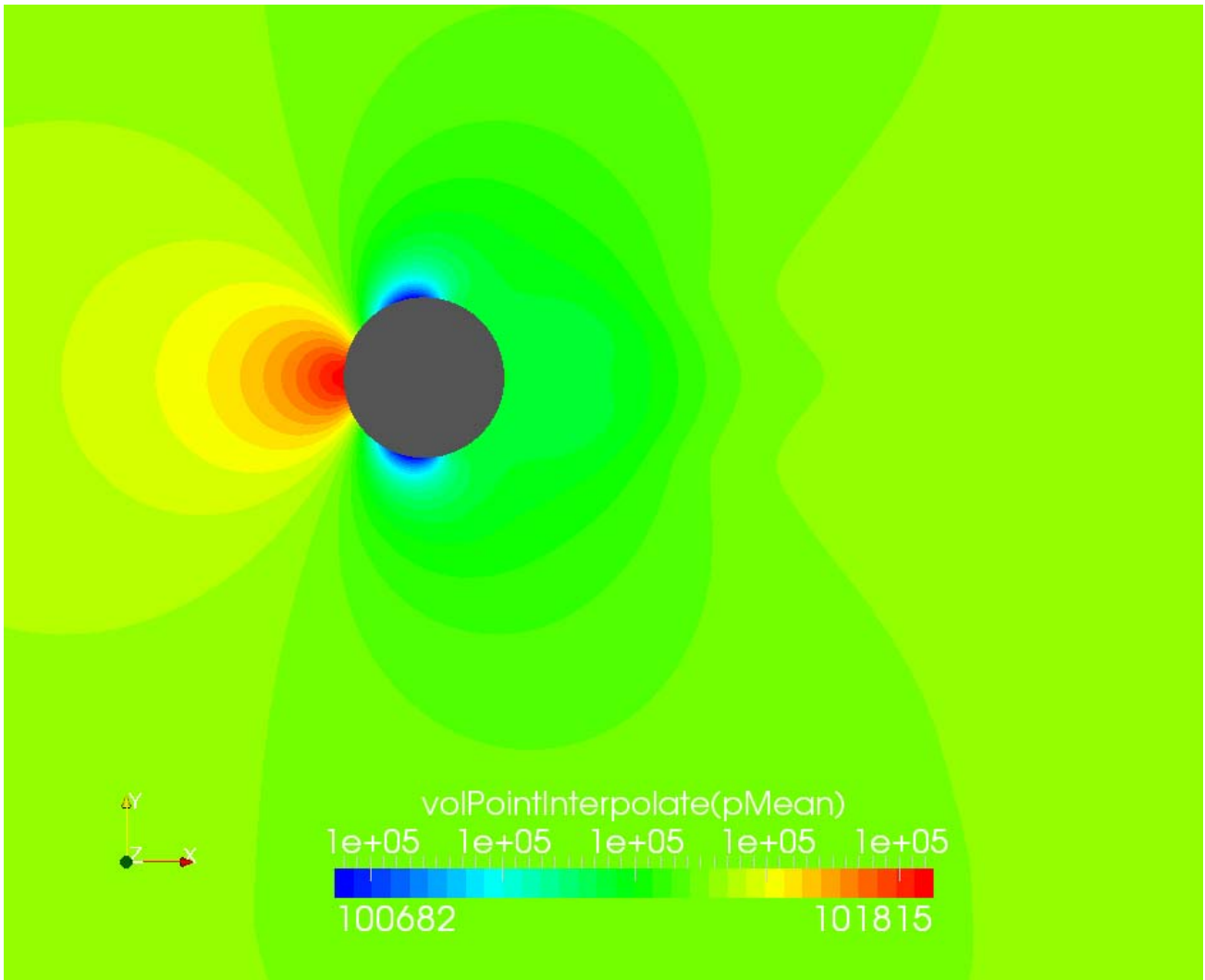


Figura 2.17 Campo di moto per una corrente a 25 m/s: pressione media

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

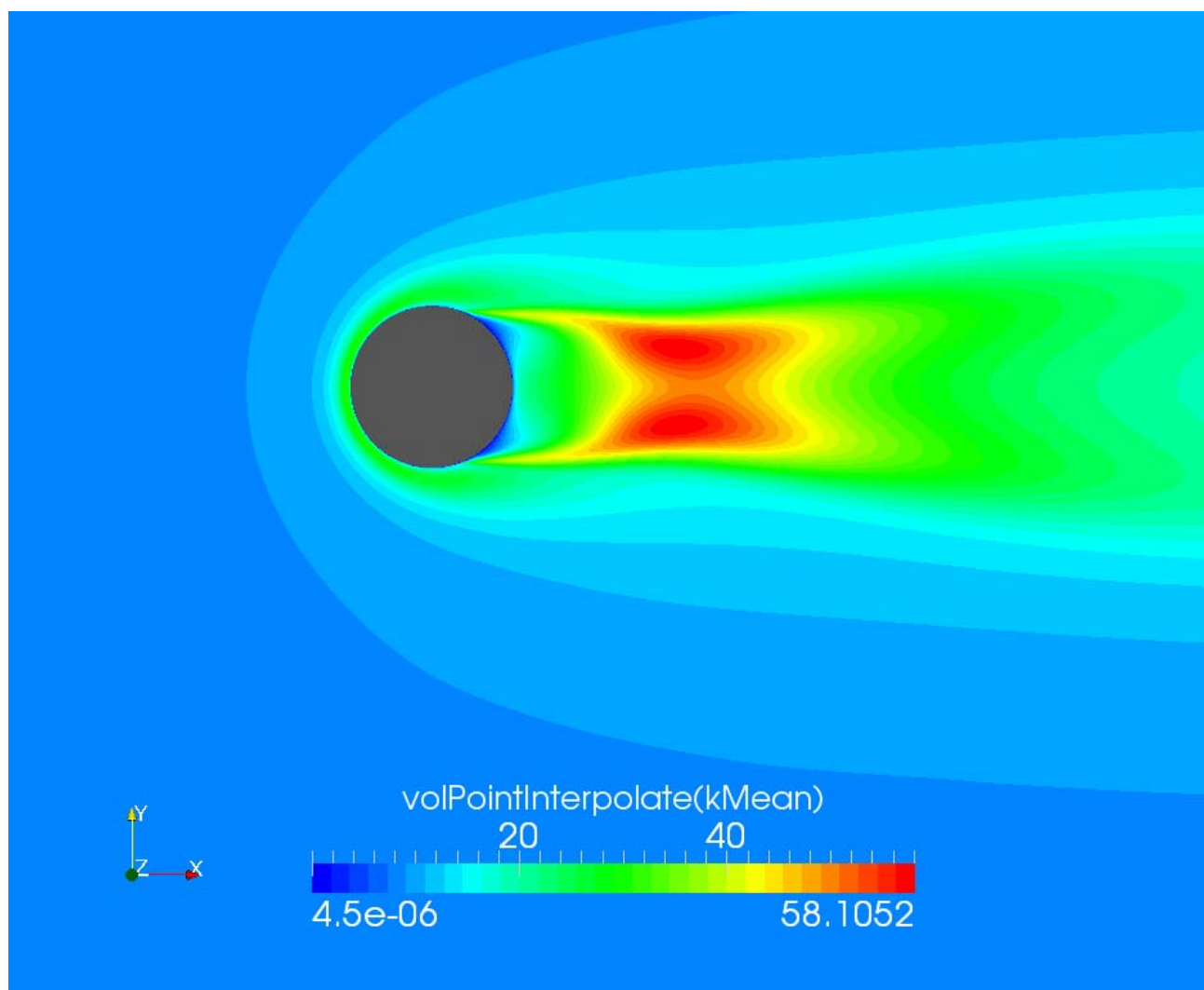


Figura 2.18 Campo di moto per una corrente a 25 m/s: energia cinetica turbolenta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

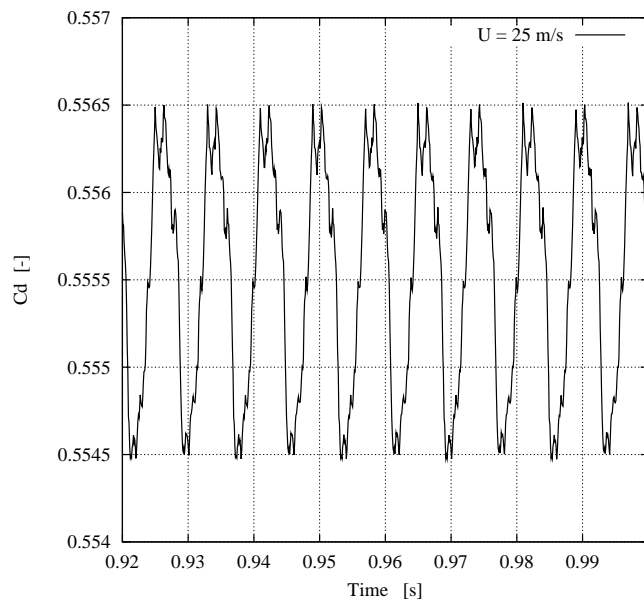
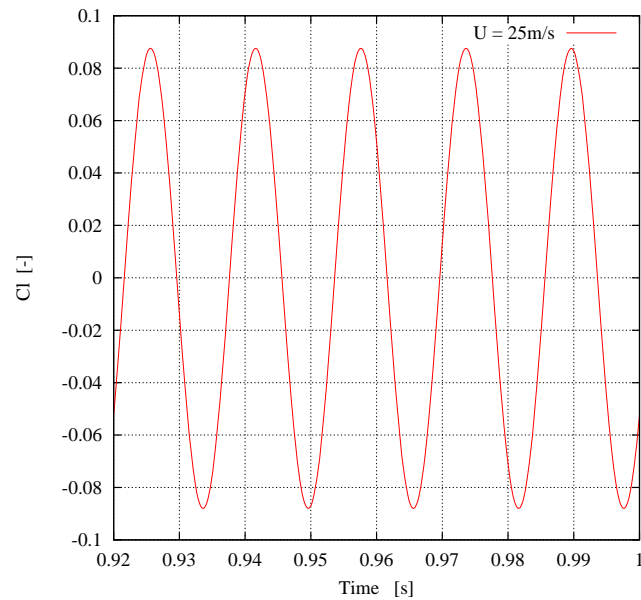


Figura 2.19 Coefficienti di forza per una corrente a 25 m/s: a) coefficiente di portanza, b) coefficiente di resistenza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

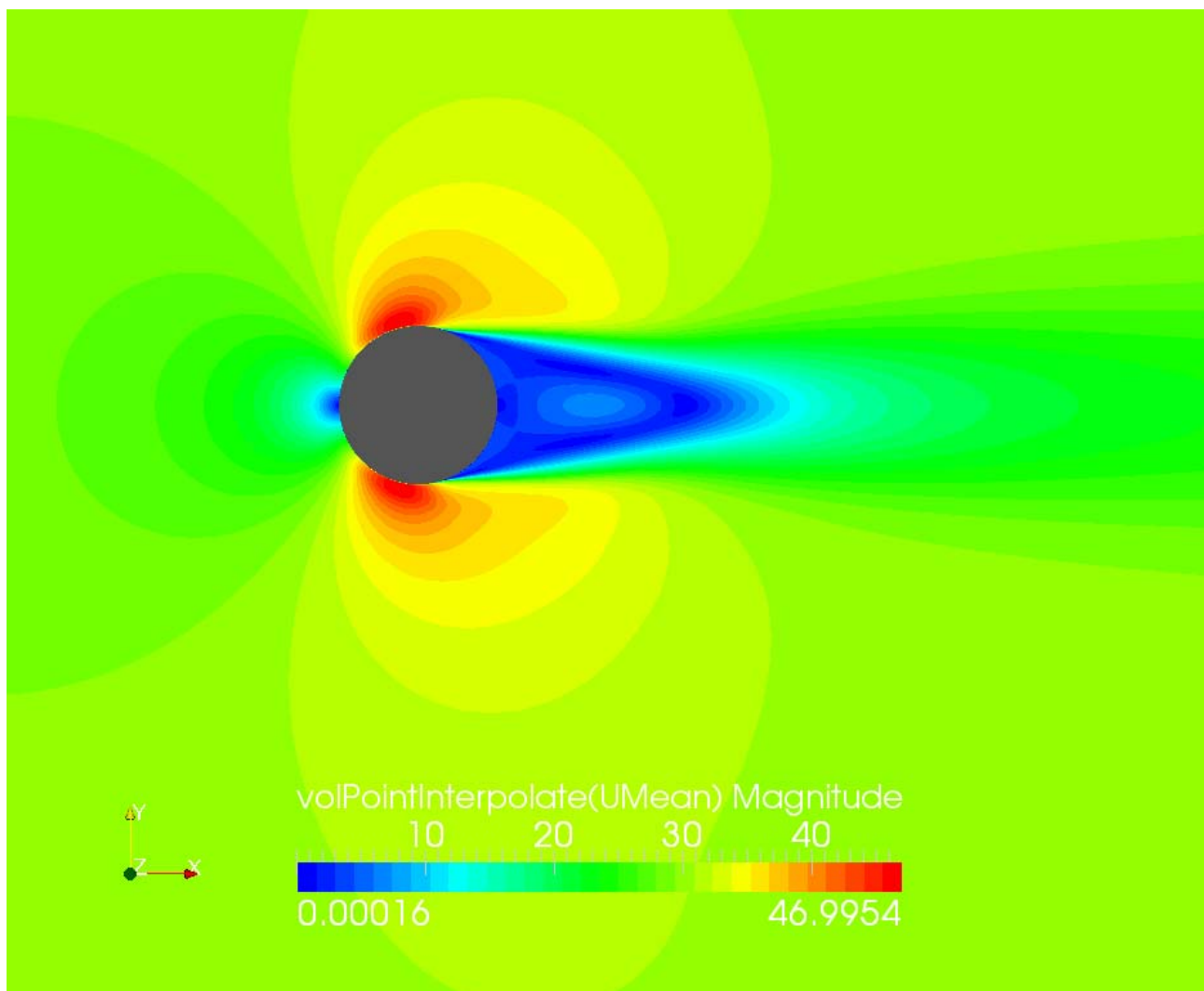


Figura 2.20 Campo di moto per una corrente a 30 m/s: modulo della velocità media

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

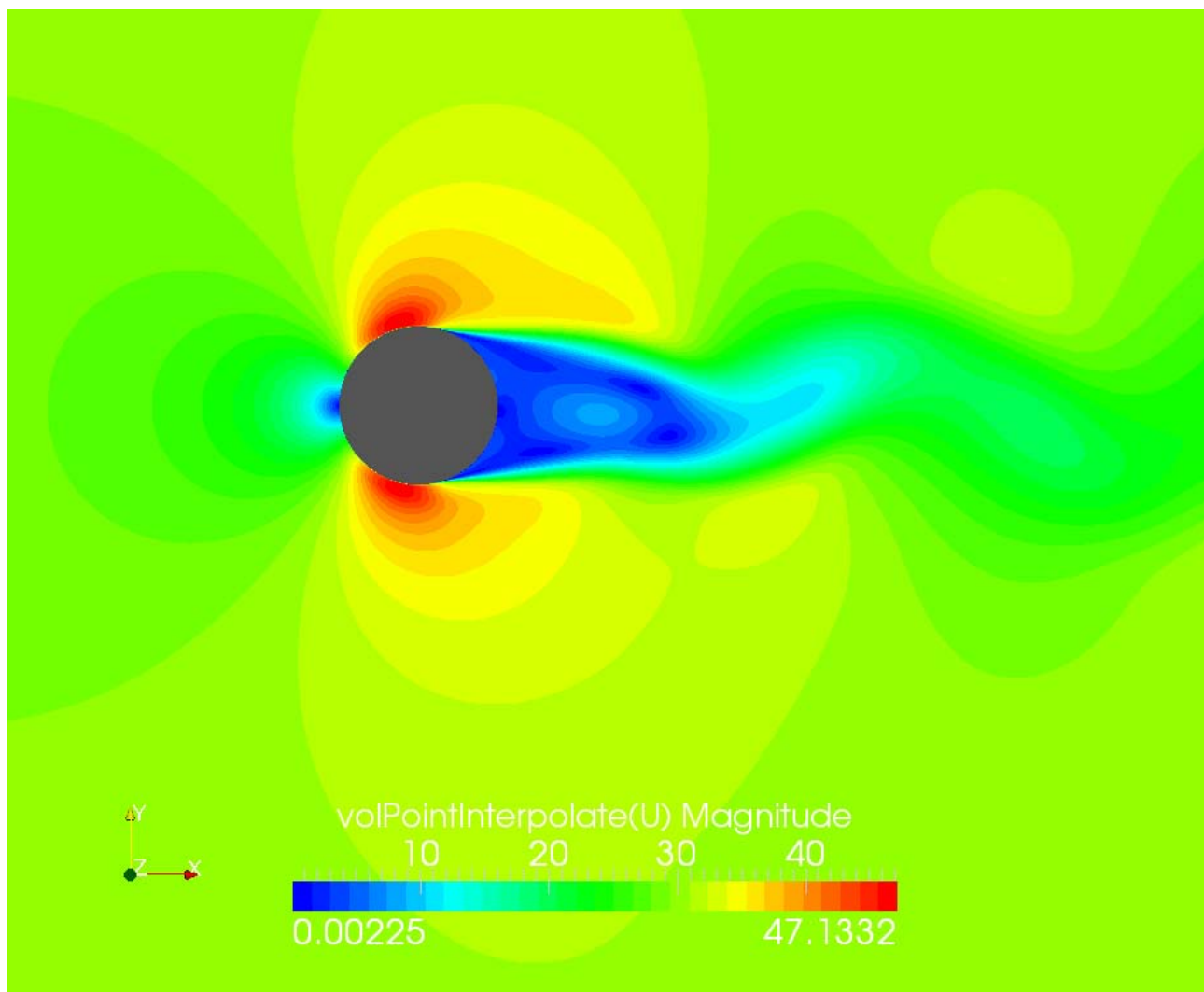


Figura 2.21 Campo di moto per una corrente a 30 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

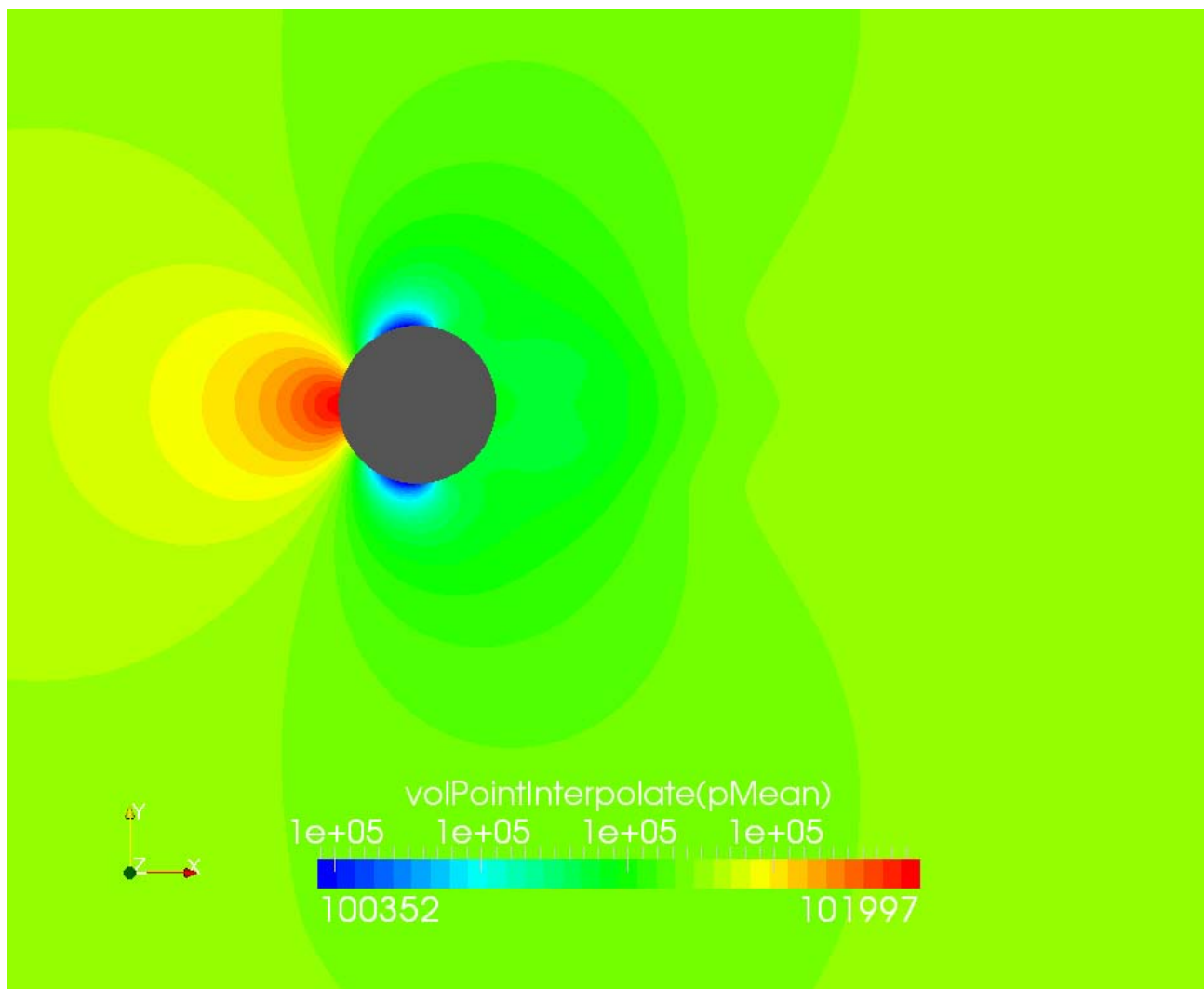


Figura 2.22 Campo di moto per una corrente a 30 m/s: pressione media

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

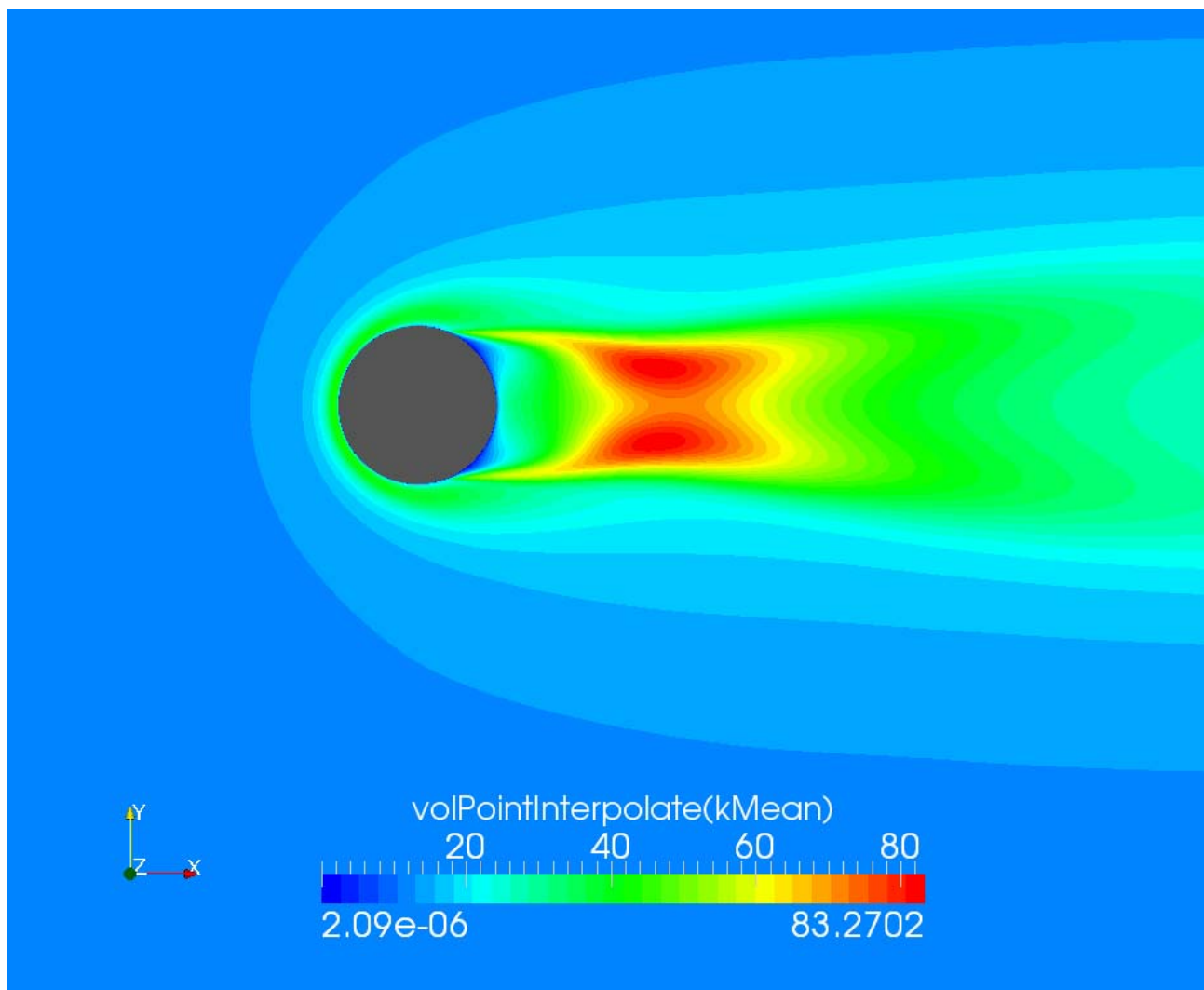


Figura 2.23 Campo di moto per una corrente a 30 m/s: energia cinetica turbolenta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

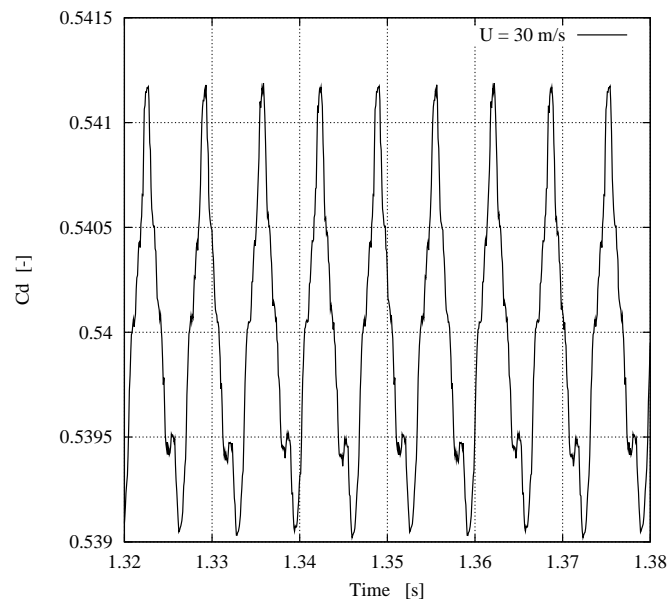
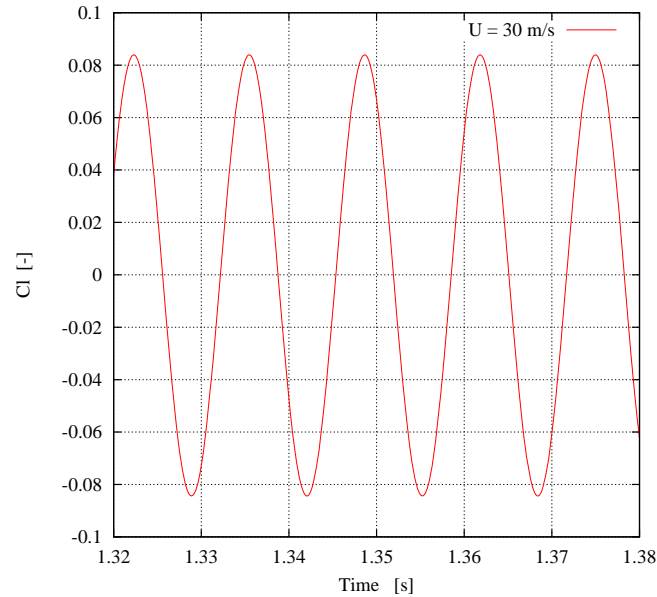


Figura 2.24 Coefficienti di forza per una corrente a 30 m/s: a) coefficiente di portanza, b) coefficiente di resistenza



 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

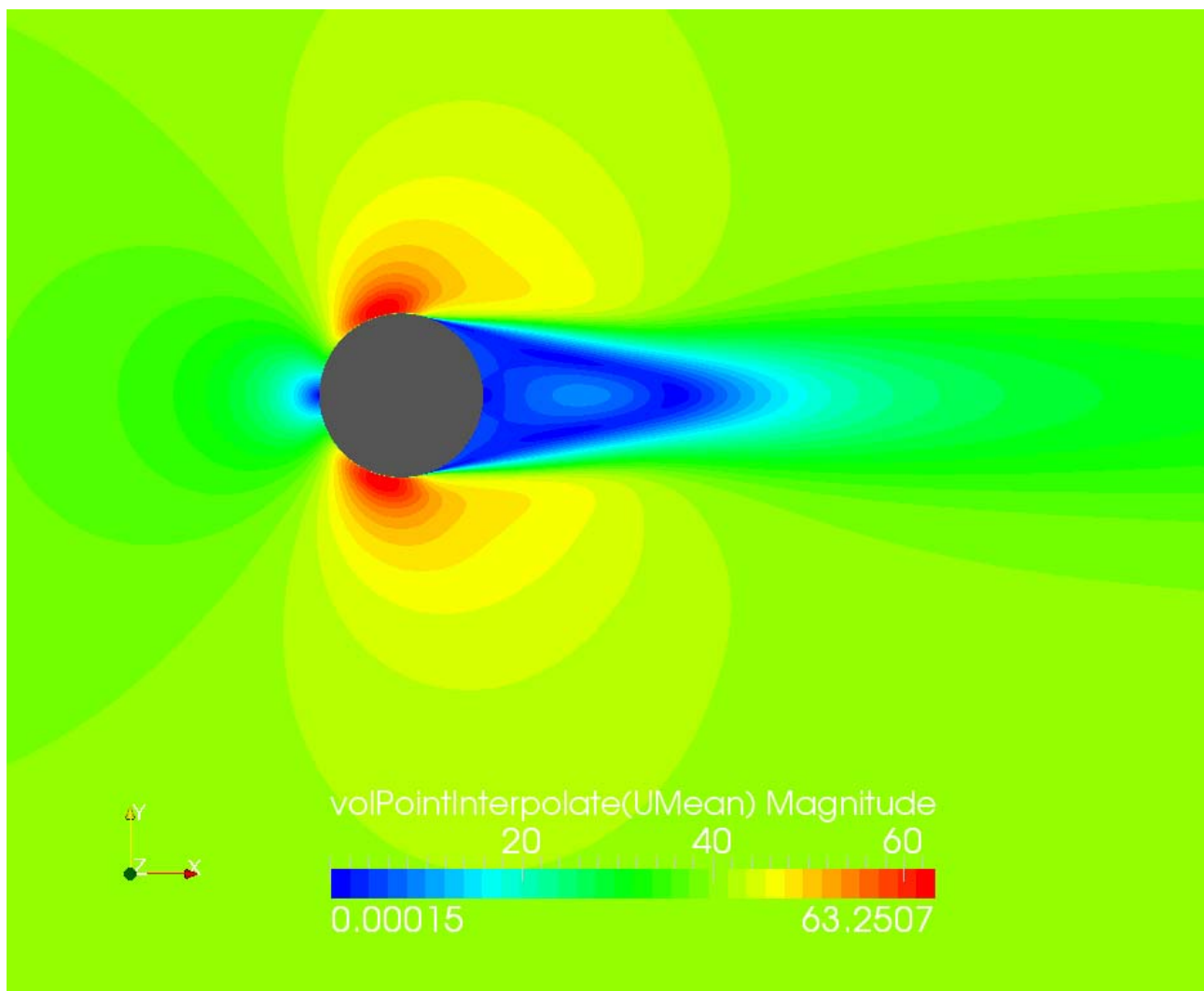


Figura 2.25 Campo di moto per una corrente a 40 m/s: a) modulo della velocità media

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

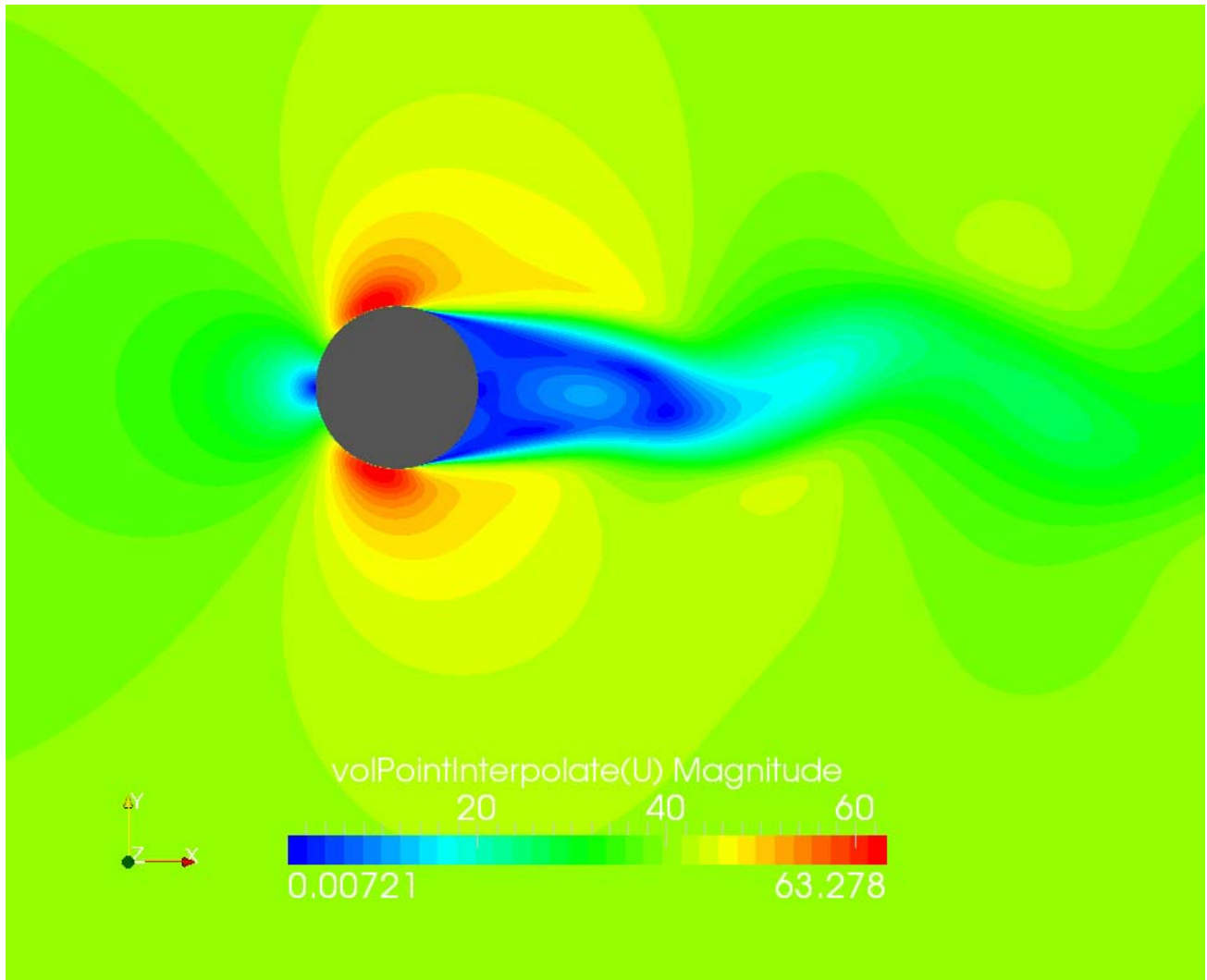


Figura 2.26 Campo di moto per una corrente a 40 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

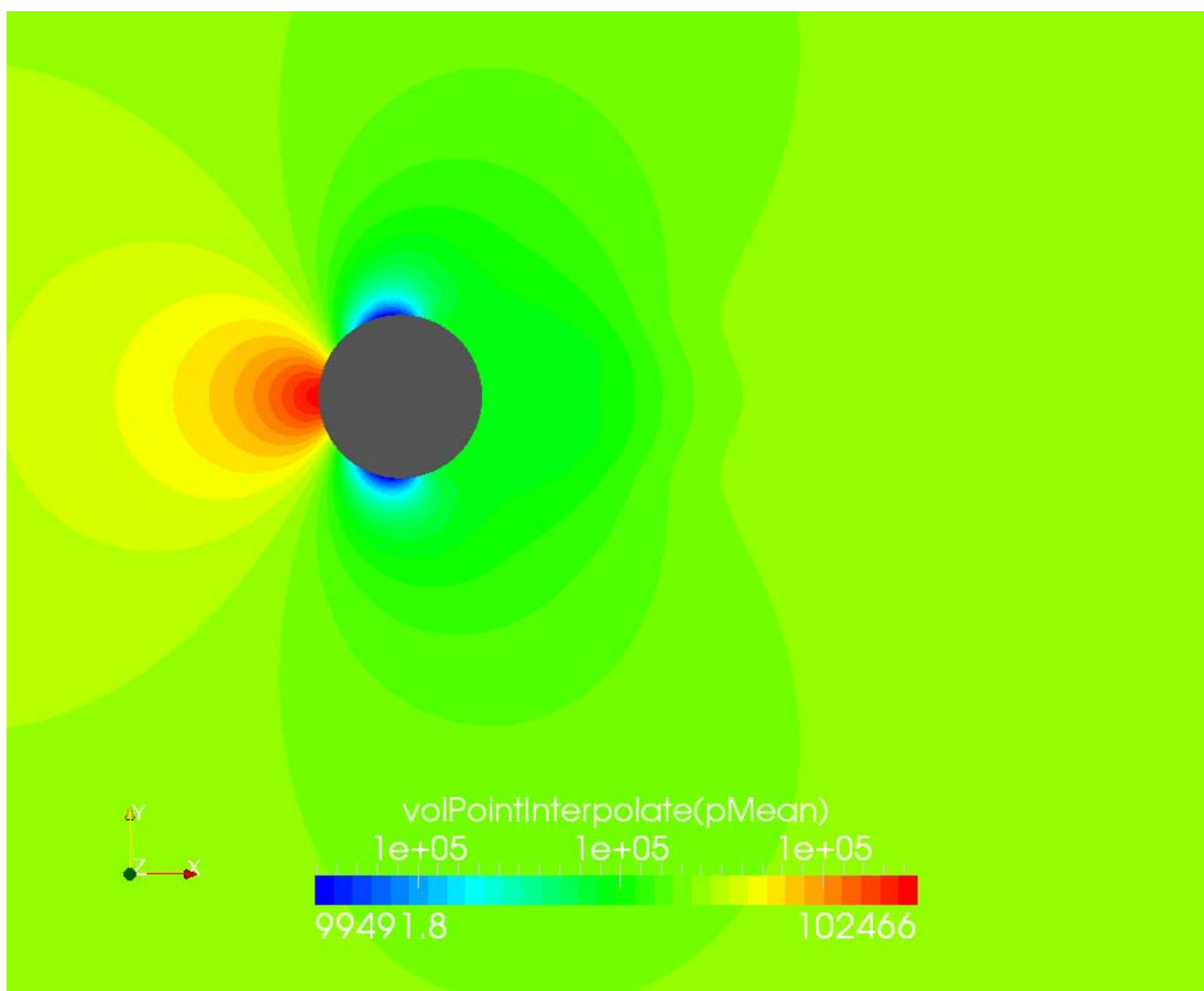


Figura 2.27 Campo di moto per una corrente a 40 m/s: pressione media

 <b>Stretto di Messina</b>	 EuroLink	<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

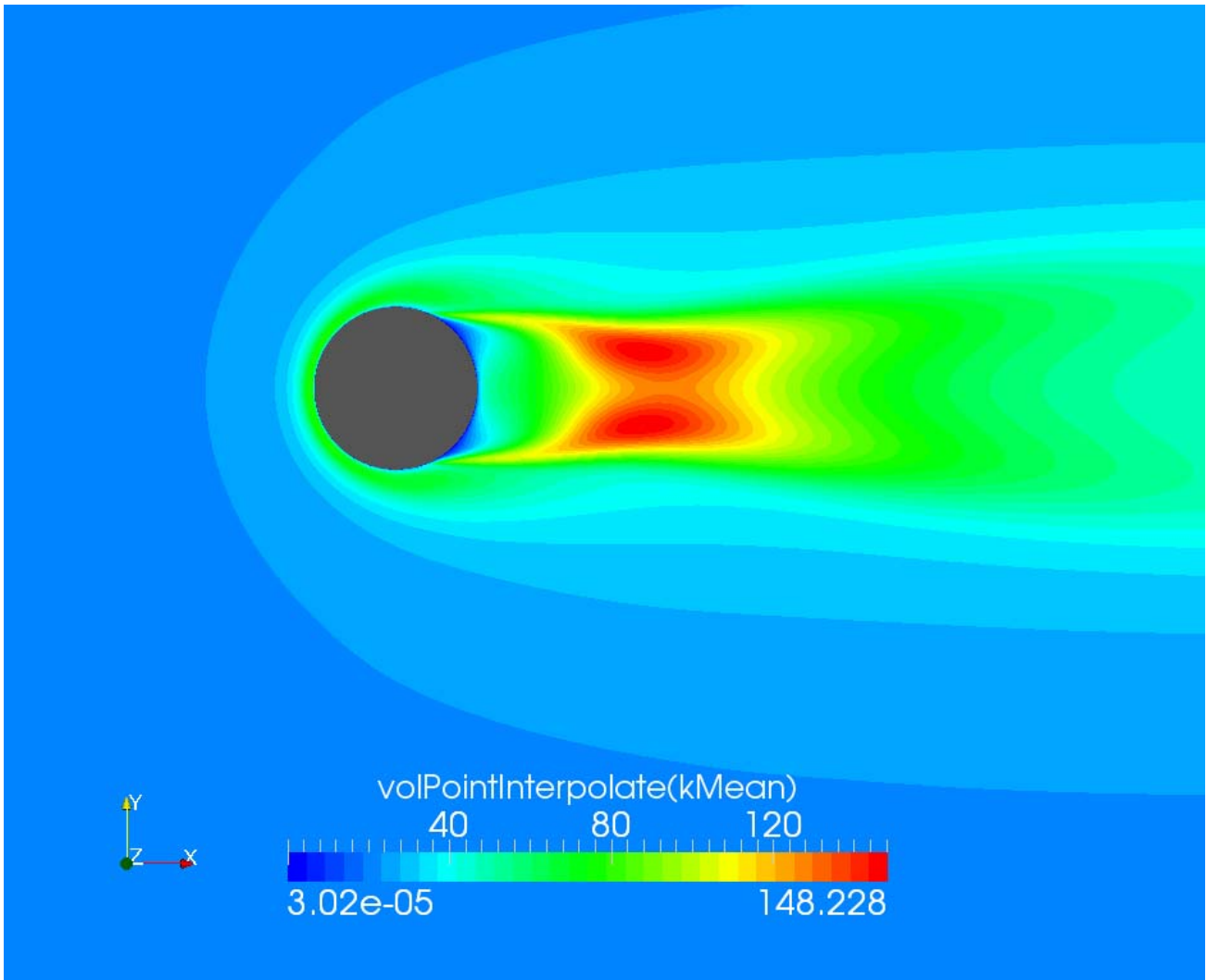
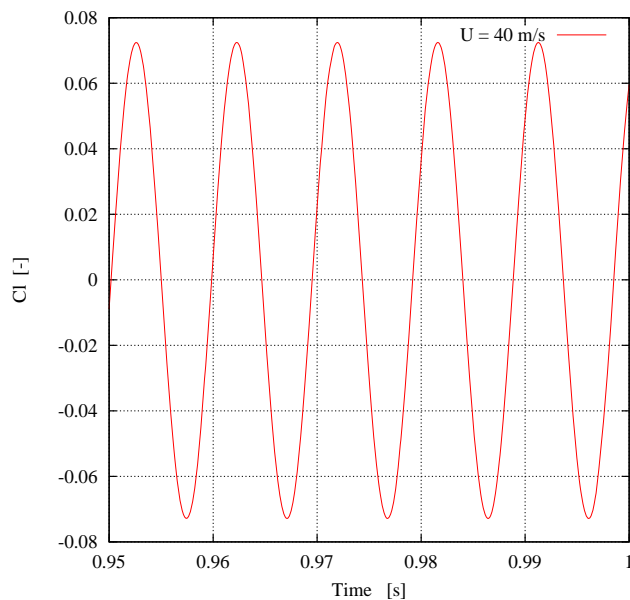
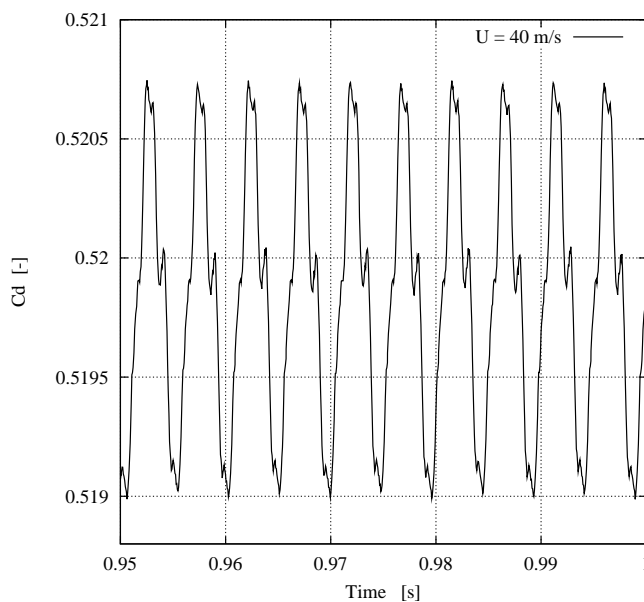


Figura 2.28 Campo di moto per una corrente a 40 m/s: energia cinetica turbolenta

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



**(a)**



**(b)**

Figura 2.29 Coefficienti di forza per una corrente a 40 m/s: a) coefficiente di portanza, b) coefficiente di resistenza

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

La Tabella 2.1 riporta i valori del  $C_{L\ RMS}$ , del  $C_{D\ RMS}$  e del numero di Strouhal alle diverse velocità simulate. Tali valori possono essere confrontati con i risultati sperimentali di Zan e Matsuda [18], ottenuti su un cilindro rugoso per diversi livelli di turbolenza all'ingresso. In questo caso, lo strato limite è completamente turbolento ed i valori dei coefficienti delle forze e del numero di Strouhal differiscono da quelli riportati in letteratura, riferiti ad un cilindro liscio investito da una corrente a bassa intensità turbolenta. In particolare, dalla Figura 2.30, si può osservare come il numero di Strouhal ottenuto numericamente si discosti dal valore classico di 0.2 riferito a un cilindro liscio, ma risulti compatibile con i valori sperimentali riferiti a cilindri il cui strato limite è completamente turbolento. Un comportamento analogo si ha anche per i valori di  $C_{L\ RMS}$  e  $C_{D\ RMS}$ , riportati in Figura 2.31 e Figura 2.32. Si noti che i risultati degli esperimenti presentano una notevole dispersione, in particolare per il livello di turbolenza all'ingresso pari al 13%.

Velocità, m/s	Re	St	$C_{L\ RMS}$	$C_{D\ RMS}$
10	70666.67	0.2458	0.0931	0.0642
20	141333.33	0.2560	0.0691	0.0574
25	176666.67	0.2652	0.0622	0.0556
30	212000	0.2689	0.0595	0.0540
40	282666.67	0.2735	0.0514	0.0520

Tabella 2.1 Valori del  $C_{L\ RMS}$ , del  $C_{D\ RMS}$  e del numero di Strouhal alle diverse velocità simulate

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

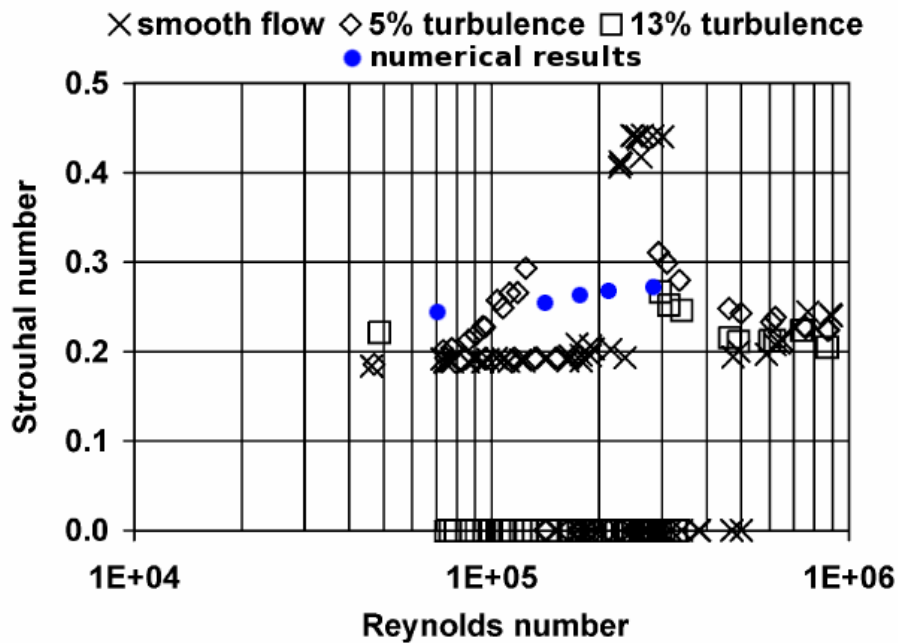


Figura 2.30 - Numero di Strouhal in funzione del numero di Reynolds, confronto con dati sperimentali.

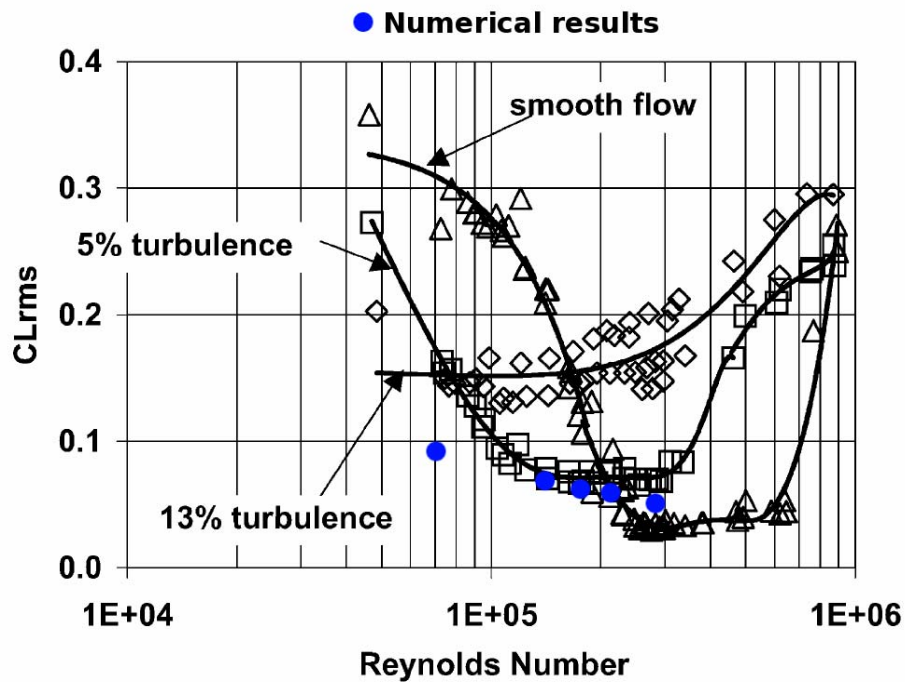


Figura 2.31 –  $C_{L_{RMS}}$  in funzione del numero di Reynolds, confronto con dati sperimentali.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

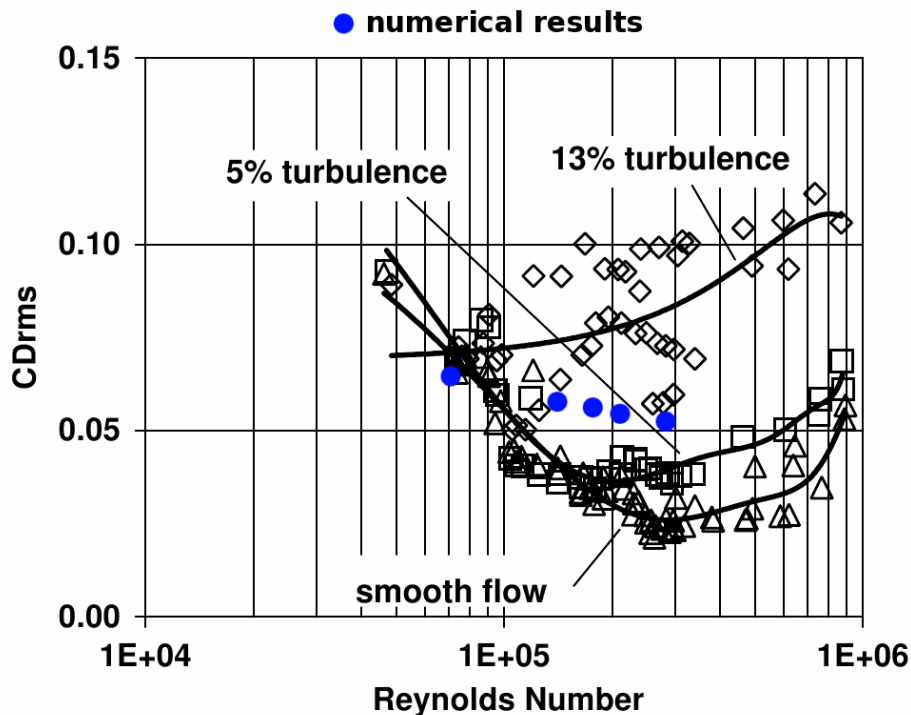


Figura 2.32 –  $C_{D_{RMS}}$  in funzione del numero di Reynolds, confronto con i dati sperimentali.

## 2.3 Emissioni acustiche

### 2.3.1.1 Validazione del modello aeroacustico

Per validare la procedura di calcolo aeroacustico, si sono confrontati i risultati ottenuti applicando la formulazione di Ffwoocs-Williams and Hawkings con quelli ottenuti usando la formula analitica derivata dalla formulazione di Curle. Per poter confrontare le due formulazioni è necessario ricordare che la formula di Curle è valida solo per un osservatore posto sulla normale del cilindro ad una distanza  $r$  molto più grande del diametro  $D$  e della lunghezza  $L$ . La formulazione di Curle prevede inoltre che le sorgenti acustiche abbiano una lunghezza di correlazione infinita, di conseguenza i dati numerici usati per il confronto con tale formulazione non conterranno le correzioni necessarie alla decorrelazione del segnale. Le emissioni acustiche verranno quindi valutate considerando un osservatore posto sulla normale al cilindro ad una distanza di  $r = 100D$  dal centro. In Figura 2.33 è possibile osservare un ottimo accordo tra la soluzione numerica ottenuta risolvendo l'equazione di Ffwoocs-Williams and Hawkings e la soluzione ottenuta con la formulazione di Curle approssimata.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

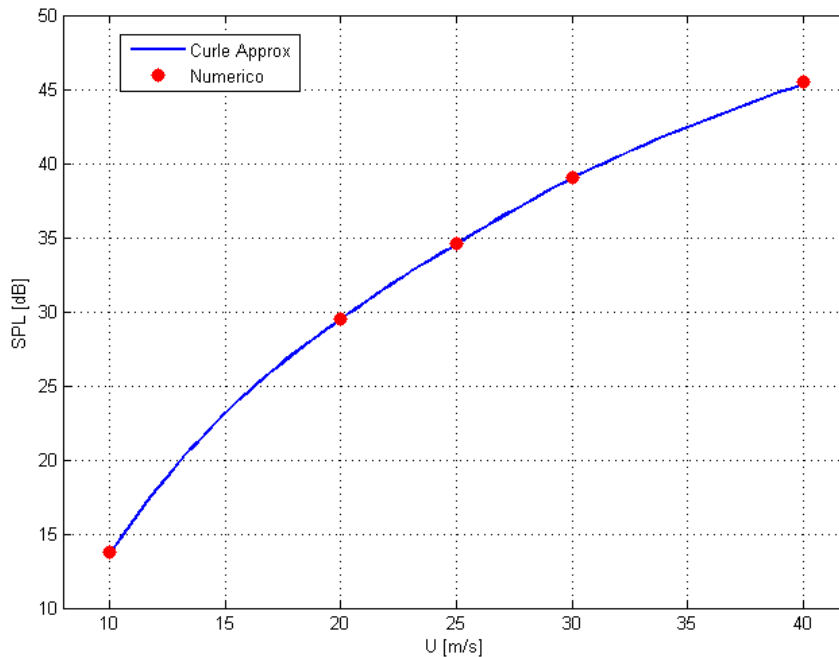


Figura 2.33 Confronto tra la soluzione numerica e la formulazione di Curle approssimata.

### 2.3.1.2 Sensibilità delle emissioni acustiche al variare della velocità

L'analisi delle emissioni acustiche dell'elemento di riferimento è stata effettuata risolvendo l'equazione di Ffowcs-Williams and Hawkings per un osservatore posto ad una distanza di  $r = 2D$  dal centro del cilindro. In Figura 2.34 è riportato l'andamento delle emissioni acustiche al variare della posizione angolare per le diverse velocità analizzate. Si può osservare come la direttività abbia un andamento dipolare, tipico dei toni eolici e come l'intensità del rumore emesso cresca all'aumentare della velocità del flusso. In Figura 2.35 è rappresentato lo spettro del rumore per un osservatore posto sulla normale del cilindro. Le emissioni acustiche sono chiaramente di tipo tonale, si ha infatti presenza di un picco principale, con frequenza uguale alla frequenza di shedding, ed una serie di toni secondari corrispondenti alle armoniche superiori. I toni secondari presentano un'intensità molto più bassa rispetto a quella del tono principale, pertanto il loro contributo al rumore complessivo può ritenersi praticamente trascurabile. All'aumentare della velocità aumenta la frequenza di rilascio dei vortici, di conseguenza aumenta anche la frequenza del tono principale.

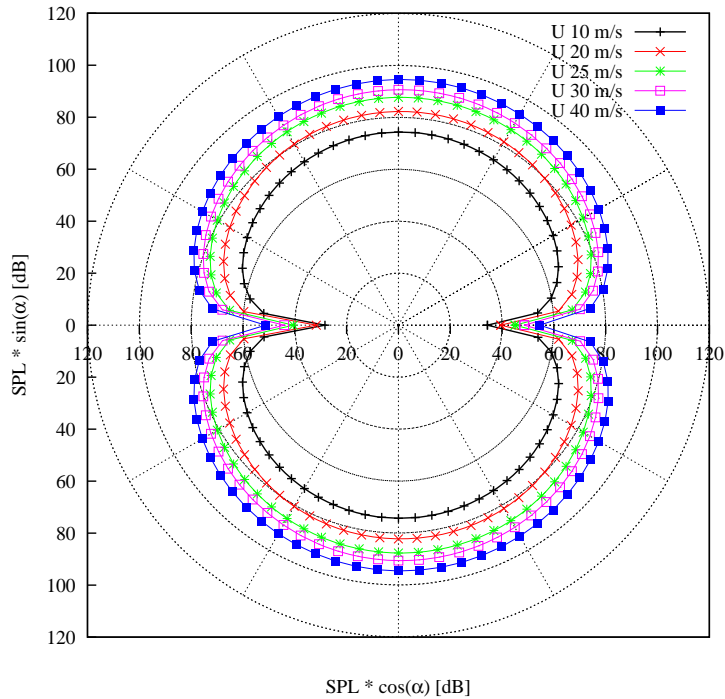


Figura 2.34 Direttività dell'emissione acustica

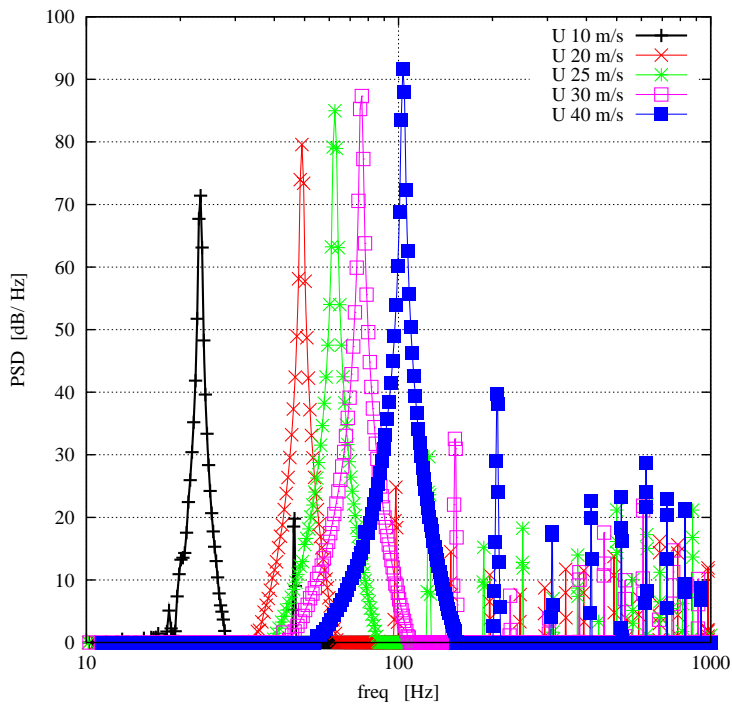


Figura 2.35 Spettri acustici valutati a 90°

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 2.4 Conclusioni

Le analisi sull'elemento cilindrico di riferimento hanno evidenziato l'esistenza di un fenomeno di shedding di vortici, identificato come potenziale sorgente di rumore aeroacustico. Le emissioni sono caratterizzate da picchi tonali di ampiezza non trascurabile e nel range di frequenze udibili dall'orecchio umano. L'ampiezza, inoltre, cresce all'aumentare della velocità del vento.

Il numero adimensionale caratterizzante lo shedding è il numero di Strouhal definito come  $St = fD/U$ , con  $f$  la frequenza di rilascio dei vortici,  $D$  il diametro del cilindro e  $U$  la velocità del vento. A seguito delle analisi fluidodinamiche per diverse velocità del vento, si osserva che il numero di Strouhal associato allo shedding si attesta attorno a 0.26. Pertanto, si può definire "diametro critico" la dimensione del cilindro per cui il picco principale presenti una frequenza ai limiti dell'udibile (20 Hz). Sarà, quindi, necessario condurre un'analisi approfondita su tutti gli elementi lineari con diametro minore di  $D_{critico}$ .



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3 Analisi fluidodinamica dell'impalcato

Il campo di moto che fluisce attorno alle strutture del ponte assume una conformazione complessa che necessita di approfondimenti per le successive valutazioni. Si è ritenuto pertanto utile eseguire una simulazione numerica del campo di moto fluidodinamico attorno alla sezione dell'impalcato. I risultati ottenuti da questa analisi permetteranno di individuare, in base alla velocità della corrente che li investe, gli elementi che potenzialmente potrebbero avere delle emissioni acustiche non trascurabili.

#### 3.1 Impostazione delle simulazioni

Considerando l'elevato valore del rapporto tra lunghezza e larghezza dell'impalcato, si ritiene non restrittivo considerare bidimensionale il campo di moto fluidodinamico. Assumendo come dimensione caratteristica la larghezza della sede stradale, ossia  $L \approx 15$  m, il numero di Reynolds che caratterizza l'impalcato nelle condizioni di vento medio considerate nei paragrafi precedenti è dell'ordine di  $10^7$ . In questi regimi, si hanno campi di moto completamente turbolenti, con strati limite molto sottili rispetto alle dimensioni geometriche caratteristiche. Pertanto, per poter simulare in dettaglio la fluidodinamica di parete le risorse computazionali necessarie risultano ingenti. Si è quindi ritenuto opportuno risolvere il campo di moto mediante modelli di turbolenza di tipo URANS uniti a modellizzazione "wall functions" a parete. Considerati i bassi valori del numero di Mach ( $M < 0.1$  in tutte le condizioni di vento) e non essendo interessati, in questa fase, allo studio delle sorgenti acustiche, si è scelto di adottare un modello URANS per flussi incompressibili, in modo da sfruttare la sua maggiore efficienza numerica in condizioni di bassa velocità. Come per il caso degli elementi lineari, si è adottato il modello di turbolenza " $k - \omega$  SST" [1]. Tale modello è largamente utilizzato in letteratura per flussi in condizioni analoghe e fornisce risultati accurati nel caso di gradienti di pressione avversi. Le simulazioni fluidodinamiche sono eseguite utilizzando il codice di calcolo *OpenFOAM*®.

Gli elementi strutturali inclusi nel modello di calcolo sono : la sede stradale, la sede ferroviaria, le barriere frangivento esterne ed interne. Si è scelto di modellizzare le barriere con degli ostacoli aventi le stesse dimensioni geometriche ed un rapporto pieno/vuoto pari alla porosità delle barriere considerate. Mediante questa soluzione, è possibile ottenere una stima del campo macroscopico di pressione e velocità in prossimità delle griglie senza dover discretizzare dettagliatamente i fori, con un risparmio considerevole in termini di tempi di calcolo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.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: left; padding: 2px;">F0</td> <td style="text-align: left; 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						

### 3.1.1 Dominio di calcolo

Data la complessità della geometria da simulare non è stato possibile discretizzare il dominio con una griglia completamente strutturata. Si è pertanto deciso di utilizzare una discretizzazione strutturata solo nella regione esterna (Figura 3.1), mentre in prossimità dell'impalcato si è usata una griglia non strutturata (Figura 3.2 e Figura 3.3). Il dominio di calcolo è suddiviso in circa 560000 elementi quadrangolari raffinati a parete in modo da garantire una  $y^+$  dell'ordine delle centinaia su tutto l'impalcato (Figura 3.4).

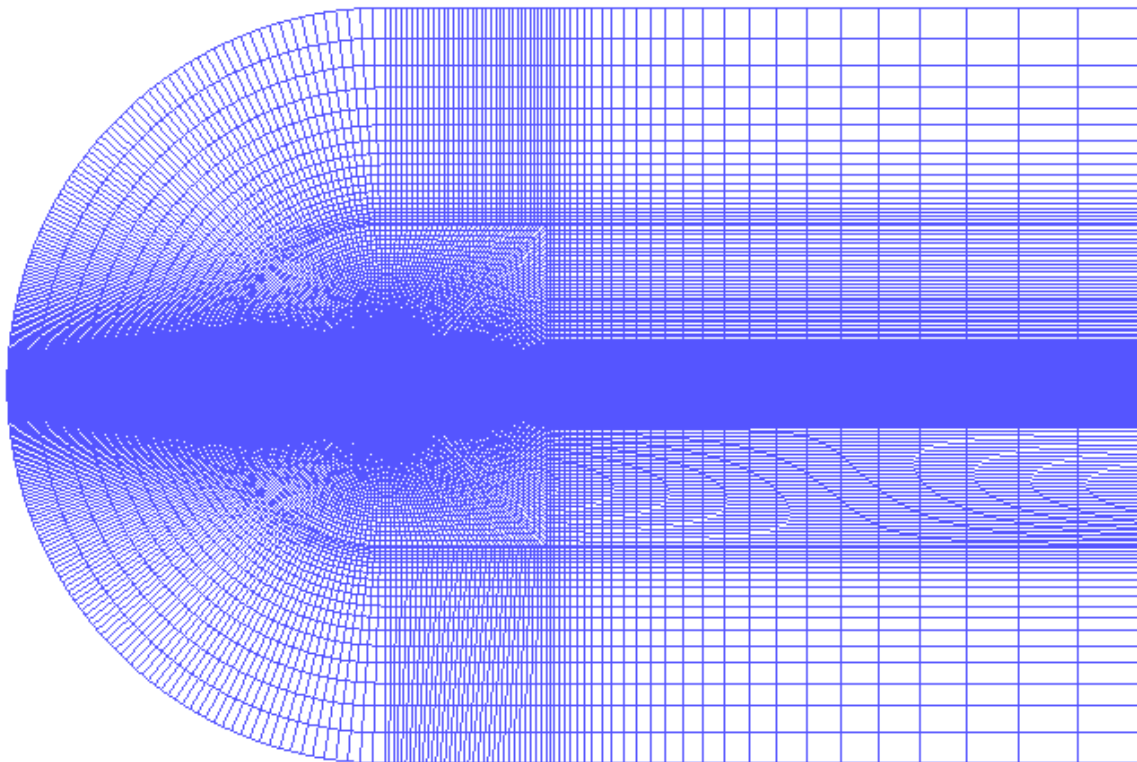


Figura 3.1 Griglia di calcolo usata per discretizzare il dominio

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

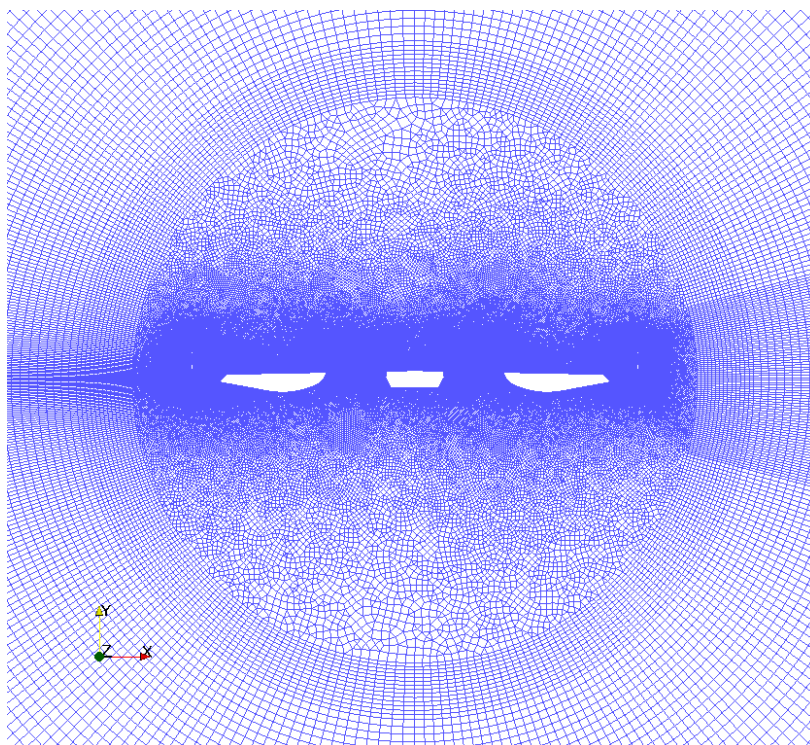


Figura 3.2 Passaggio dalla griglia non strutturata alla griglia strutturata

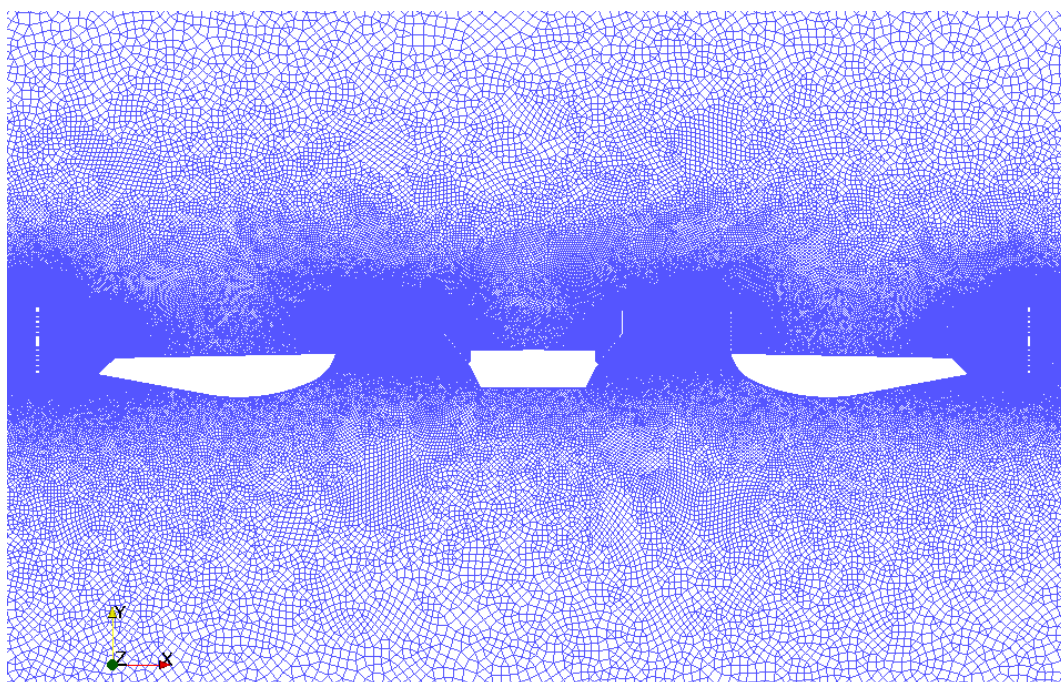


Figura 3.3 Dettaglio della griglia in prossimità dell'impalcato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

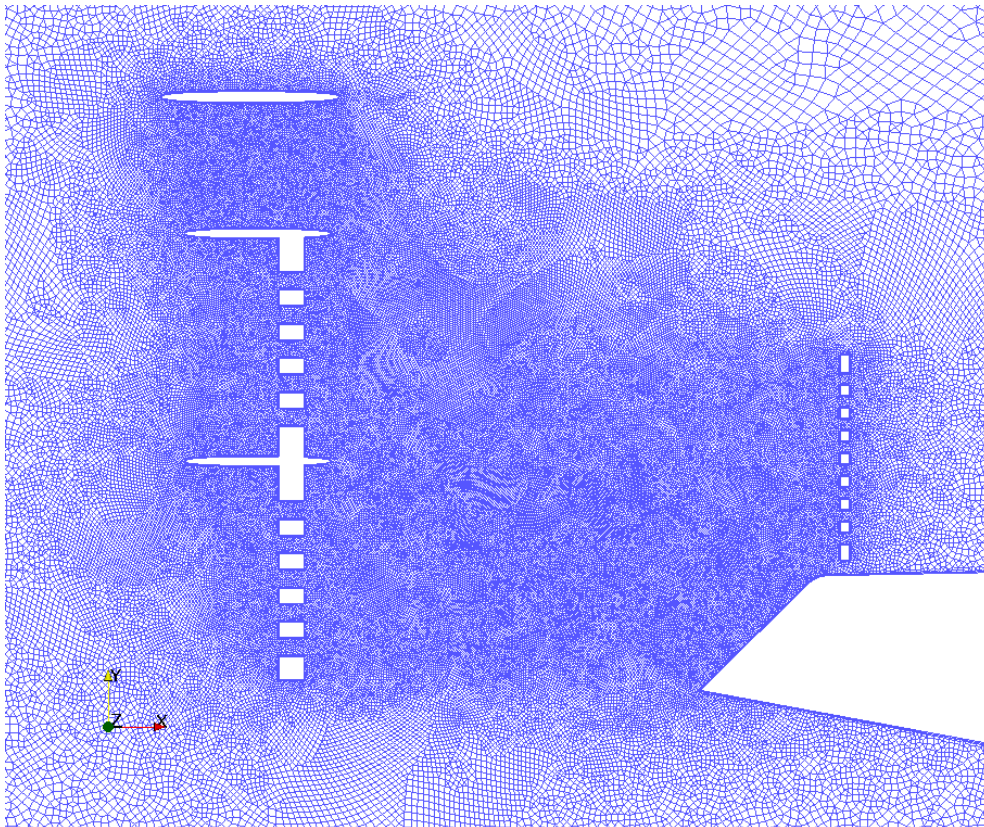


Figura 3.4 Dettaglio della discretizzazione delle barriere frangivento esterne

### 3.1.2 Condizioni al contorno

Per il calcolo del campo di moto intorno all'impalcato sono state adottate le seguenti condizioni al contorno:

- all' ingresso si è imposta: la velocità,  $U = 25 \text{ m/s}$ , l'energia cinetica turbolenta,  $k = \frac{3}{2}(I \cdot U)^2$  e la frequenza di dissipazione,  $\omega = 5 \frac{U}{L_D}$ , ove l'intensità turbolenta in ingresso è posta pari a  $I = 0.1$  e  $L_D = 75 \text{ m}$ ;
- sul bordo superiore ed inferiore supponendo di essere in campo indisturbato, si applicano condizioni di *slip wall*;
- all'uscita si impone la condizione di gradiente nullo per la velocità ed un valore di pressione ambiente pari a  $p = 101325 \text{ Pa}$ ;
- sulle pareti si impone che la velocità sia nulla.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 3.2 Modello di calcolo

Il solutore di *OpenFOAM*® che risolve le equazioni URANS incompressibili è denominato *pisoFoam*. E' noto che la risoluzione numerica delle equazioni della fluidodinamica mediante un approccio collocato genera oscillazioni del campo di pressione dovute all'accoppiamento tra questo e il campo di velocità. Per prevenire l'insorgenza delle oscillazioni, *pisoFoam* adotta l'algoritmo *PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)* per l'accoppiamento pressione-velocità. Gli operatori differenziali sono discretizzati utilizzando schemi numerici *upwind* lineari per i termini convettivi, lineari per i termini diffusivi e *backward-Euler* impliciti per le derivate temporali. Così è possibile ottenere un'accuratezza numerica del 2° ordine, garantendo la stabilità della soluzione. I sistemi algebrici derivanti dalla discretizzazione delle equazioni sono stati risolti mediante metodi *Algebraic Multi-Grid (AMG)* per l'equazione della pressione e *Gradiente Bi-Coniugato Precondizionato (PBCG)* per le restanti equazioni.

### 3.3 Risultati delle simulazioni fluidodinamiche

Le simulazioni fluidodinamiche condotte hanno evidenziato un campo di moto fortemente influenzato dalla barriera frangivento esterna. Infatti, considerando una corrente che investe la sezione in esame da sinistra a destra, a valle della griglia esterna nasce una zona di bassa velocità media che si estende lungo tutto l'impalcato (Figura 3.5). In Figura 3.6 sono state tracciate le linee di corrente, tangenti alla velocità media. Da tale figura si può notare che la componente verticale della velocità sia minima. Infatti, la maggior parte delle linee di corrente restano pressoché indisturbate passando sopra o sotto la sezione dell'impalcato. L'effetto della barriera esterna è riscontrabile anche osservando i vettori di velocità media e la vorticità in direzione *y* (Figura 3.7 e Figura 3.11). Inoltre, analizzando la pressione media è evidente una bolla di sovrappressione a monte della barriera, segno di una zona di rallentamento del flusso (Figura 3.12). Per poter meglio visualizzare il campo di moto non stazionario alcuni istanti della storia temporale della velocità sono riportati da Figura 3.16 a Figura 3.24.

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

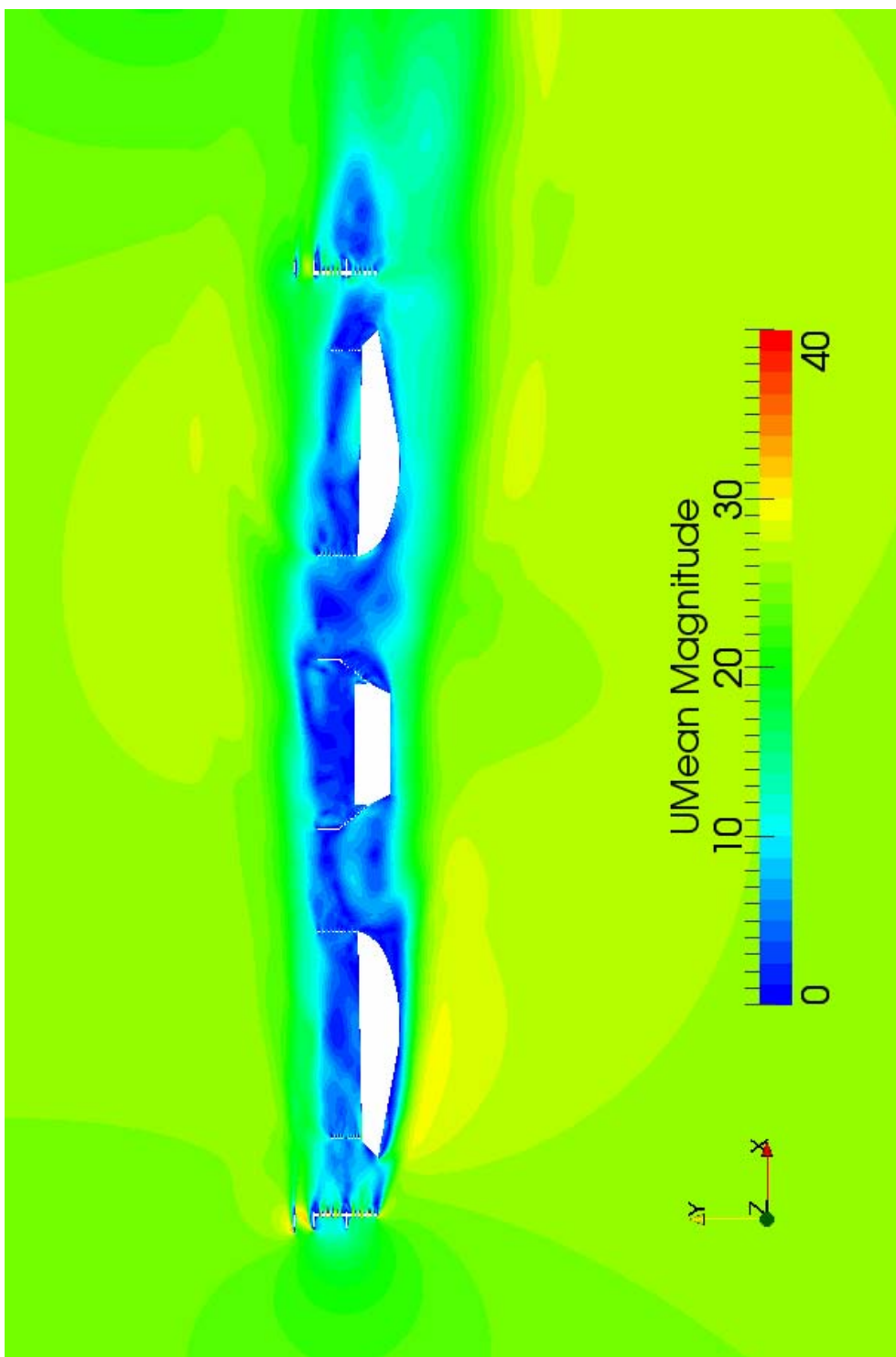


Figura 3.5 Campo di velocità media in prossimità dell'impalcato, m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

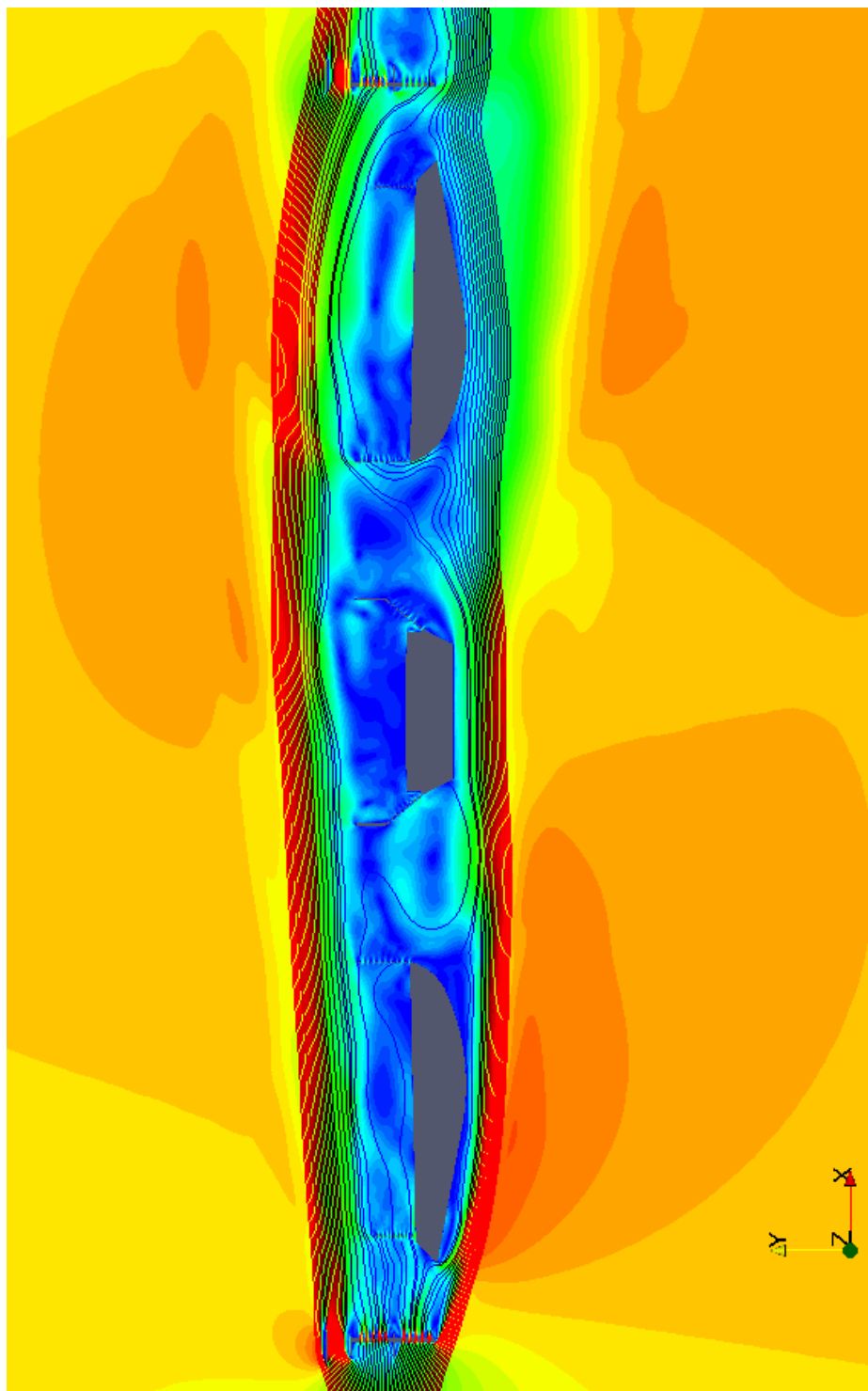


Figura 3.6 Linee di corrente del campo medio in prossimità dell'impalcato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

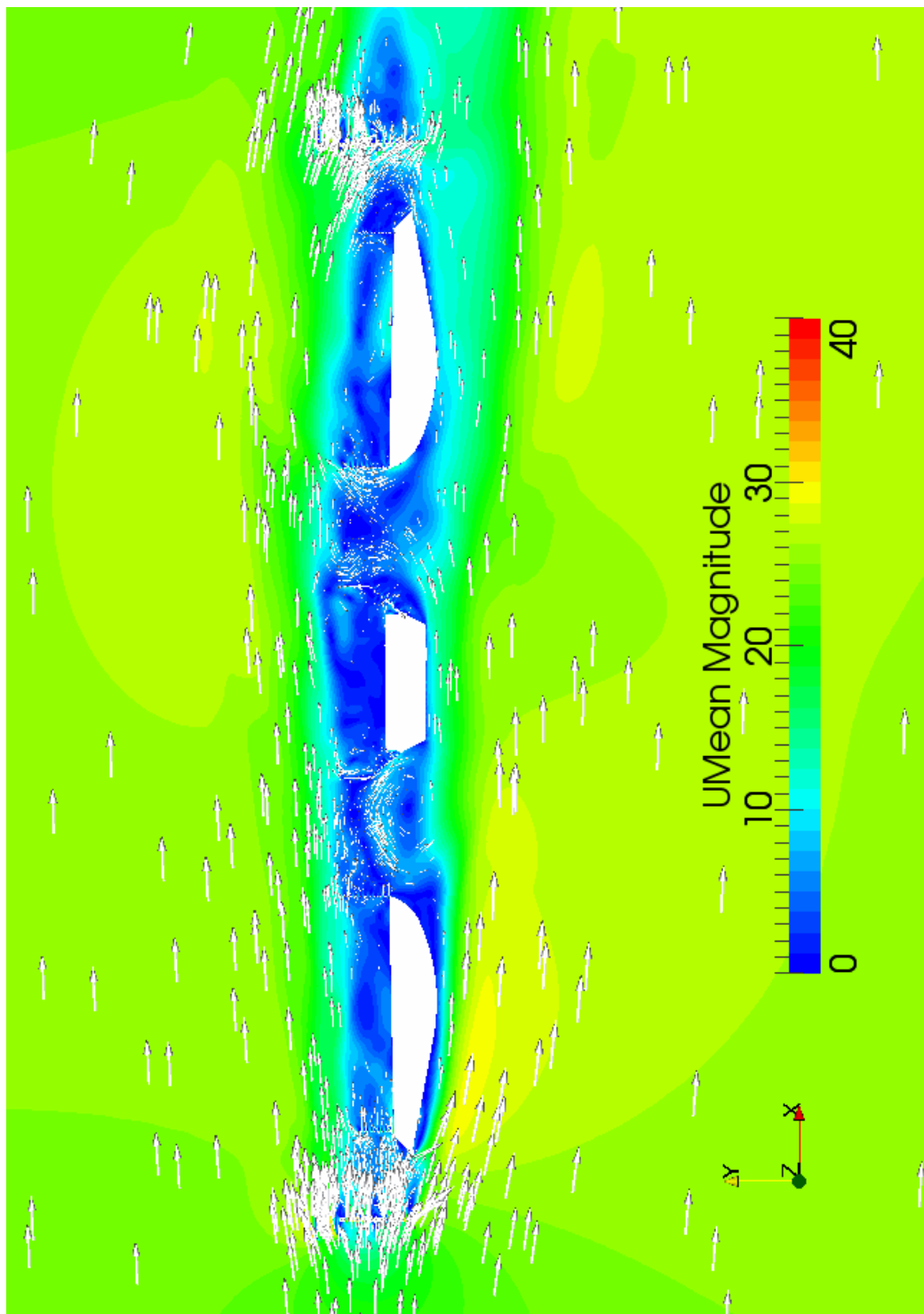


Figura 3.7 Vettori del campo di velocità medio in prossimità dell'impalcato

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

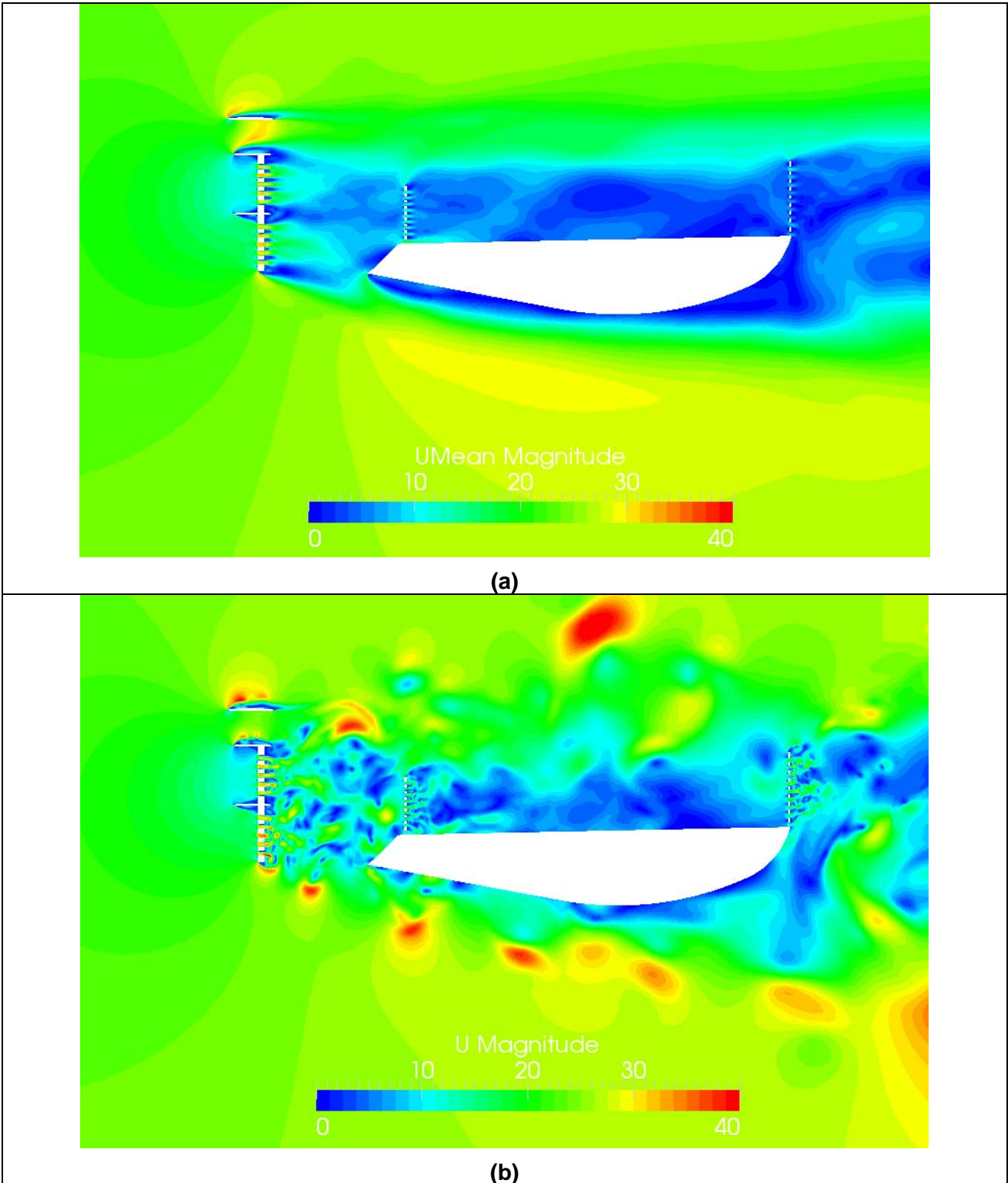
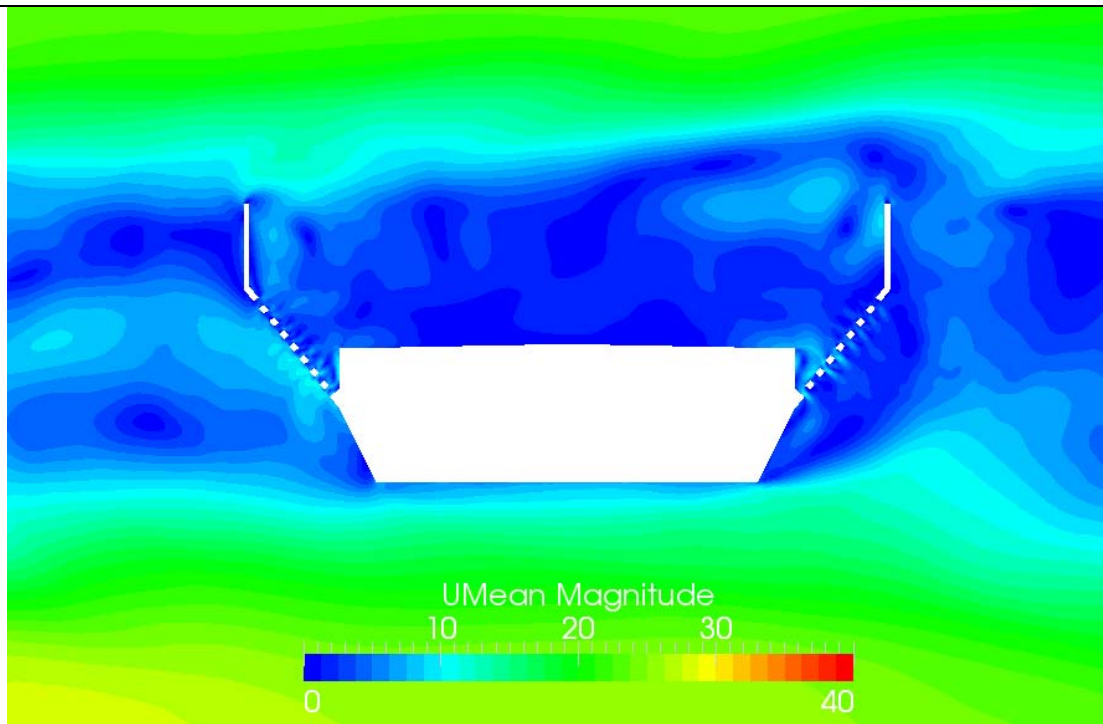
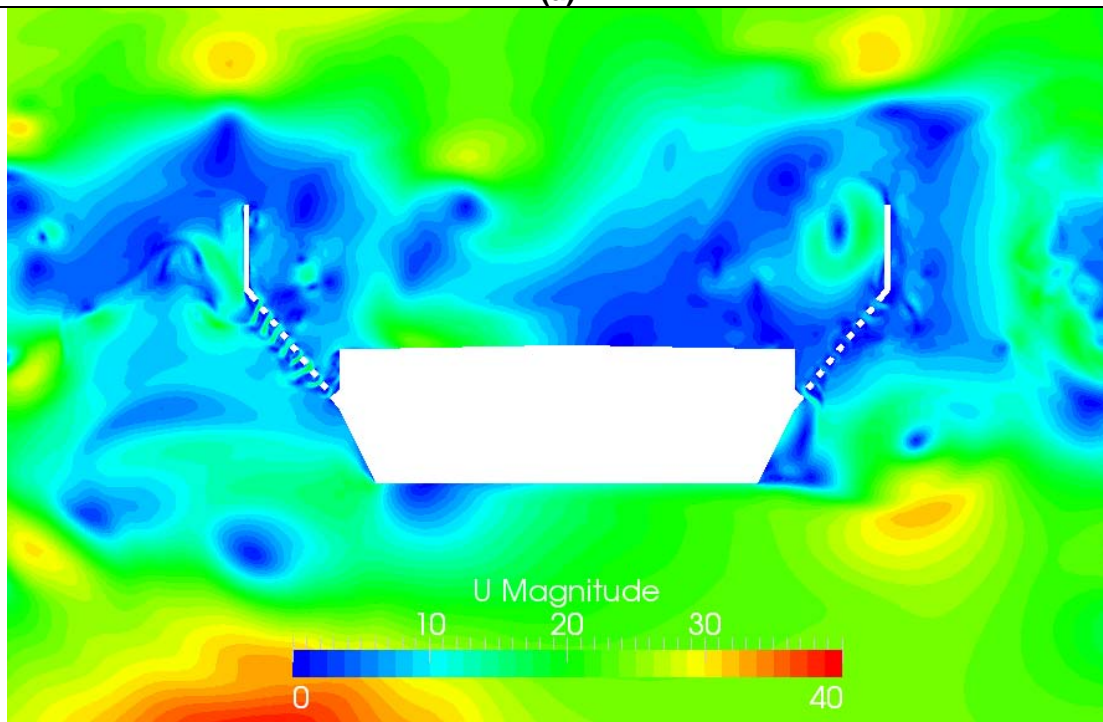


Figura 3.8 Dettaglio della seda stradale di sinistra: a) velocità media, m/s b) velocità istantanea, m/s



(a)



(b)

Figura 3.9 Dettaglio della seda ferroviaria: a) velocità media, m/s b) velocità istantanea, m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

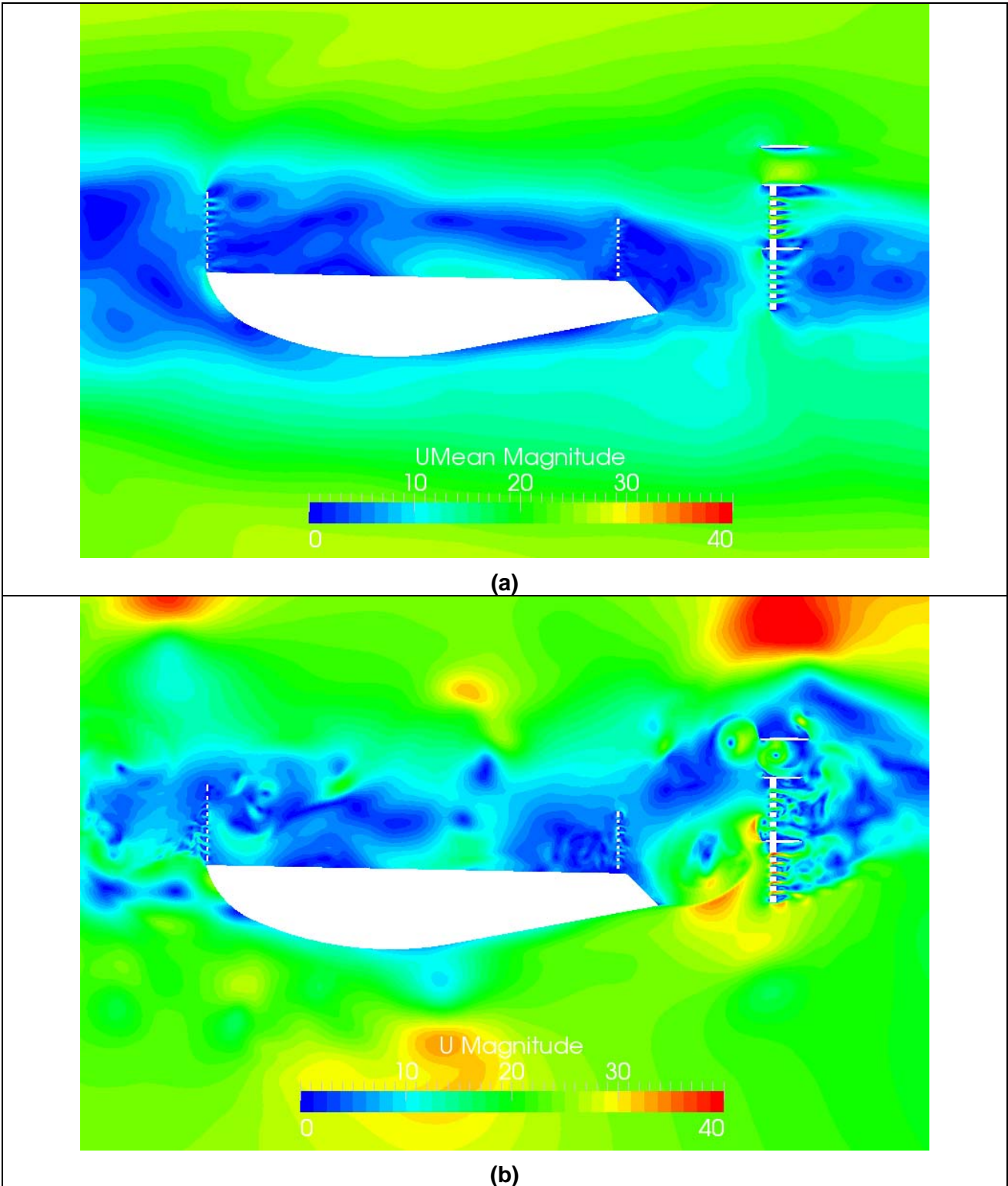


Figura 3.10 Dettaglio della seda stradale di destra: a) velocità media, m/s b) velocità istantanea, m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

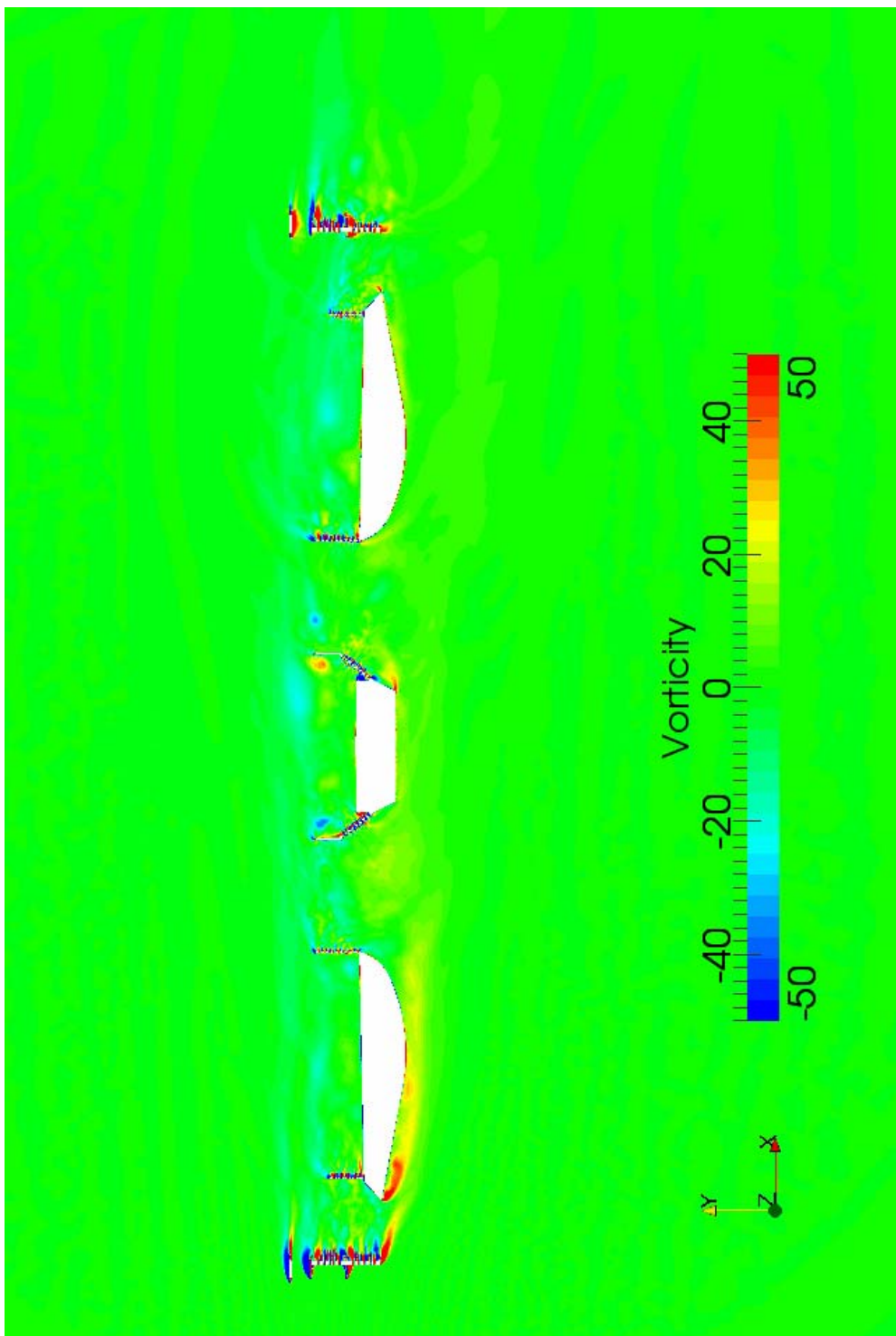


Figura 3.11 Vorticità media in prossimità dell'impalcato, 1/s



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

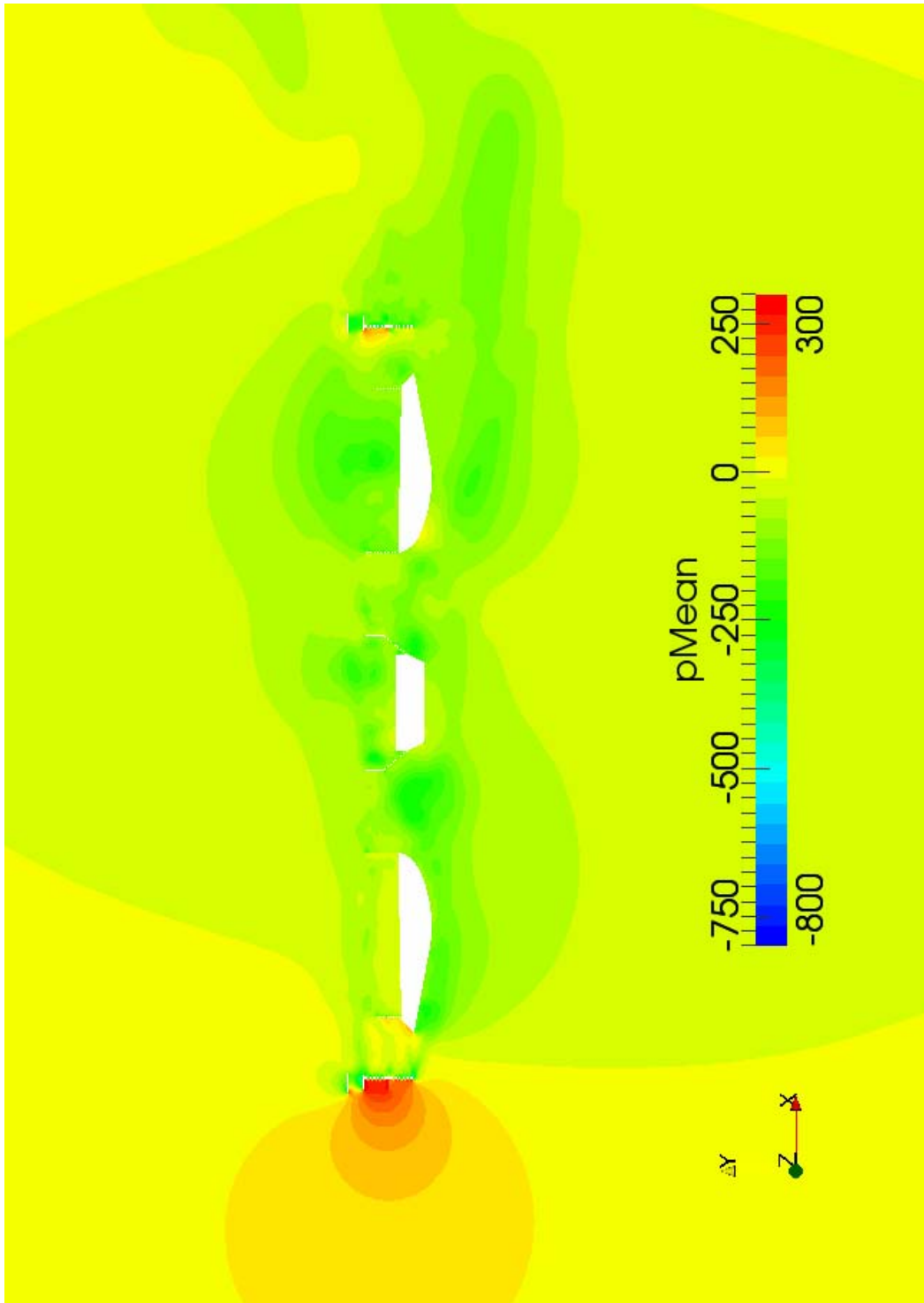


Figura 3.12 Campo di pressione medio in prossimità dell'impalcato, Pa

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

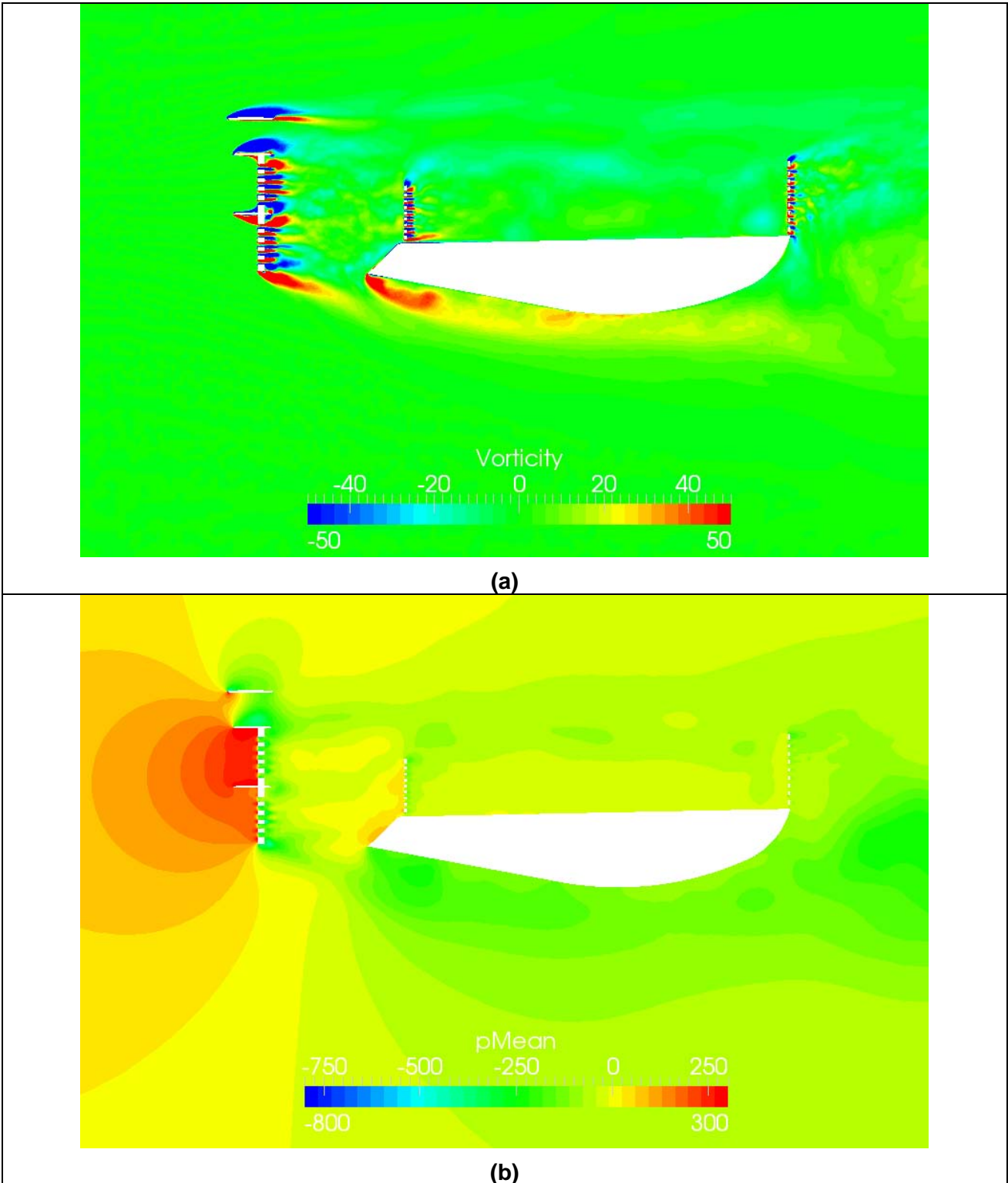
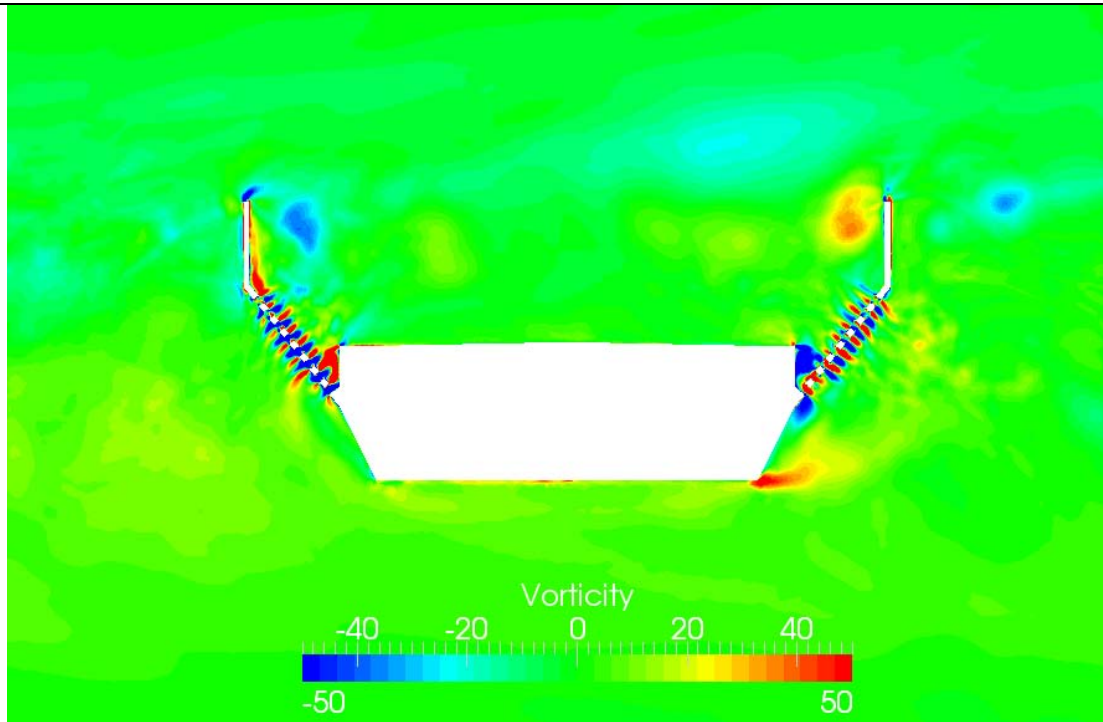
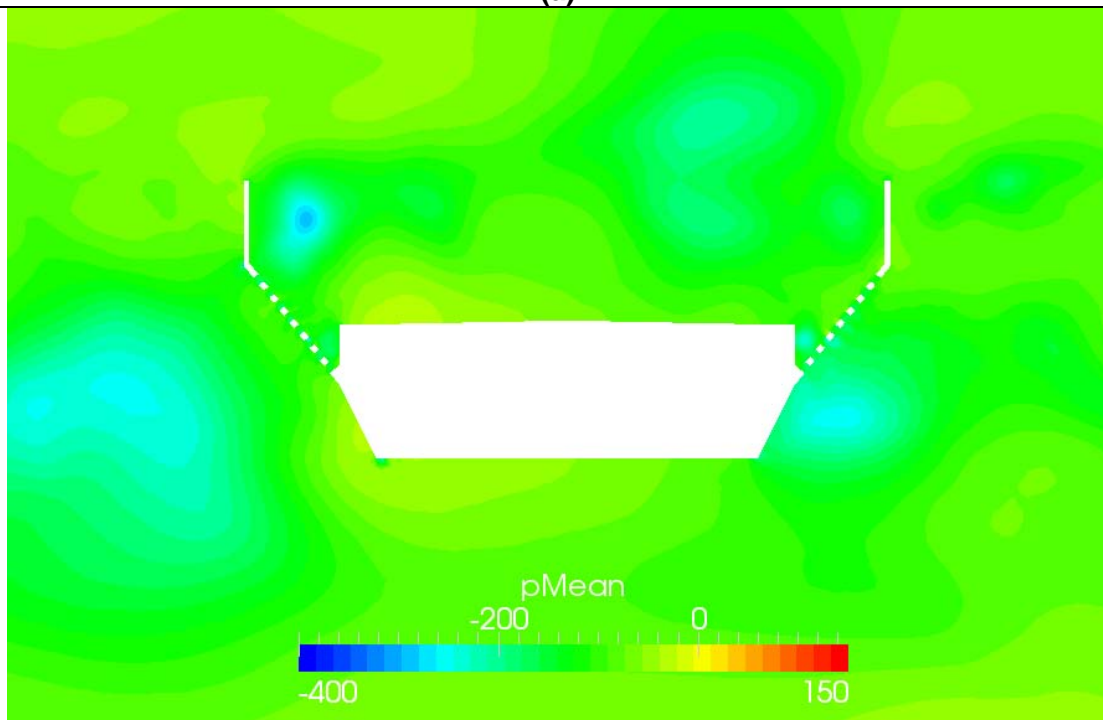


Figura 3.13 Dettaglio della seda stradale di sinistra: a) vorticità media, 1/s b) pressione media, Pa

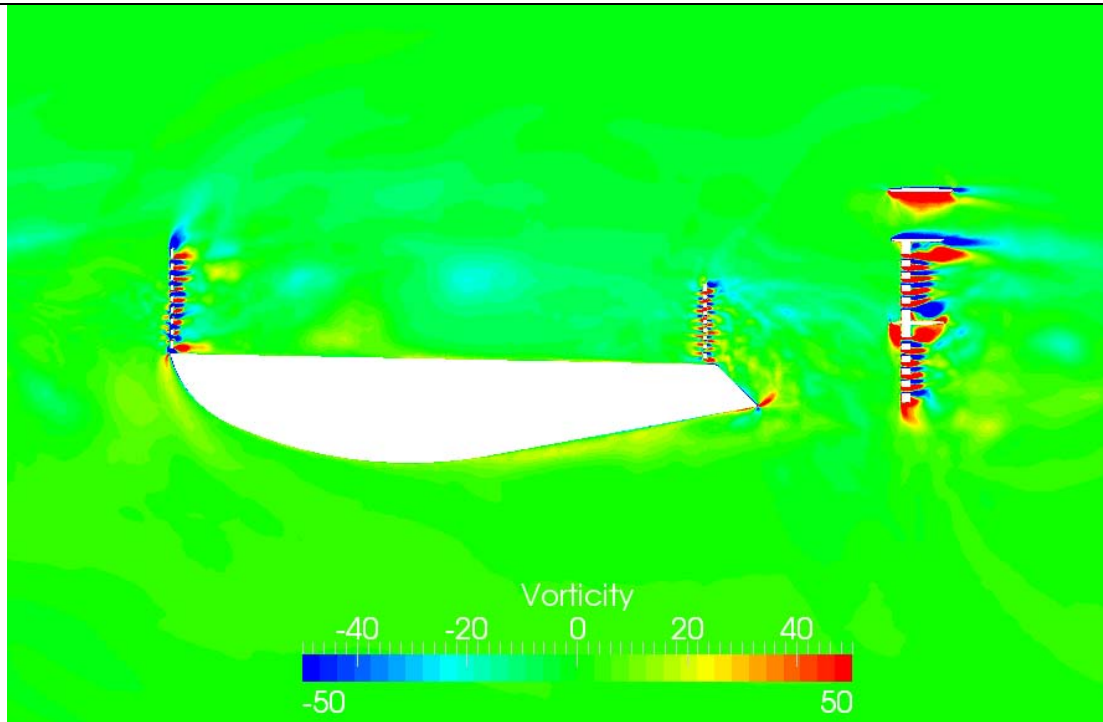


(a)

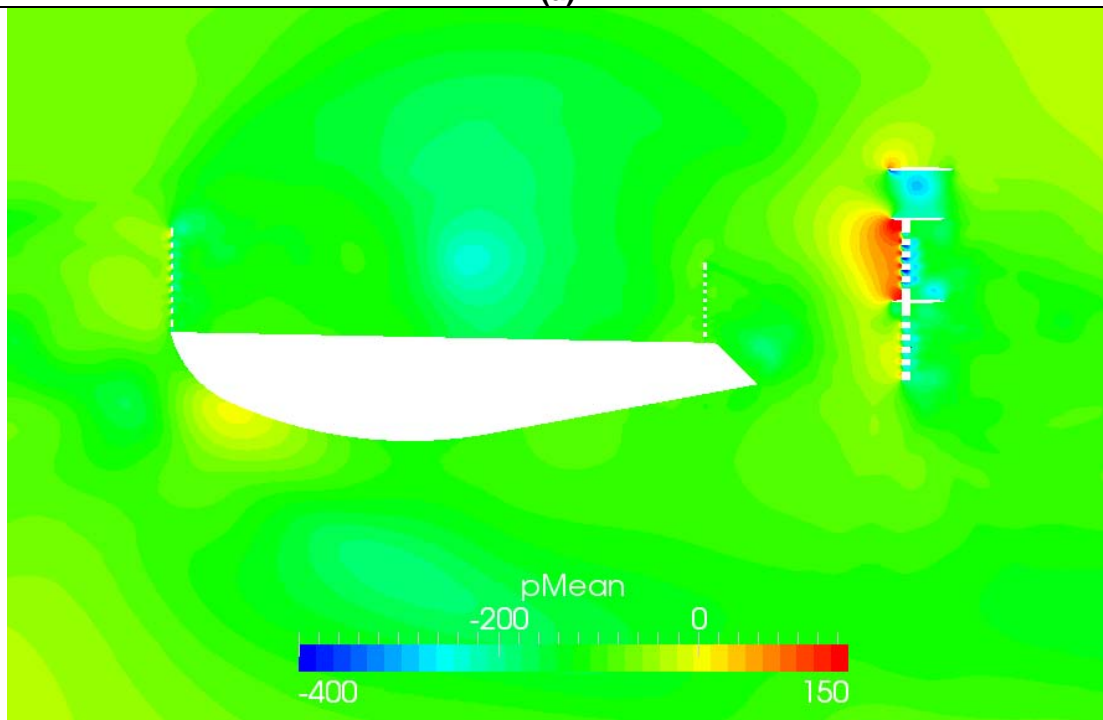


(b)

Figura 3.14 Dettaglio della seda ferroviaria: a) vorticità media, 1/s b) pressione media, Pa



(a)



(b)

Figura 3.15 Dettaglio della seda stradale di destra: a) vorticità media, 1/s b) pressione media, Pa

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

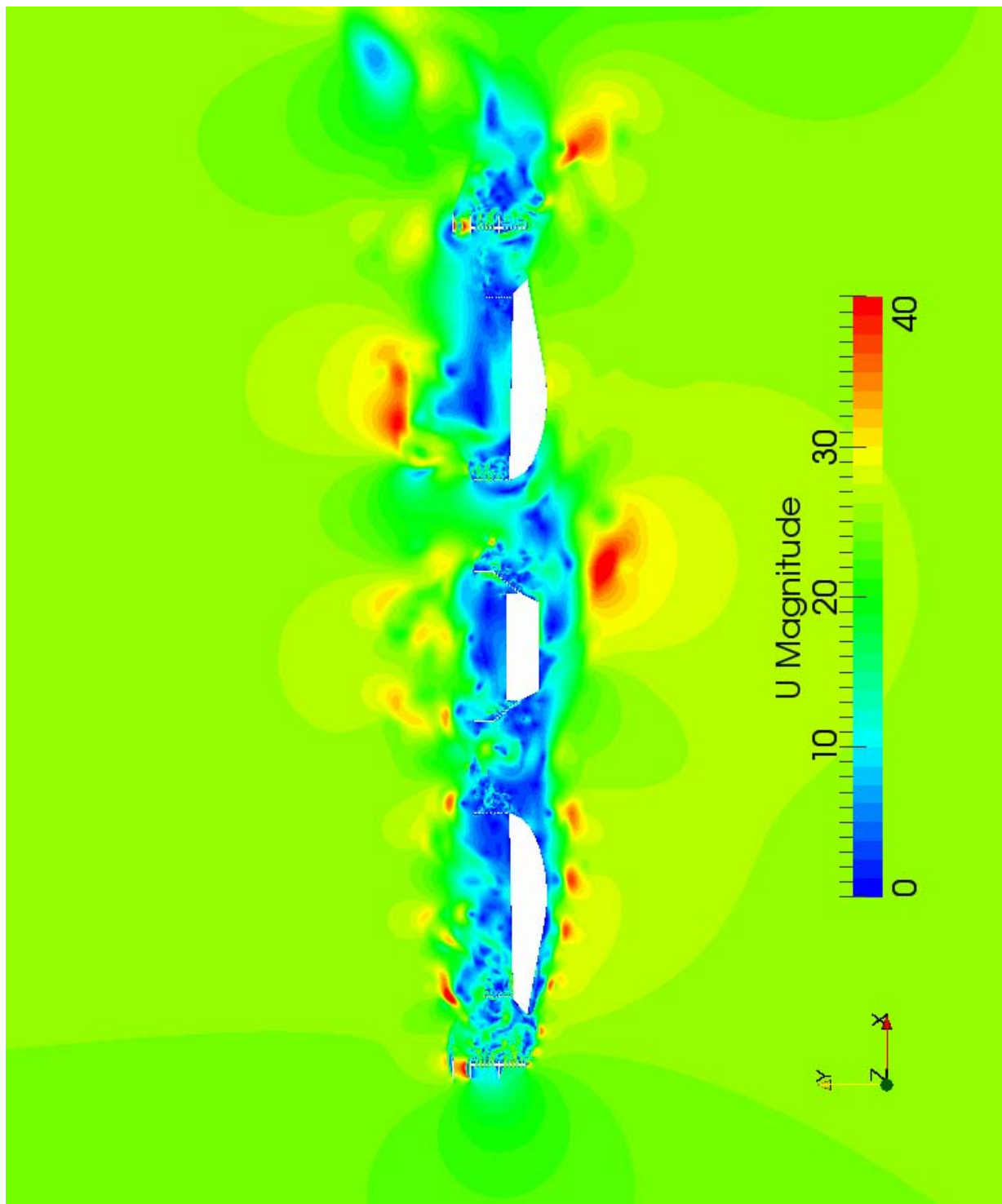


Figura 3.16 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

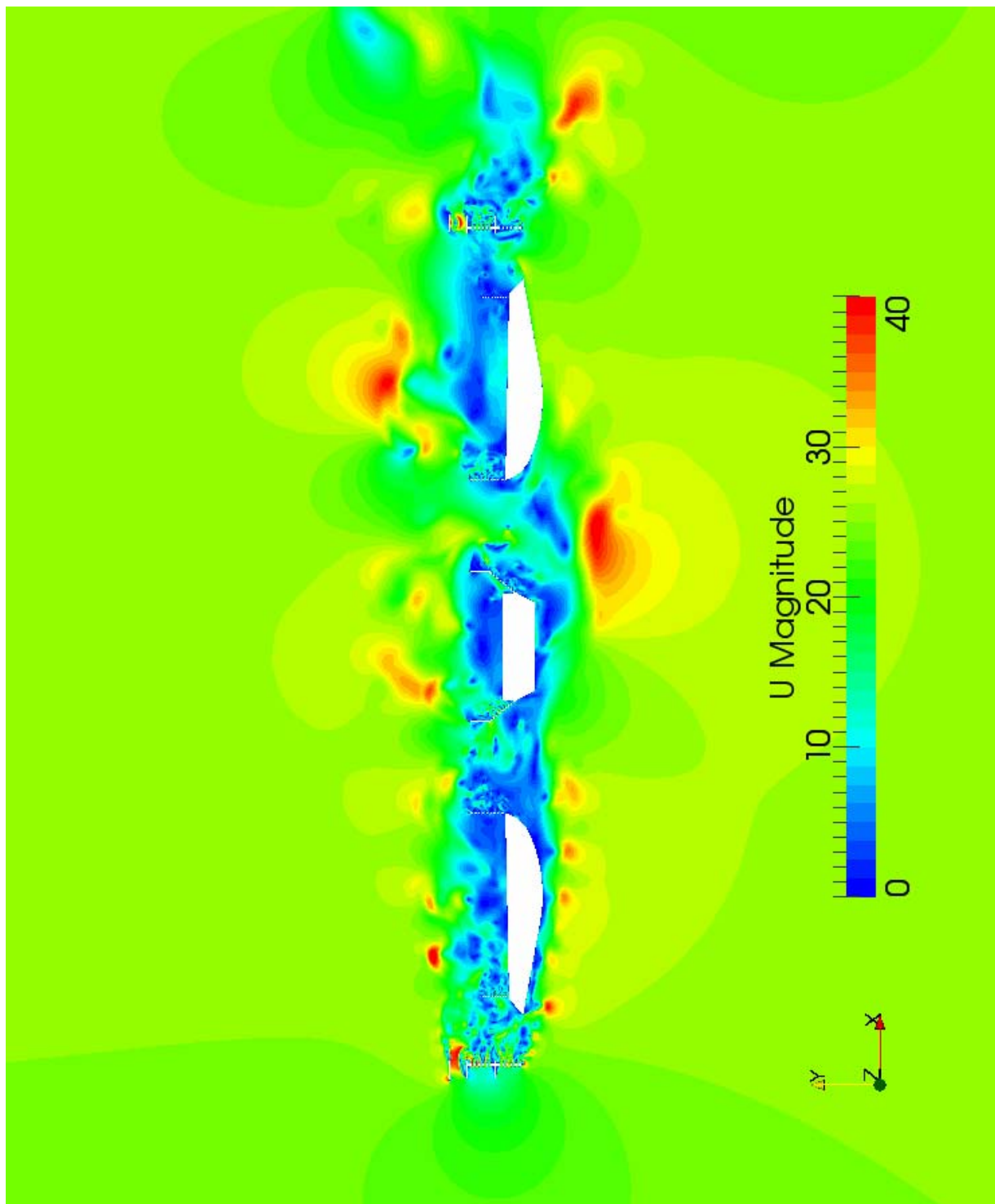


Figura 3.17 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.1$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

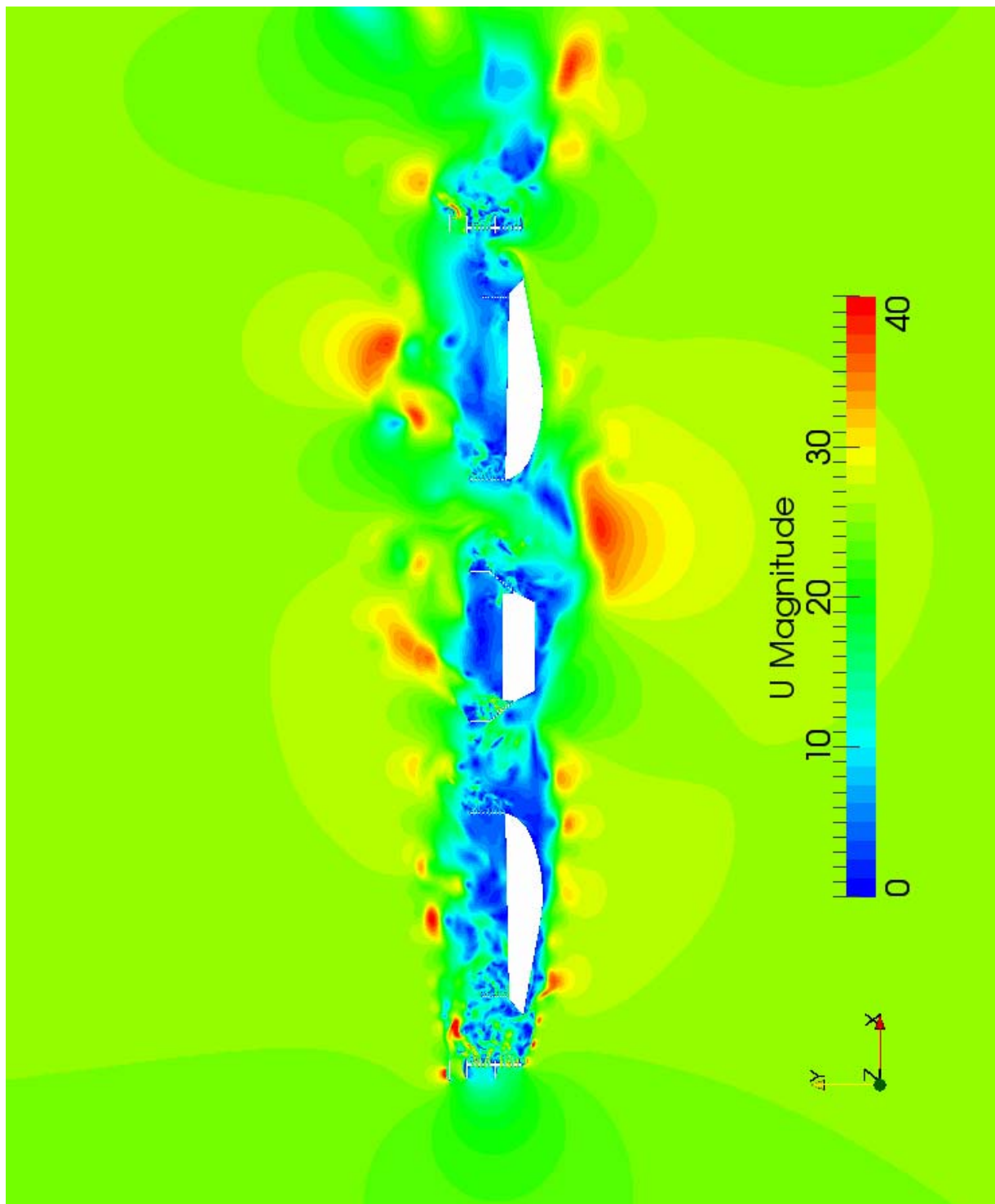


Figura 3.18 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.2$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

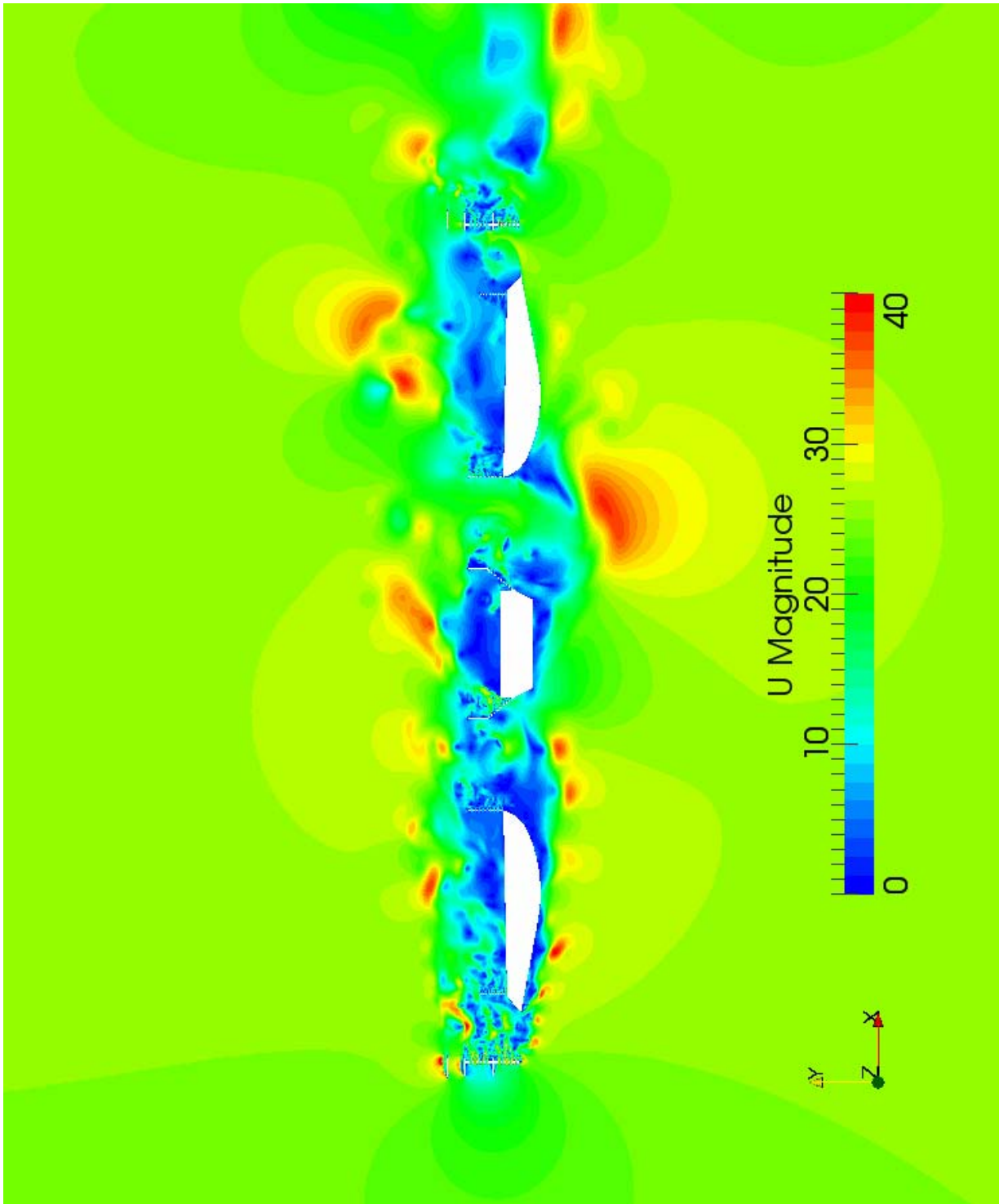


Figura 3.19 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.3$  s.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011	

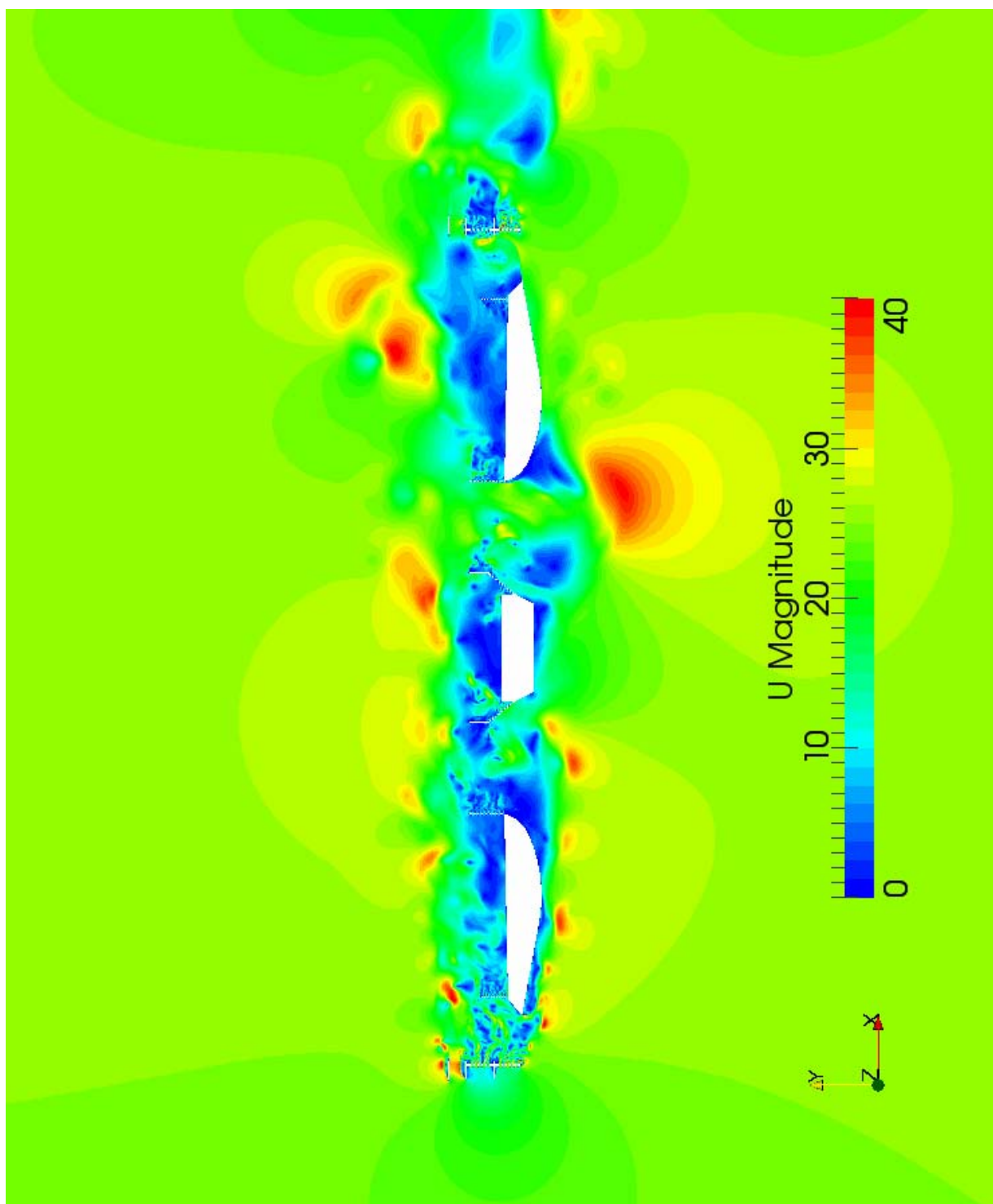


Figura 3.20 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.4$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

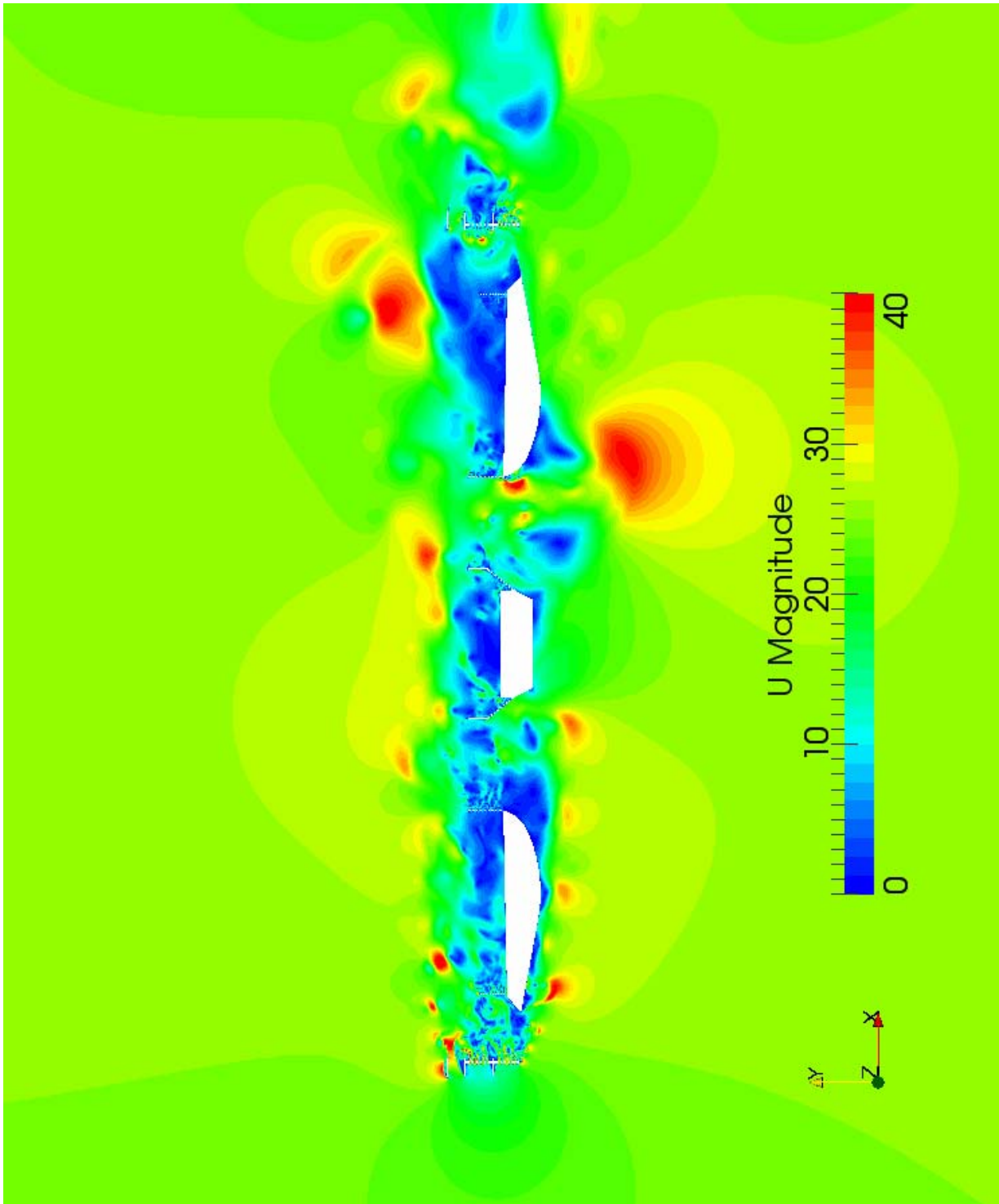


Figura 3.21 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.5$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

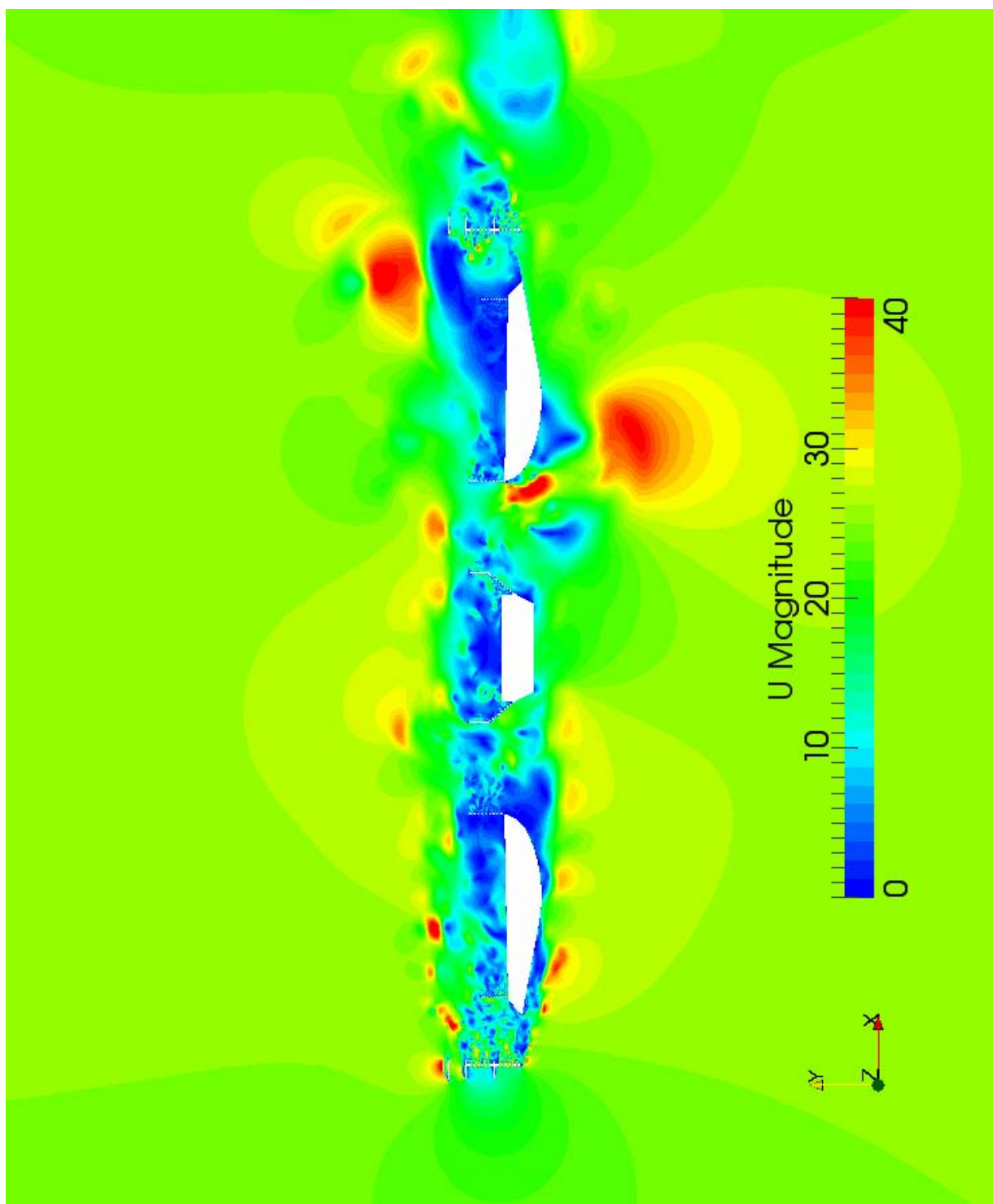


Figura 3.22 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.6$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

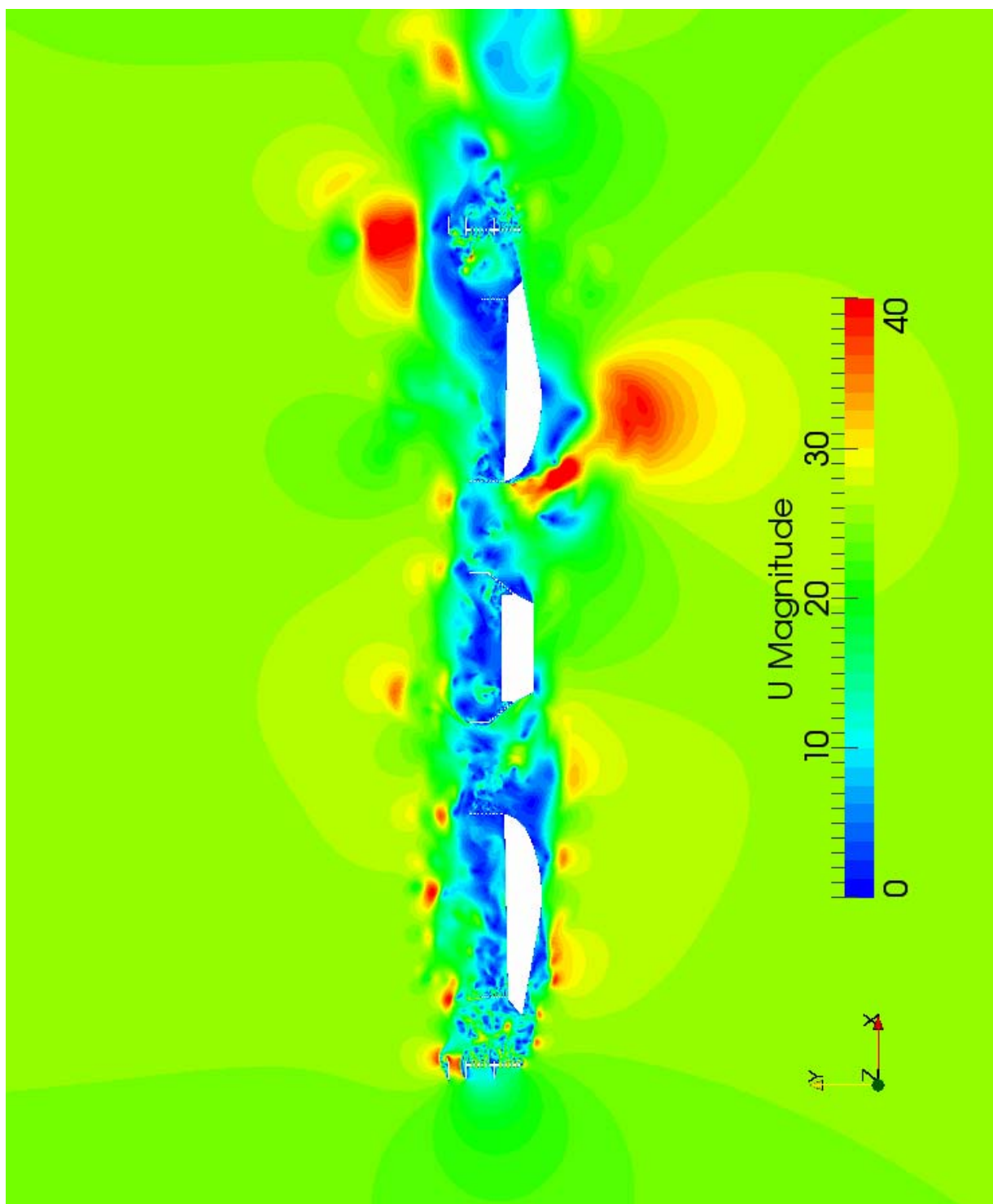


Figura 3.23 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.7$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

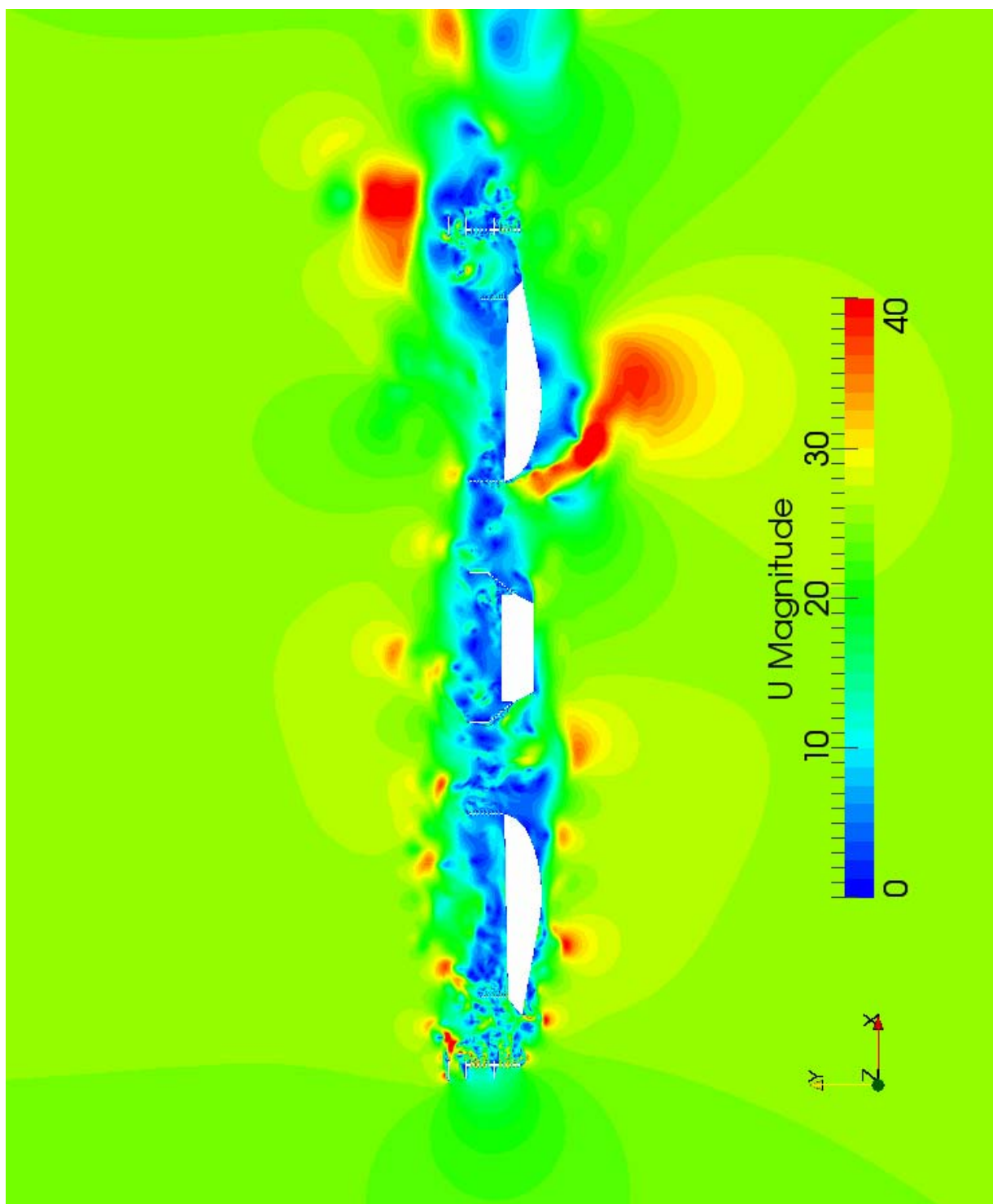


Figura 3.24 Storia temporale del campo di velocità non stazionario,  $t = 0.8$  s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

### 3.4 Conclusioni

Dall'analisi fluidodinamica riportata in questo capitolo è evidente che la barriera frangivento esterna condiziona tutto il campo di moto attorno all'impalcato. Tale elemento è il più esposto alla corrente e ripara la zona interna che è, pertanto, caratterizzata da basse velocità medie. Gli elementi strutturali che si collocano nell'ombra della barriera frangivento sono quindi soggetti a velocità del vento notevolmente inferiori rispetto alle velocità del campo esterno. Si osserva inoltre che il campo risulta complesso e caratterizzato dalla presenza di strutture vorticosi di grandi dimensioni.

Le simulazioni effettuate permettono di affermare che gli elementi in ombra della barriera frangivento presenteranno emissioni acustiche trascurabili, in quanto investiti da velocità basse rispetto alla velocità del campo indisturbato. Inoltre, dato che l'influenza dell'impalcato sul campo di velocità media si estende poco al di sopra della fine della barriera frangivento, è possibile supporre che gli elementi strutturali posti al di sopra dell'impalcato (ad esempio i pendini o i cavi della sede ferroviaria) siano immersi in un campo di moto medio indisturbato.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 4 Individuazione degli elementi strutturali potenzialmente rumorosi

Analizzando l'opera di attraversamento nel suo complesso, è opportuno dividere gli elementi strutturali potenzialmente sorgenti di rumore aeroacustico in due macro famiglie :

- lineari, di geometria riconducibile all'elemento di riferimento analizzato nel capitolo 2 ;
- non lineari, da analizzare attraverso opportuni modelli.

Come precedentemente accennato, gli elementi lineari hanno un'emissione acustica caratterizzata da picchi tonali legati al fenomeno di distacco di vortici. Il numero adimensionale che governa la fisica dello shedding è lo Strouhal, definito come  $St = fD/U$ , con  $f$  la frequenza di rilascio dei vortici,  $D$  il diametro del cilindro e  $U$  la velocità del vento. Analizzando le diverse configurazioni, si osserva che  $St$  è circa costante, attestandosi su valori di  $St_m \approx 0.26$  (Tabella 2.1). Assumendo una velocità media del vento all'altezza dell'impalcato di  $U_m = 25m/s$ , la frequenza del picco principale è inversamente proporzionale al diametro dell'elemento lineare considerato (Figura 4.1). Considerando che il limite inferiore dell'udibile per l'orecchio umano è  $f_{min} = 20Hz$ , si può definire il diametro critico come:

$$D_{critico} = \frac{St_m U_m}{f_{min}} \approx \frac{0.26 \cdot 25}{20} = 0.325m$$

Pertanto, gli elementi lineari che abbiano un diametro maggiore di  $D_{critico}$  possono essere trascurati nell'analisi aeroacustica, presentando frequenze proprie fuori dall'intervallo dell'udibile. Al contrario per  $D < D_{critico}$  è necessario condurre un'analisi dettagliata del campo di moto fluidodinamico e delle conseguenti emissioni aeroacustiche. Tali calcoli sono approntati nel capitolo successivo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

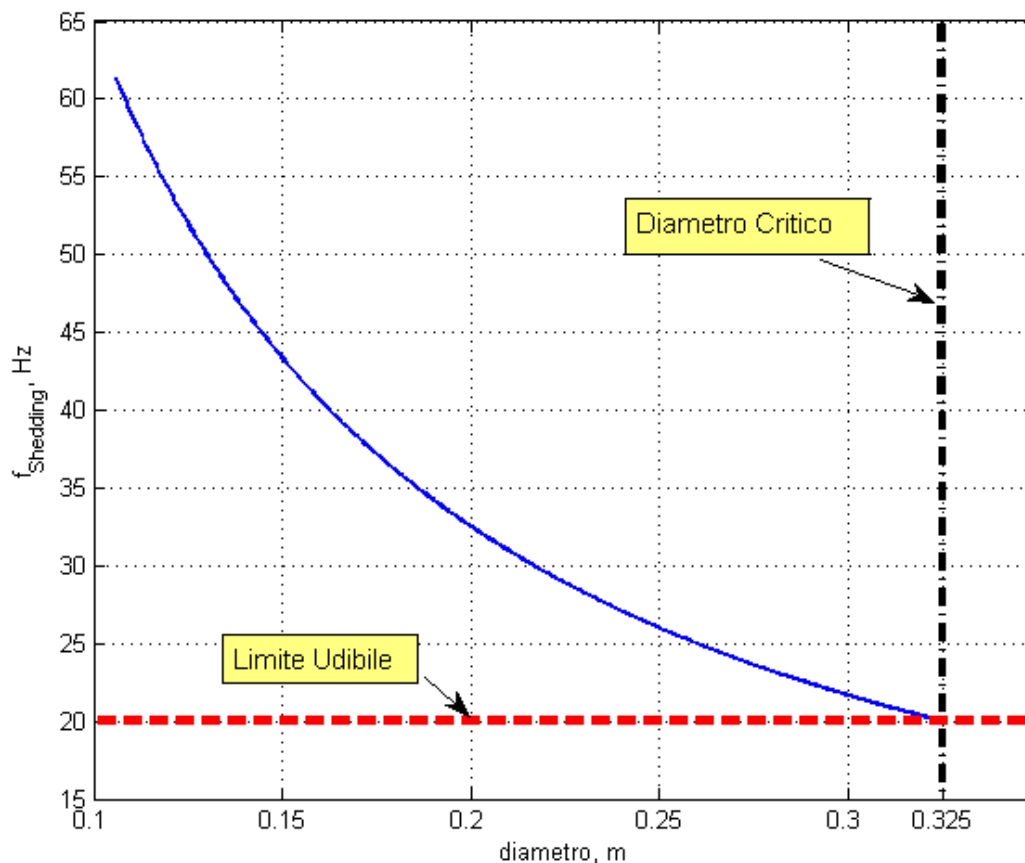


Figura 4.1 Frequenza shedding stimata per  $U=25\text{m/s}$  e  $St=0.26$

Gli elementi non lineari, potenzialmente sorgenti di rumore, sono stati selezionati a seguito di un'analisi CFD della sezione dell'impalcato. I dettagli di tale simulazione sono stati riportati nel capitolo 3. Le barriere frangivento esterne e l'ala di irrigidimento sono stati identificati come elementi critici, da analizzare attraverso opportuni modelli di calcolo semi-analitici.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

## 4.1 Elementi Lineari

### 4.1.1 Pendini

I pendini, costituiscono una sorgente potenziale di rumore tonale legato al distacco di vortici (Figura 4.2, Figura 4.3). Essi hanno un'estensione verticale che può arrivare, per i pendini più lunghi, anche ad alcune centinaia di metri. Pertanto saranno investiti da una velocità variabile con la quota: al crescere dell'altezza si avrà un aumento della velocità della corrente. Per tener conto di questo effetto si suppone che la porzione dei pendini al di sotto dei 150m sia investita da una corrente a 25 m/s, mentre la parte superiore sia investita da una corrente a 30 m/s. Al fine di valutarne, in prima approssimazione, le frequenze di emissione si è considerato uno Strouhal di 0.26. I risultati per le differenti sezioni e per le diverse velocità del vento sono riportati in Tabella 4.1. Dato che le frequenze calcolate rientrano nell'intervallo dell'udibile sarà necessario valutare in modo accurato le emissioni acustiche di tutti i pendini.



Figura 4.2 Pendini con sezione : F1 blu, F2 viola, F3 verde, F4 rosso

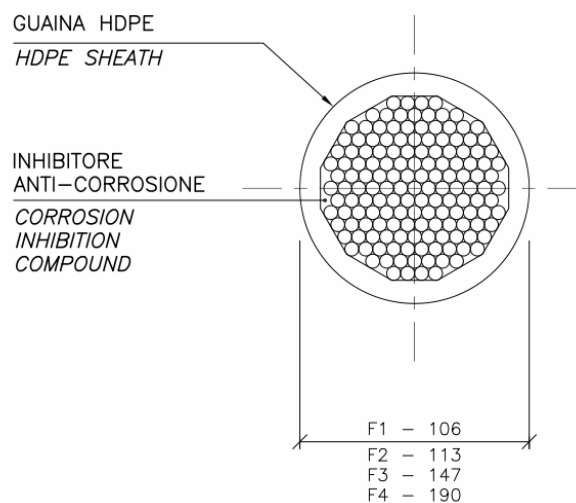


Figura 4.3 Sezioni dei pendini, con F1-F4 i valori dei diametri espressi in mm

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Codice Sezione Pendino	Diametro [mm]	Frequenza Shedding stimata [Hz]	
		U = 25m/s	U = 30m/s
F1	106	61.3	73.6
F2	113	57.5	69.0
F3	147	44.2	53.1
F4	190	34.2	41.1

Tabella 4.1 Pendini: Frequenze di shedding tono principale, stimate con  $St=0.26$  e  $U=25$  e  $30m/s$

#### 4.1.2 Cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria

I due cavi di supporto della rete di alimentazione ferroviaria, uno per binario, sono formati ciascuno da una coppia di funi intrecciate (Figura 4.4, Figura 4.5). Le funi sono ricavate intrecciando 19 fili di rame del diametro di 2.8mm, per un diametro complessivo di 14 mm. La distanza tra le due funi è di 44mm, ovvero circa 3 volte il diametro della singola fune.

Il cavo in questione percorre tutto il ponte ad un'altezza di oltre 6 m sul piano del ferro, in posizione non disturbata dalla presenza delle barriere frangivento esterne, collocandosi al di sopra della scia da esse determinata; per questo motivo, si ipotizza che venga investito ad una velocità indisturbata di 25 m/s.

La distanza tra i due corpi è tale che il campo di moto che si svilupperà attorno ad essi non sarà quello di due cilindri isolati. Il corpo anteriore andrà ad influenzare la fluidodinamica di quello posteriore e viceversa. Tale configurazione è detta *tandem* e dovrà essere studiata nel suo complesso; ossia, i due cilindri andranno analizzati insieme e non singolarmente. Inoltre, la superficie dei due corpi non è liscia, ma presenta una serie di avvallamenti propri dell'intreccio dei fili che formano la fune.

Nelle Capitolo 2 si era ricavato il valore del numero di Strouhal associato al fenomeno di shedding per un singolo cilindro liscio investito da una corrente turbolenta. Sebbene il campo fluidodinamico del cavo di alimentazione sia sicuramente diverso da quello di un cilindro liscio è comunque possibile utilizzare il valore di Strouhal precedentemente ricavato per avere una stima delle frequenze di emissione di questo elemento. Considerando un diametro di 0.014 m e una velocità di 25 m/s, se ipotizziamo un Strouhal di 0.25-0.26 la frequenza del tono principale sarà dell'ordine dei 450Hz. Tale frequenza rientra nel *range* delle frequenze udibili; di conseguenza, sarà

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

necessario analizzare in dettaglio questo elemento per avere una valutazione quantitativa delle emissioni acustiche prodotte.

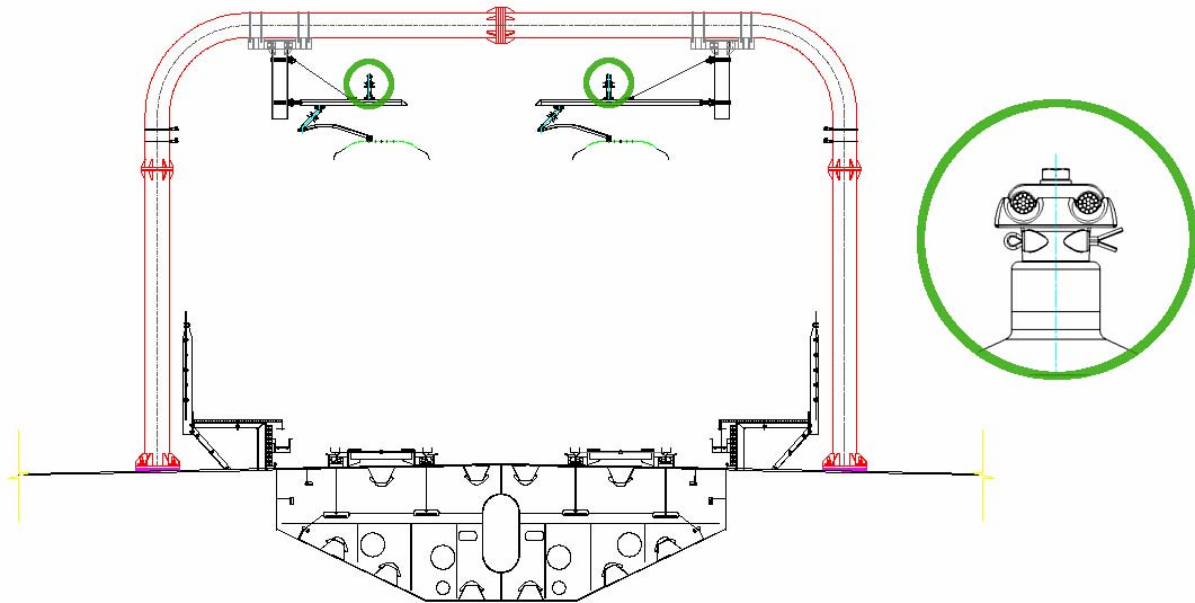


Figura 4.4 Cavi di supporto della rete di alimentazione ferroviaria

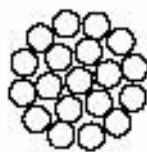


Figura 4.5 Sezione cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria

#### 4.1.3 Cavo di alimentazione ferroviaria

I due cavi di alimentazione della ferrovia, uno per binario, sono formati ciascuno da una coppia di funi piene sagomate (Figura 4.6 e Figura 4.7). Le funi hanno un diametro di 14mm e sono distanti 50 mm, ossia 3.5 volte il loro diametro. I cavi di alimentazione percorrono tutto il ponte ad un'altezza di oltre 5 m sul piano del ferro. Anche in questo caso, quindi, si collocano in una posizione non disturbata dalla presenza delle barriere frangivento esterne per questo motivo si ipotizza che vengano investiti ad una velocità indisturbata di 25 m/s.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Analogamente al cavo di supporto, anche quello di alimentazione è in configurazione *tandem*, per cui le due funi non potranno essere studiate singolarmente. Ipotizzando, in prima approssimazione, un numero di Strouhal di 0.25-0.26, le frequenza caratteristiche, per questo elemento, saranno confrontabili con quelle del cavo di supporto, ossia dell'ordine dei 450 Hz. Anche per il cavo di alimentazione sarà, pertanto, necessario eseguire un'analisi dettagliata delle emissioni acustiche.

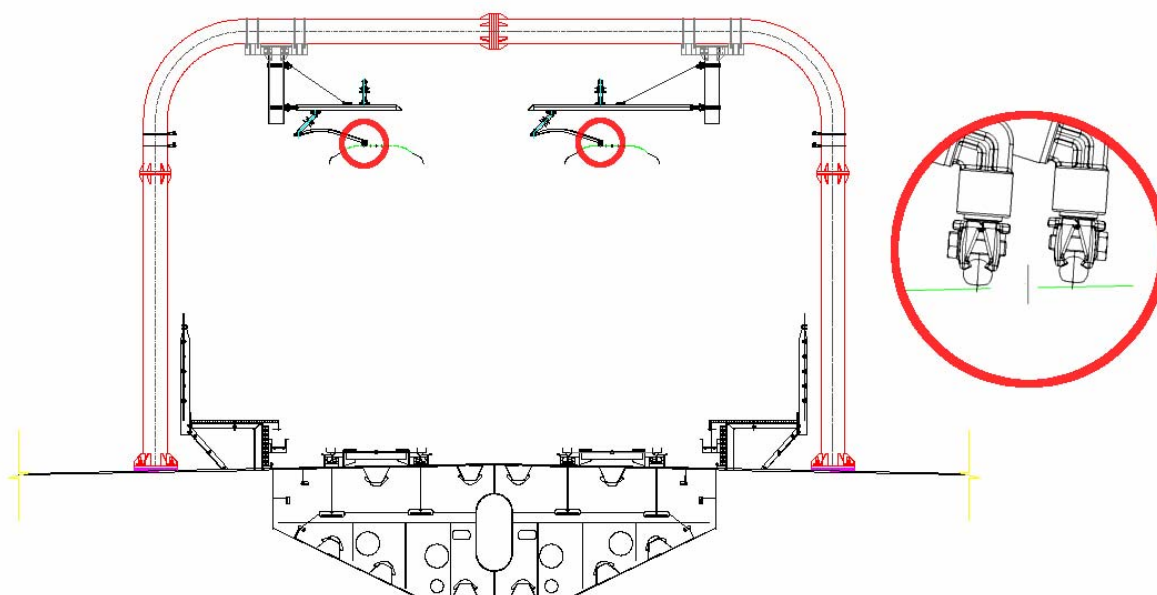


Figura 4.6 Cavi di alimentazione ferroviaria

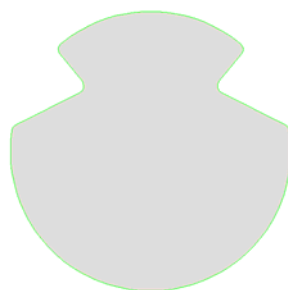


Figura 4.7 Sezione cavo di alimentazione ferroviaria

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 4.1.4 Cavo di terra

Nella sede ferroviaria sono presenti quattro cavi di terra che percorrono tutta la lunghezza del ponte (Figura 4.8). I cavi sono formati da fili di rame ed alluminio intrecciati per un diametro complessivo di 15.85mm (Figura 4.9). Per stimare le frequenze di emissione di queste funi si utilizza il numero di Strouhal ricavato nel capitolo 2. Sebbene il cavo di terra non sia liscio come i cilindri studiati nel capitolo 2 il numero di Strouhal ottenuto precedentemente può dare, in prima approssimazione, un'indicazione della frequenza del tono principale. Considerando un diametro di 0.01585 m e una velocità di 25 m/s, se ipotizziamo un Strouhal di 0.25-0.26 la frequenza del tono principale sarà dell'ordine dei 400Hz. Date le frequenze coinvolte si ritiene necessario eseguire un'analisi aeroacustica dettagliata del cavo di terra.

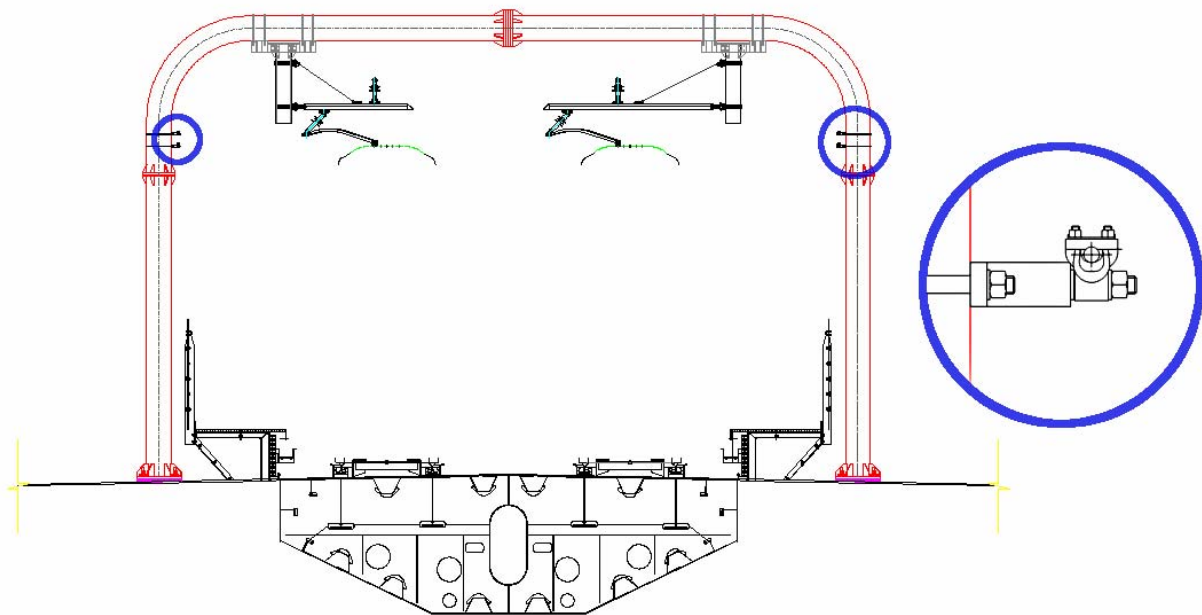


Figura 4.8 Cavi di terra

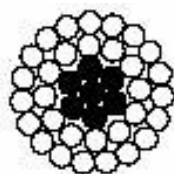


Figura 4.9 Sezione cavo di terra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

#### 4.1.5 Cavo Principale

Il cavo principale è un elemento strutturale riconducibile, in termini di emissioni aero-acustiche, all'elemento di riferimento cilindrico, presentato nel capitolo 2 (Figura 4.10). Pertanto, il rumore prodotto sarà caratterizzato da un tono principale la cui frequenza è legata al fenomeno di distacco dei vortici. Assumendo analogia del campo fluidodinamico si considera uno Strouhal di 0.26. Il diametro del cavo principale si attesta, in tutte le campate, a valori superiori a 1.2m. Essendo quest'ultimo maggiore del valore critico di 0.325m, il rumore tonale prodotto dal cavo principale è caratterizzato da frequenze proprie al di sotto di 20 Hz, limite dell'udibile. Si può, quindi, considerare trascurabile in sede di valutazione acustica.

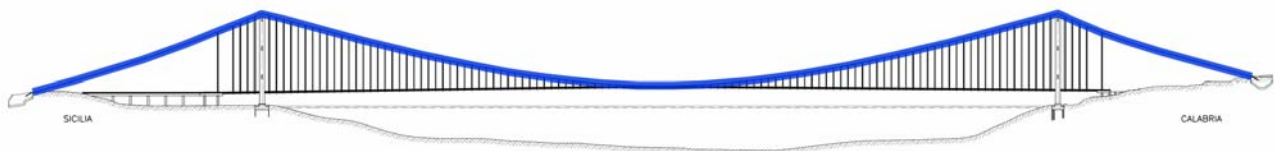


Figura 4.10 Cavo principale

#### 4.1.6 Piloni

I piloni possono potenzialmente essere sorgenti di rumore tonale, essendo caratterizzati da una geometria riconducibile all'elemento di riferimento cilindrico studiato nel capitolo 2. Tuttavia, avendo diametri ben al di sopra del valore critico di 0.325m, le emissioni acustiche del tono principale saranno al di sotto dei limiti dell'udibile e, pertanto, vengono trascurati in sede di valutazione aeroacustica.

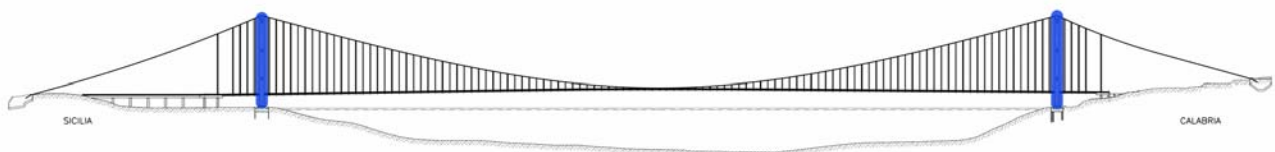


Figura 4.11 Piloni

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 4.2 Elementi non lineari

Nella sezione dell'impalcato si possono individuare diversi elementi potenzialmente fonte di rumore non riconducibili all'elemento lineare scelto come riferimento. Tali elementi sono stati evidenziati in Figura 4.12: barriere frangivento esterne (blu), barriere frangivento della sede stradale (verde), barriere frangivento della sede ferroviaria (rosso), ala di irrigidimento (viola). A seguito delle simulazioni fluidodinamiche riportate nel capitolo 3, è emerso che, nella parte centrale dell'impalcato in prossimità del pianale, le velocità medie sono molto basse. Di conseguenza non si ritiene necessario effettuare analisi aeroacustiche sugli elementi non lineari posti nelle zone più interne o nelle zone sottovento dell'impalcato. Tali elementi presenteranno infatti emissioni acustiche trascurabili. Tra tutti gli elementi evidenziati si è pertanto deciso di studiare solo quelli più esposti al vento, ossia le barriere frangivento esterne e l'ala di irrigidimento posto sopra ad esse.

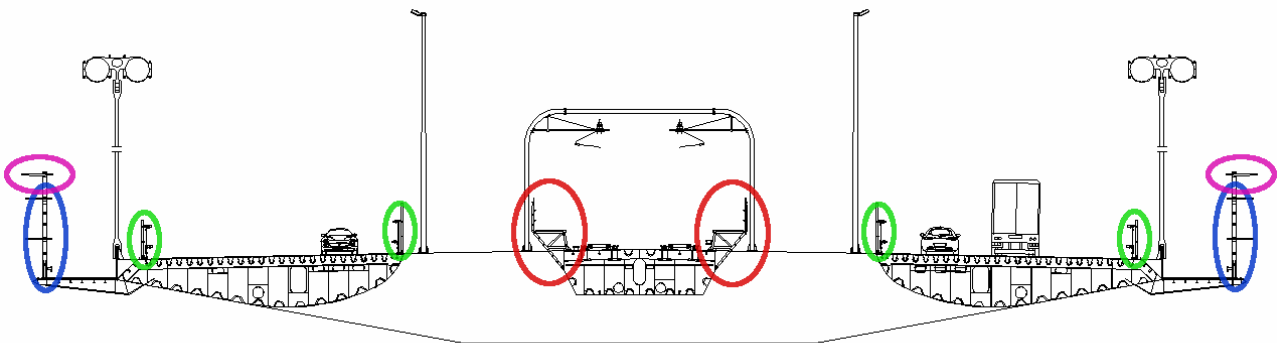


Figura 4.12 Elementi non lineari nella sezione dell'impalcato

### 4.2.1 Barriere frangivento esterne

Potenzialmente le barriere frangivento esterne (Figura 4.13) potrebbero dare un contributo non trascurabile all'emissione acustica. E' ragionevole assumere che tali elementi si comportino, dal punto di vista acustico, come un pannello rigido e forato investito da una corrente uniforme. Il rumore prodotto da un pannello di questo tipo è somma di due contributi principali :

- il distacco non stazionario di vortici dai bordi del pannello, ascrivibile alla classe di rumore di corpo tozzo,
- i microgetti che hanno origine dai singoli fori e che possono coalescere ed interagire con la scia principale, dando origine ad un rumore di turbolenza.

Il primo fenomeno è caratterizzato da una direttività dipolare, essendo legato alle fluttuazioni di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

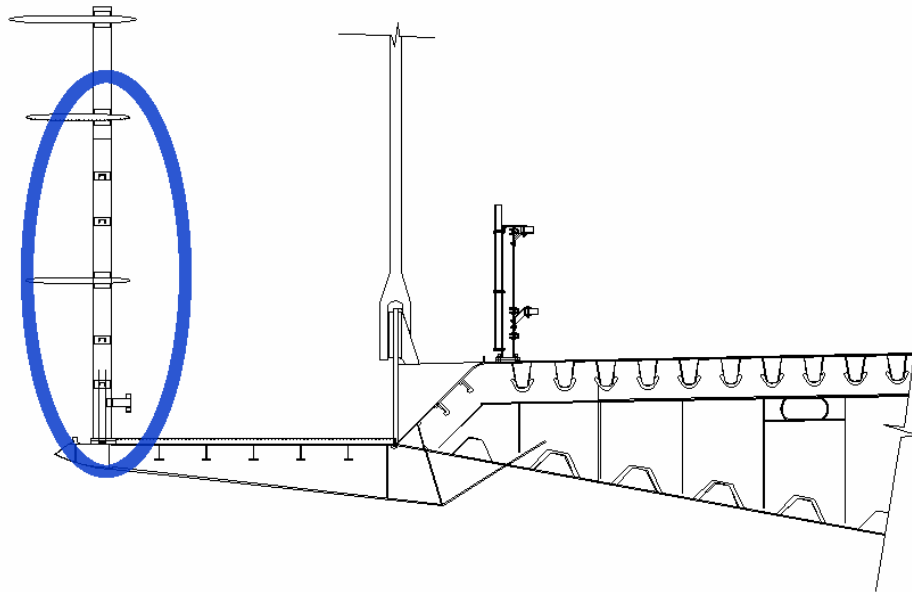


Figura 4.13 Barriere frangivento esterne

forza sul corpo, innescate dal distacco dei vortici di scia. Nel caso in esame, pertanto, l'effetto di corpo tozzo può essere modellizzato da una sorgente acustica dipolare posta al centro del pannello forato. Il rumore di turbolenza, invece, è noto avere un'emissione omnidirezionale [9].

Per meglio comprendere il campo di moto a valle di un pannello forato si fa riferimento allo studio sperimentale condotto da Castro [10]. Solitamente, un corpo tozzo, immerso in una corrente, genera due flussi di taglio instabili che interagiscono e formano una scia di vortici. Se tale interazione è ostacolata da una corrente d'aria aggiuntiva, dovuta ai fori, la formazione di vortici avviene più a valle ad una minore energia. Il campo di moto non dipende più solo dal numero di Reynolds ma anche dal numero e dalle dimensioni dei fori del pannello. In particolare si osserva che il parametro discriminante è la porosità del pannello definita come

$$\beta = \frac{A_{Fori}}{A_{Totale}} .$$

Al crescere della porosità, la zona di ricircolo, comunque presente per garantire la continuità nella scia, si sposta più a valle, trascinando con sé il punto di massima turbolenza. Il campo di moto fluidodinamico descritto può essere esemplificato nella Figura 4.14. Inoltre, all'aumentare della porosità vi è un incremento della frequenza di shedding ed una diminuzione della resistenza



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

(Figura 4.15 e Figura 4.16).

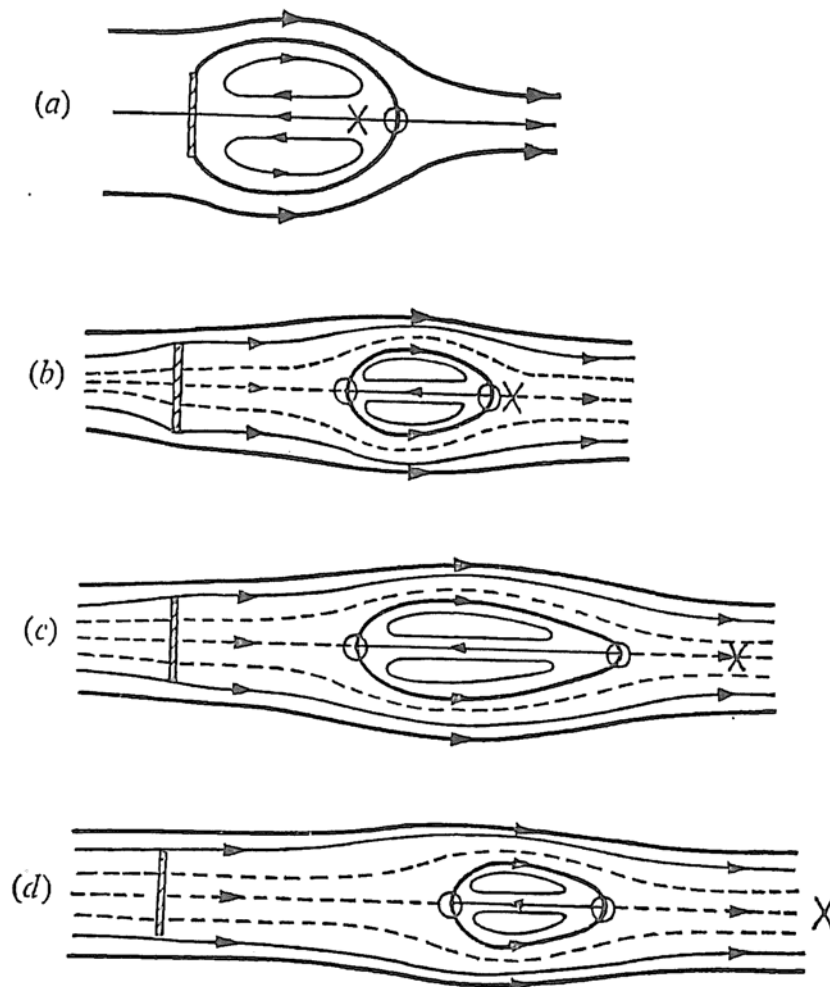


Figura 4.14 Effetto della porosità sulla scia a valle di un pannello forato. ○ Punti di stagnazione;

× punto di massima intensità turbolenta; ---- flusso d'aria secondario.

a)  $\beta = 0$  ; b)  $\beta = 0.182$  ; c)  $\beta = 0.252$  ; d)  $\beta = 0.305$  [10]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Rev</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Data</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						

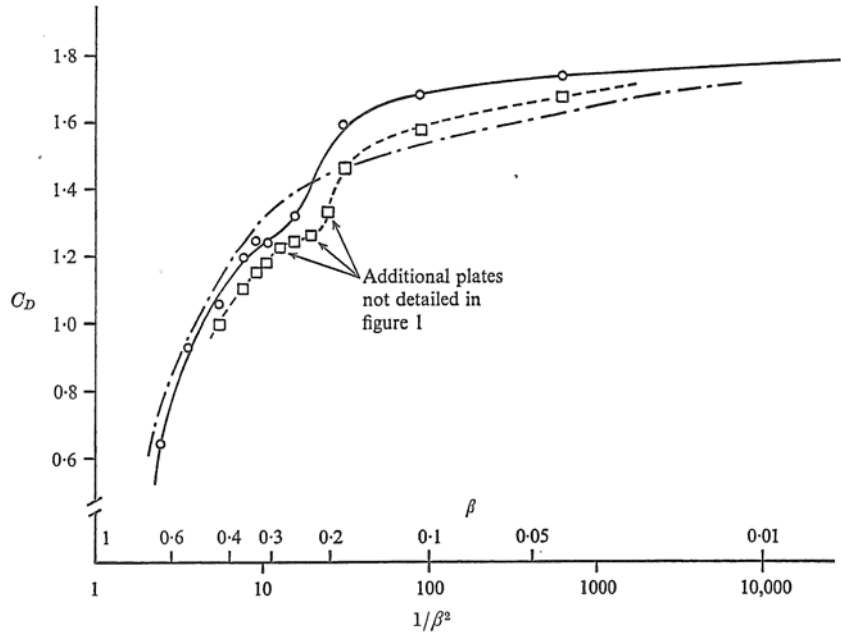


Figura 4.15 Coefficiente di resistenza in funzione della porosità  $\beta$ .  
 Riportati differenti metodi di misura del  $C_D$  [10]

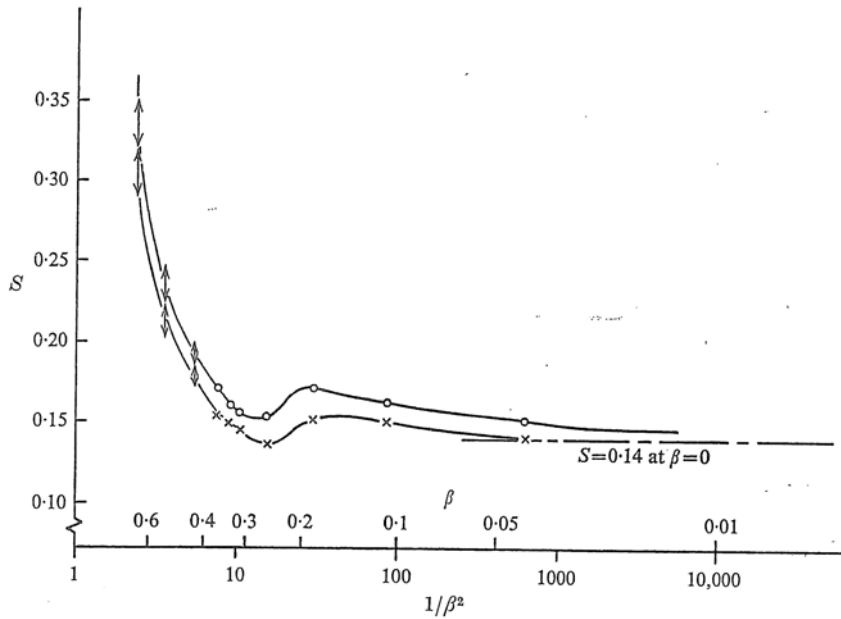


Figura 4.16 Strouhal in funzione della porosità  $\beta$ .  $\circ$   $Re = 2.5 \times 10^4$ ;  $\times$   $Re = 9 \times 10^4$  [10]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Tuttavia, il fenomeno non dipende linearmente dalla porosità. Per  $\beta \approx 0.2$  si osserva un cambio repentino dei valori di tutti i parametri in esame. In primo luogo, il coefficiente di resistenza diminuisce sensibilmente (Figura 4.15). Si è ipotizzato che tale fenomeno sia legato alla scomparsa della scia vorticoso, che porta il punto di massima intensità turbolenta ad arretrare vistosamente (Figura 4.17). Si può quindi affermare che  $\beta \approx 0.2$  rappresenti un valore di porosità critico, raggiunto il quale il flusso d'aria secondario, che passa attraverso i fori, è abbastanza consistente da impedire l'interazione dei flussi di taglio distaccatisi dal pannello. In questo caso, non si può più parlare di frequenza di shedding seppur una frequenza dominante è comunque presente. Quest'ultima, presumibilmente, è legata ad un'instabilità della scia. Il campo di moto attorno al pannello si può considerare stazionario ma i due flussi di taglio, frapposti dalla corrente secondaria, possono coalescere a valle, dando origine ad una scia turbolenta ed instabile.

Al fine di determinare l'emissione acustica delle barriere frangivento osserviamo che esse sono rivestite da pannelli forati aventi una larghezza pari a  $W = 3.31m$ , un'altezza di  $H = 1.65m$  ed una porosità del 55%. Il rumore prodotto dalle barriere sarà, pertanto, dovuto principalmente all'emissione acustica dei pannelli forati, tralasciando così gli elementi strutturali di sostegno. Come anticipato precedentemente, tale emissione sarà caratterizzata un rumore tonale, di bassa frequenza, legato ai termini dipolari, più un contributo broadband, in una banda di frequenza medio-alta, riconducibile al rumore di turbolenza.

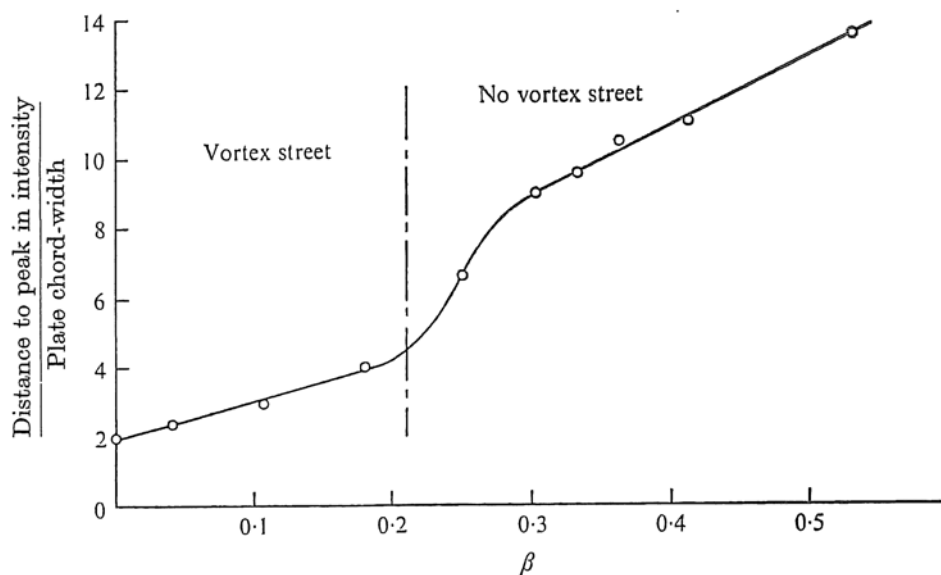


Figura 4.17 Distanza del picco di intensità turbolenta in funzione della porosità [10]

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

Dato che le barriere sono posizionate all'altezza dell'impalcato, in tutta l'analisi che segue, si suppone che vengano investite da una velocità uniforme di 25 m/s.

Per valutare il contributo tonale dell'emissione acustica si utilizza il modello dipolare sviluppato in [9]. Secondo tale modello, l'intensità del suono radiato da un corpo rigido acusticamente compatto è proporzionale alla media quadratica della derivata temporale delle forze agenti su di esso :

$$\overline{p^2(x)} = \frac{1}{16\pi^2 c_0^2} \frac{\cos^2 \theta}{r^2} \left( \frac{\partial F(t)}{\partial t} \right)^2,$$

dove  $\theta$  è misurata a partire dalla direzione del vettore fluttuante della forza  $F$ ,  $r$  è la distanza dell'osservatore e  $c_0$  è la velocità del suono della corrente indisturbata. Essendo il pannello investito, nella condizione di massimo rumore, da una corrente ad incidenza nulla, non vi è portanza e l'unica forza che il flusso applica sul corpo è la resistenza nella direzione  $x$  della corrente. Tale contributo oscillatorio può essere espresso secondo una legge armonica :

$$F_x(t) = \frac{\rho_0 U_0^2}{2} C_D A_{pan} e^{i\omega_d t},$$

dove  $\omega_d$  è la frequenza fondamentale delle fluttuazioni di resistenza, pari a  $\omega_d = 2\omega_s = 2(2\pi f_s)$ , con  $f_s$  la frequenza dominante nella scia;  $A_{pan}$  è l'area del pannello e  $C_D$  è il coefficiente di resistenza, funzione della porosità e della frequenza[10]. Per modellizzare la distribuzione spettrale del coefficiente di resistenza si assume una Gaussiana centrata sul valore di  $f_s$  preminente nella scia :

$$C_D(f) = C_D(f_s) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f-f_s)^2}{2\sigma^2}}$$

dove  $C_D(f_s) = 1.0$  (Figura 4.15),  $\sigma = 1/3\Delta St(U_0/L)$  con  $\Delta St = 0.2$  [9].

Applicando la trasformata di Fourier, la distribuzione spettrale delle fluttuazioni di resistenza può essere così espressa:

$$F_x(f) = \frac{\rho_0 U_0^2}{2} C_D(f) A_{pan}.$$

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Dalla Figura 4.16 si evince che, per il pannello in questione avente una porosità pari al 55%, si ha  $St_s = f_s L / U_0 \approx 0.2$  con  $L = H = 1.65m$ , lunghezza della sezione test.

Posizionando l'osservatore lungo la direzione di massima emissione, ad una distanza di 55m, lo spettro del rumore tonale emesso dal pannello della barriera frangivento è riportato in Figura 4.18. Il picco è ad una frequenza ben al di sotto dei 20 Hz; pertanto, tale contributo può essere trascurato nell'analisi delle emissioni acustiche della barriera.

Il secondo contributo al rumore del pannello forato è costituito dal mescolamento turbolento. Esso è assunto omnidirezionale, essendo le strutture a valle della griglia molto piccole e paragonabili a quelle riscontrate nel caso di turbolenza omogenea isotropa. La valutazione della componente

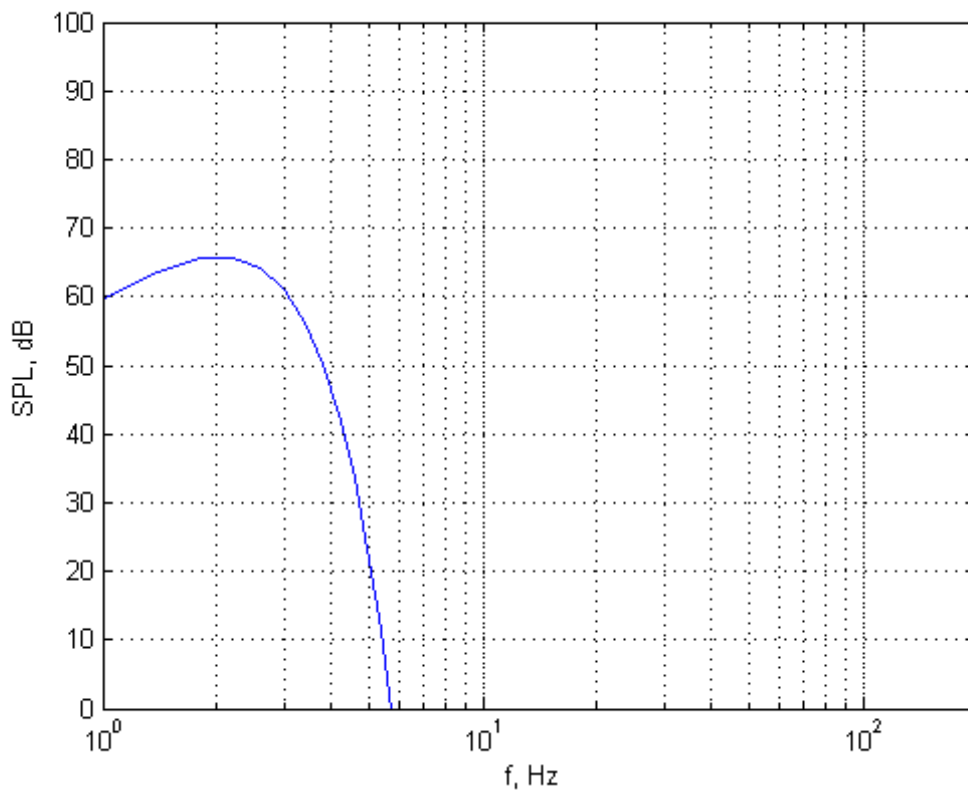


Figura 4.18 SPL del tono del pannello forato,  $L = 1.65m$ , investito da una corrente di 25m/s ad incidenza nulla. Osservatore posto a 55 m

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

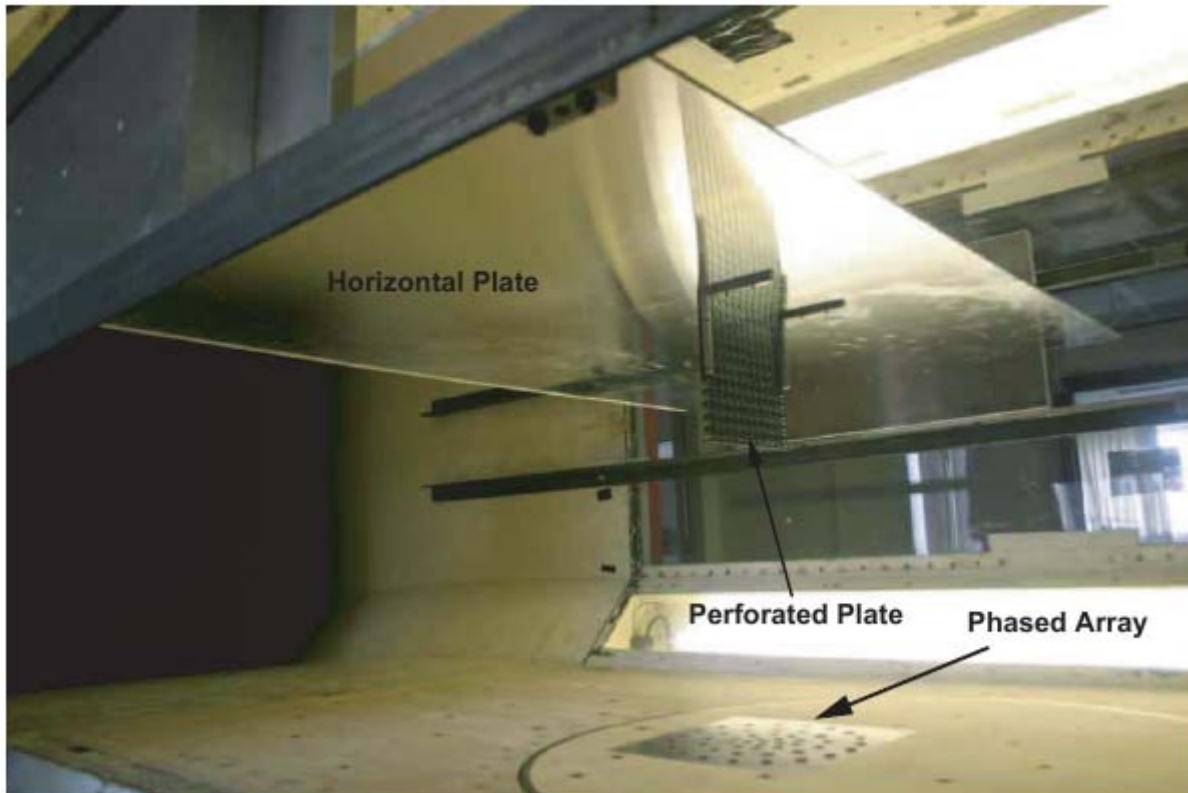


Figura 4.19 Setup per gli esperimenti condotti nella Cambridge University. La corrente va da sinistra a destra [9]

broadband non può essere fatta in modo analitico. Pertanto, si sono presi come riferimento gli esperimenti condotti nella galleria della Cambridge University (UK) [9]. L'obiettivo di tali ricerche era la caratterizzazione acustica di un pannello forato investito da una corrente uniforme. Il setup sperimentale è riportato in Figura 4.19. Le misure acustiche sono state effettuate attraverso microfoni *phased array* posti sulla normale del pannello ad una distanza di 0.6m. Gli esperimenti sono stati condotti per diverse velocità della corrente e per diversi valori della porosità del pannello.

Usando le misure sperimentali della Cambridge University si può ottenere una stima del rumore broadband emesso dalla barriera frangivento. In prima istanza, è necessario individuare una configurazione sperimentale che si avvicini il più possibile a quella della barriera in esame. Dalle misure si evince che i parametri caratterizzanti l'emissione acustica broadband sono tre:

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

- la porosità,
- il rapporto tra la dimensione dei fori,  $d$ , e le dimensioni del pannello,  $L$
- il rapporto tra la spaziatura dei fori,  $S$ , e le dimensioni del pannello  $L$ .

Il pannello della barriera presenta una porosità di  $\beta = 0.55$ ; inoltre, si è calcolato il diametro di un foro circolare equivalente avente la medesima area del foro della barriera, ottenendo, così,  $d=13.7mm$  e  $d / L$  pari a 0.0083. La spaziatura è  $S = 26mm$  e si ha un rapporto  $S / L$  pari a 0.0158.

Tra gli esperimenti condotti alla Cambridge University, il più adatto a rappresentare il pannello della barriera, è quello condotto su un pannello quadrato di lato  $L=0.1m$ , avente una porosità  $\beta=0.5027$ , un rapporto  $d / L$  pari a 0.05 ed un rapporto  $S / L$  pari a 0.0625.

Mentre la porosità dei due pannelli è molto simile, il rapporto  $d / L$  differisce di un fattore di circa 5. Le misure sperimentali hanno evidenziato che il diametro dei fori rappresenta una della scale di lunghezza fondamentali. Sebbene i dati sperimentali presentino un diverso rapporto  $d / L$  è comunque possibile utilizzarli per il pannello della barriera se i confronti vengono fatti a parità di numero di Strouhal  $St_d = f \cdot d / U$ .

Anche il rapporto  $S / L$  del pannello usato negli esperimenti differisce di un fattore di circa 5 rispetto a quello della barriera. Dalle misure sperimentali è, però, emerso che il rumore broadband diminuisce al diminuire di  $S / L$ . Pertanto, valutare il rumore del pannello della barriera usando i dati sperimentali misurati su un pannello con una porosità simile ma con un rapporto  $S / L$  maggiore porterà ad una sovrastima delle emissioni acustiche.

In Figura 4.20 si riporta lo spettro della pressione acustica misurato per un flusso con velocità di 30 m/s. Tali valori si riferiscono al contributo dovuto al pannello più ala di sostegno; infatti, come visibile in Figura 4.18, durante gli esperimenti il pannello forato era montato su un piatto orizzontale di sostegno, detto ala. Per ottenere le emissioni acustiche del pannello isolato è quindi necessario sottrarre il rumore della sola ala. Come evidente in Figura 4.20 fino a  $f = 4000Hz$  il rumore della sola ala è confrontabile con quello dovuto al pannello. Pertanto i dati sperimentali possono essere ritenuti validi solo per frequenze al di sopra di tale valore.

Le emissioni acustiche del pannello della barriera vanno valutate per un flusso a 25 m/s. Avendo a disposizione solo i dati a 20 e 30 m/s, Figura 4.21, si è fatto un *fitting* delle curve ed una media dei valori ottenuti, eliminando, come detto, il contributo della sola ala. In seguito, i dati sono stati riscritti nelle frequenze per conservare lo stesso  $St_d$ . Il risultato è riportato in Figura 4.22.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

I picchi che si osservano in corrispondenza di  $f = 2\text{kHz}$  sono attribuibili allo *shedding* di vortici dai bordi del pannello e pertanto non scalano con  $St_d$ . Tali picchi dipendono fortemente dalla distanza tra il bordo della piastra e il primo foro: minore è la distanza e minore è l'intensità dei picchi. Per avere un'accurata valutazione dei picchi, eventualmente presenti nel caso in esame, sarebbe necessario effettuare misure sperimentali sulla geometria effettiva.

I risultati così ottenuti si riferiscono al pannello, usato negli esperimenti, di area  $A_{Exp} = 0.1 \times 0.1 \text{m}^2$ .

Il rumore broadband scala linearmente con l'area del pannello [9], per cui lo spettro acustico del pannello in esame,  $SPL_{Barriera}$ , è dato da

$$SPL_{Barriera} = SPL_{Exp} + 10 \log \left( \frac{A_{Barriera}}{A_{Exp}} \right)$$

dove  $SPL_{Exp}$  è lo spettro misurato,  $A_{Exp}$  l'area del pannello su cui sono state effettuate le misure e  $A_{Barriera} = 3.31 \times 1.65 \text{m}^2$ . Nelle misure suddette l'osservatore è posto ad una distanza di  $r = 0.6\text{m}$ ; volendo ottenere il rumore in campo lontano,  $r = 55 \text{m}$ , i dati vengono scalati secondo la nota legge

$$SPL_{r_1} = SPL_{r_0} + 20 \log \left( \frac{r_0}{r_1} \right).$$

Il risultati finali sono riportati in figura Figura 4.23. Da sottolineare che lo spettro riportato risulta affetto da numerose componenti di incertezza che portano ad una significativa sovrastima della reale emissione aeroacustica dei pannelli, per effetto del metodo empirico adottato per la stima. Considerando inoltre che i fenomeni evidenziati in precedenza possono risultare significativamente alterati dall'inserimento dei pannelli all'interno del telaio di sostegno, lo spettro riportato in figura deve essere pertanto inteso in termini più qualitativi che quantitativi.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

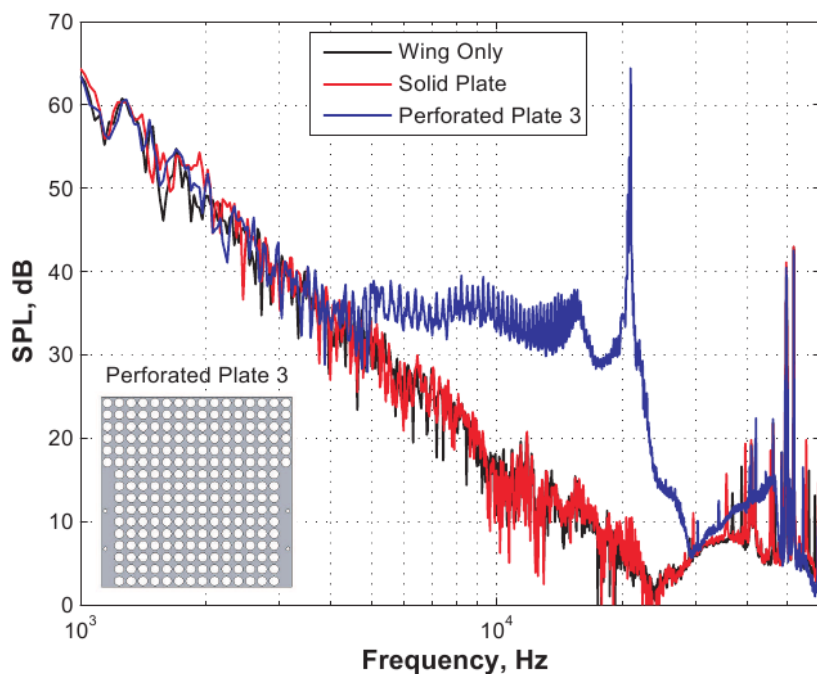


Figura 4.20 SPL misurato del pannello forato ( $L=0.1$  m) montato sull' ala di sostegno, dell' ala di sostegno isolata e di un piatto solido.  $\beta = 0.5027$ ;  $d/L=0.05$ ; osservatore posto a 0.6 m [9]

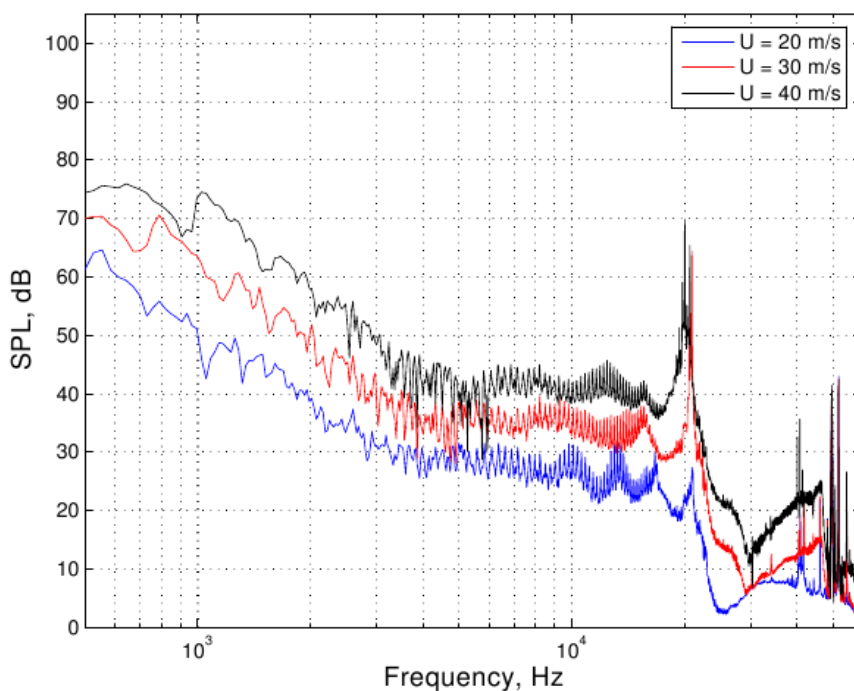


Figura 4.21 SPL misurato del pannello forato ( $L=0.1$  m) montato sull' ala di sostegno.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

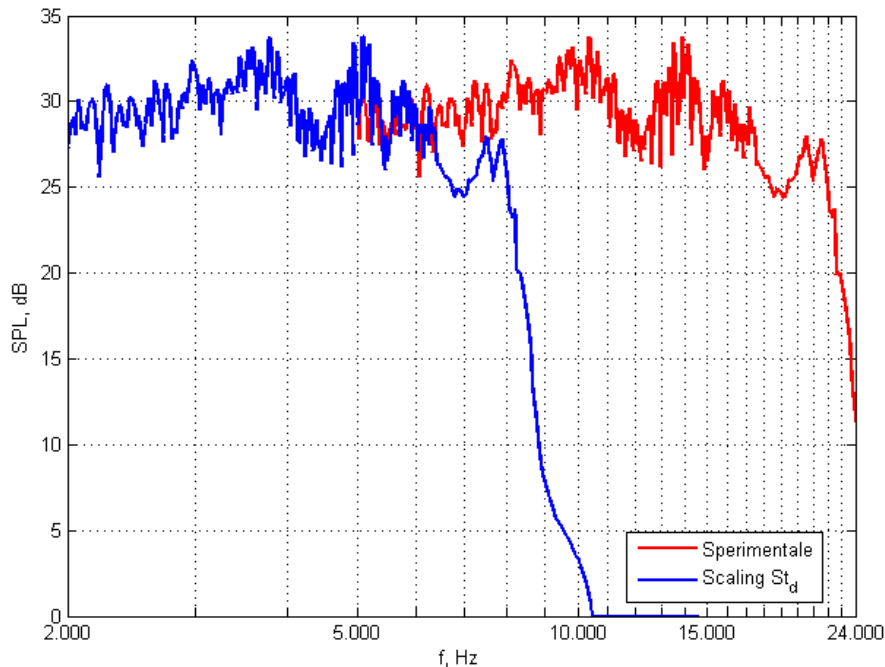


Figura 4.22 Spettro del contributo broadband riferito a un pannello avente area  $A=0.01 \text{ m}^2$  (rosso) e scaling per garantire parità del numero di Strouhal  $St_d$  (blu).

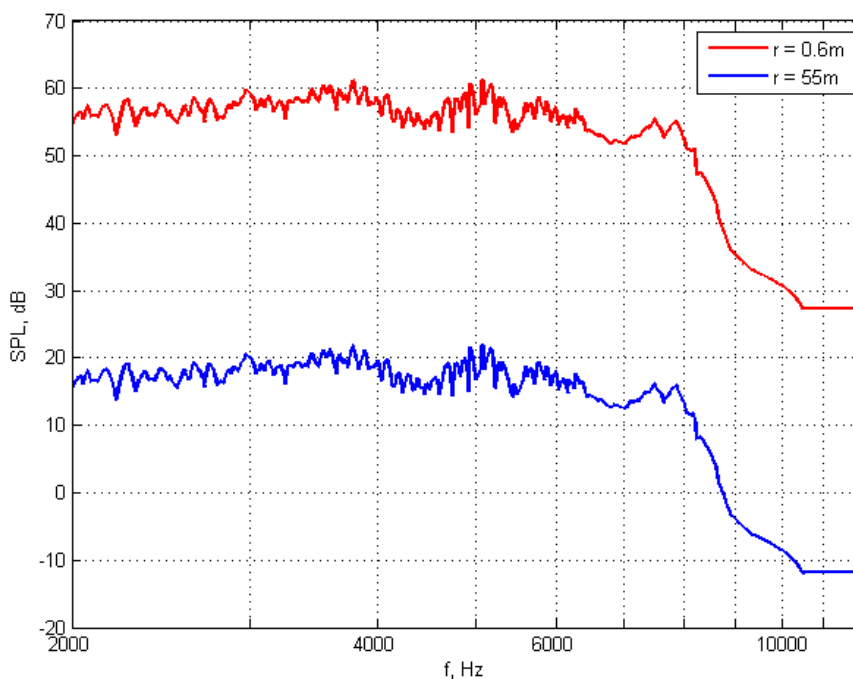


Figura 4.23 Spettro del contributo broadband riferito a un pannello avente area  $A=5.46 \text{ m}^2$  (rosso) e scaling per un osservatore in campo lontano (blu).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 4.2.2 Ala di irrigidimento barriere frangivento esterne

Analizzando la struttura delle barriere frangivento esterne, oltre ai pannelli forati, di cui si è trattato precedentemente, un'altra potenziale sorgente di rumore è identificabile nell'ala di irrigidimento posta alla sommità delle barriere stesse (Figura 4.24).

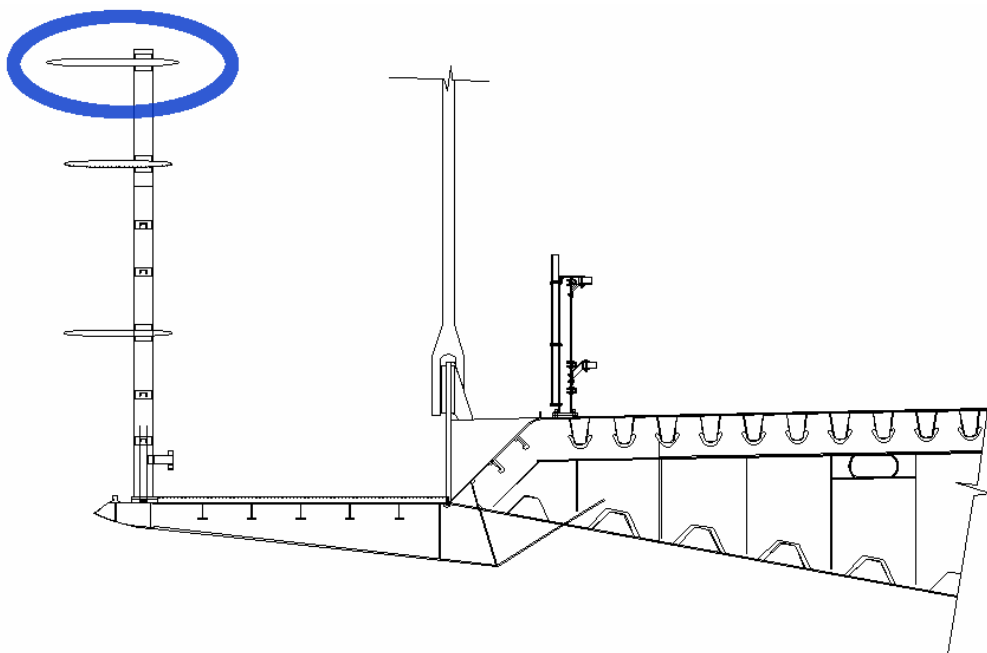


Figura 4.24 Ala di irrigidimento esterna

Assumendo un campo di moto bidimensionale, il rumore generato da un profilo immerso in una corrente subsonica dipende, in larga parte, dal numero di Reynolds, basato sulla corda, e dall'angolo di incidenza. Dalle analisi sperimentali di Brook *et al.*[11] le diverse configurazioni possono riassumersi in Figura 4.25. Per alti numeri di  $Re_c$ , lo strato limite sul profilo è in gran parte turbolento; il passaggio di questo flusso vorticoso sul bordo di fuga ed il conseguente repentino cambio di condizione al contorno è causa di rumore broadband. Per bassi numeri di Reynolds, invece, lo strato limite è in larga parte laminare ed il rumore associato è di natura tonale, essendo legato al fenomeno di distacco di vortici al bordo di fuga. Questo fenomeno è presente anche per profili con bordo di fuga tagliato. Ad angoli di incidenza molto elevati la corrente si separa formando una bolla di ricircolo. In queste condizioni di stallo, si osservano picchi tonali a bassa frequenza legati a fluttuazioni di pressione indotte sulla superficie del profilo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

Nel caso in esame, gli angoli di incidenza statisticamente più frequenti sono tali da poter considerare il flusso attaccato. Inoltre, assumendo la corrente a 25 m/s si ha

$$Re_c = \frac{25 \cdot 1.56}{1.5 \cdot 10^{-5}} \approx 2.6 \cdot 10^6.$$

Per tali valori del numero di Reynolds, lo strato limite al bordo di fuga risulta essere sicuramente turbolento. Pertanto, il rumore dominante sarà di natura broadband ed è possibile stimarlo attraverso modelli analitici.

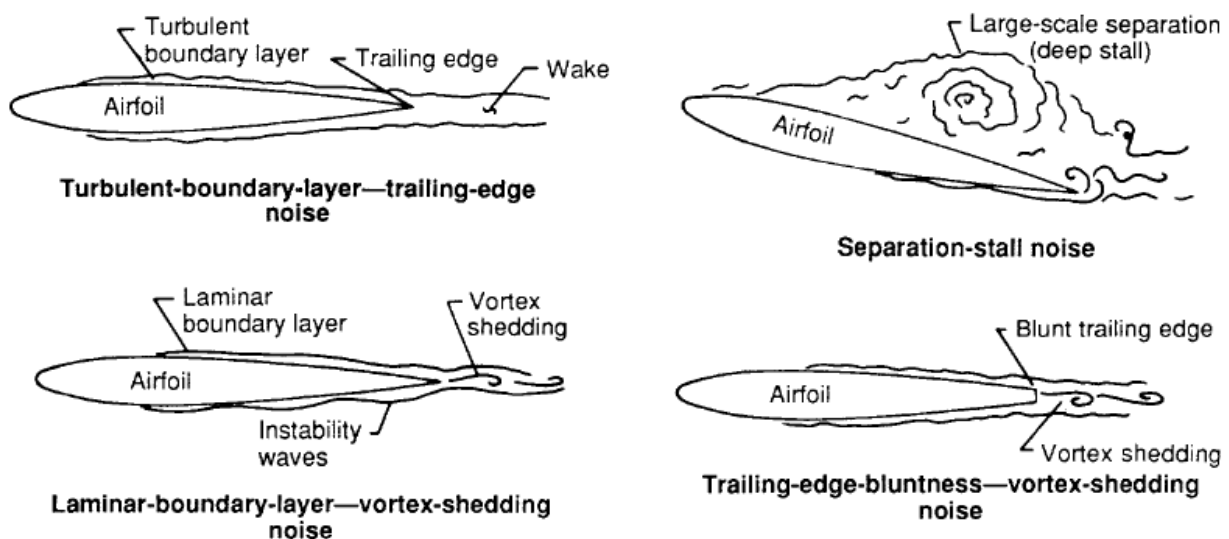


Figura 4.25 Campo di moto attorno ad un profilo al variare del numero di Reynolds

Nel 1976, Amiet propose un modello analitico per la predizione del rumore di bordo di fuga [12], come estensione di un metodo utilizzato per calcolare lo spettro acustico, in campo lontano, di un profilo investito da una corrente turbolenta [13]. Nel 2005, Roger *et al.* [14] hanno esteso il modello di Amiet ad un profilo di lunghezza finita. Il rumore aerodinamico è ricondotto ad un problema di *scattering* lineare delle onde acustiche. La corrente vorticososa che investe il bordo di fuga interagisce con la vorticità secondaria derivante dalla condizione di Kutta. Pertanto, l'inerzia del flusso è modificata dall'impatto con una singolarità geometrica dando così origine al rumore broadband.

L'espressione finale dello spettro di pressioni acustiche in campo lontano è la seguente :

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

$$S_{pp}(\vec{x}, \omega) = \left( \frac{\omega c x_3}{2\pi c_0 S_0^2} \right)^2 \frac{L}{2} \left| \mathfrak{N} \left( \frac{\omega}{U_c}, \frac{\bar{k} x_2}{S_0} \right) \right|^2 \Phi_{pp}(\omega) l_y(\omega).$$

La posizione dell'osservatore è definita da un sistema di coordinate centrato sul bordo di fuga a metà della lunghezza *spanwise*.  $x_1$  è allineato con la velocità all'ingresso,  $x_2$  è lungo il bordo di fuga e  $x_3$  è perpendicolare ad  $x_1$  e  $x_2$ .  $L$  e  $c$  rappresentano rispettivamente l'estensione *spanwise* e la corda del profilo,  $S_0$  è la distanza corretta per tener conto degli effetti di convezione e  $U_c$  è la velocità media di convezione dei disturbi nello strato limite.  $\mathfrak{N} = \mathfrak{N}_1 + \mathfrak{N}_2$  è una funzione di trasferimento dove  $\mathfrak{N}_1$  è il termine principale definito da Amiet [12] e  $\mathfrak{N}_2$  rappresenta la correzione per il *back-scattering* del bordo di attacco [14].  $\Phi_{pp}$  è lo spettro delle pressioni a parete vicino al bordo di fuga, dovuto solo alla turbolenza incidente (si ignorano le modifiche legate alla condizione di Kutta). Infine,  $l_y$  rappresenta la lunghezza di correlazione *spanwise*. Il punto cruciale del modello è ottenere informazioni su  $\Phi_{pp}$  e  $l_y$ . Quest'ultima può essere ricavata sperimentalmente oppure può essere calcolata attraverso modelli semiempirici. Un noto modello per la lunghezza di correlazione *spanwise* è quello proposto da Corcos [8]

$$l_y = \frac{\beta U_c}{\omega}.$$

$\beta$  rappresenta una costante empirica, mentre  $U_c$  può essere valutata in funzione della velocità esterna  $U_0$ :

$$U_c = (0.7 - 0.9)U_0.$$

Lo spettro di pressioni a parete,  $\Phi_{pp}$ , è valutato utilizzando il modello di Goody [15], che tiene conto degli effetti del Reynolds. La forma finale semi-empirica è la seguente:

$$\frac{\Phi_{pp}(\omega)U_0}{\tau_p^2 \delta^*} = \frac{0.78(1.8\Pi\beta_c + 6)(\omega\delta^*/U_0)^2}{\left[ (\omega\delta^*/U_0)^{0.75} + C_1 \right]^{3.7} + [C_3(\omega\delta^*/U_0)]^7}$$

dove  $C_1=0.105$ ,  $C_3 = 3.76R_T^{-0.57}$  e  $R_T = (\delta/U_0)/(v/u_\tau^2) = (u_\tau \delta/v)\sqrt{C_f/2}$  è il rapporto tra la scala temporale esterna ed interna allo strato limite.  $\beta_c = (g/\tau_w)(dp/dx)$  è detto parametro di Clauser [16] mentre  $\Pi$  è un parametro di scia definito da Coles [17], ottenuto risolvendo la seguente

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento <i>AC0081_F0.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

equazione

$$2\Pi - \ln(1 + \Pi) = \frac{\kappa U_0}{u_\tau} - \ln\left(\frac{\delta^* U_0}{\nu}\right) - \kappa C - \ln \kappa$$

con  $\kappa = 0.41$ ,  $C = 5.1$ .

La formula per il calcolo dello spettro di pressioni a parete richiede i valori di strato limite in un punto vicino al bordo di fuga, tipicamente al 95% della corda. Tali valori sono ricavati utilizzando il codice di calcolo XFOIL sviluppato al Massachusetts Institute of Technology (MIT), ottenendo i valori di  $\delta^*$  e di  $\theta$  riportati in Figura 4.26. Tale programma permette anche di ottenere l'andamento del coefficiente di pressione, Figura 4.27, da cui è possibile valutare il gradiente ( $dp/dx$ ). Per il profilo in esame si ottengono i seguenti parametri:  $\delta^* = 0.001406 \text{ m}$ ,  $\theta = 0.00063 \text{ m}$ ,  $\tau_w = 0.49 \text{ Pa}$  e  $dp/dx = 5494 \text{ Pa/m}$ .

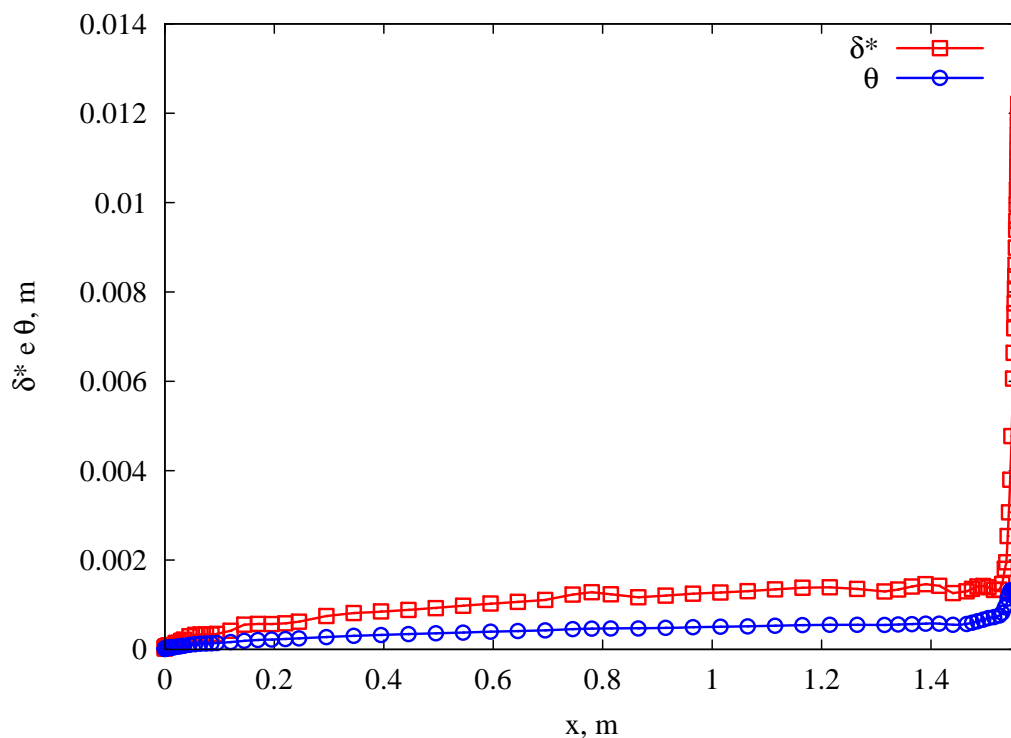


Figura 4.26 Andamento dei parametri dello strato limite lungo la corda del profilo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

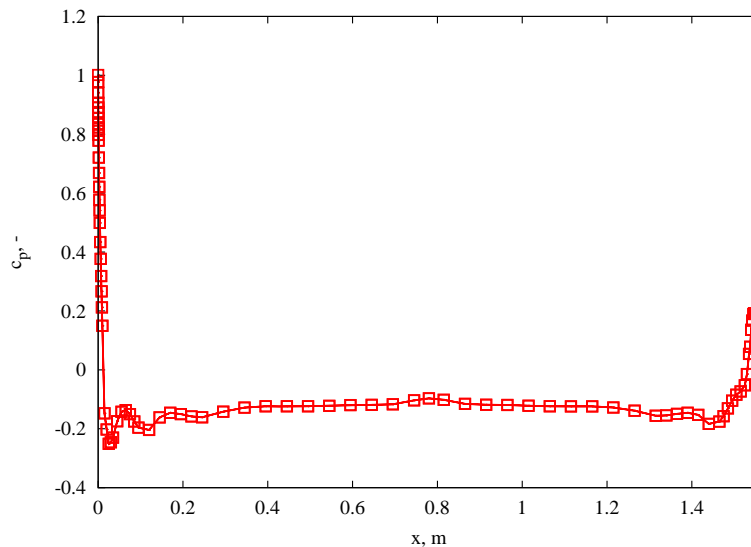


Figura 4.27 Andamento del  $C_p$  lungo la corda del profilo

Il rumore emesso dal profilo avrà quindi un andamento dipolare. In figura Figura 4.28 è riportato lo spettro acustico valutato lungo la direzione di massima emissione, ovvero sulla verticale del bordo di fuga, per un osservatore posto ad una distanza di 55 m. Come evidente, i livelli sonori associati all' ala di sostegno sono estremamente bassi e pertanto se ne trascura il contributo in sede di valutazione aeroacustica complessiva.

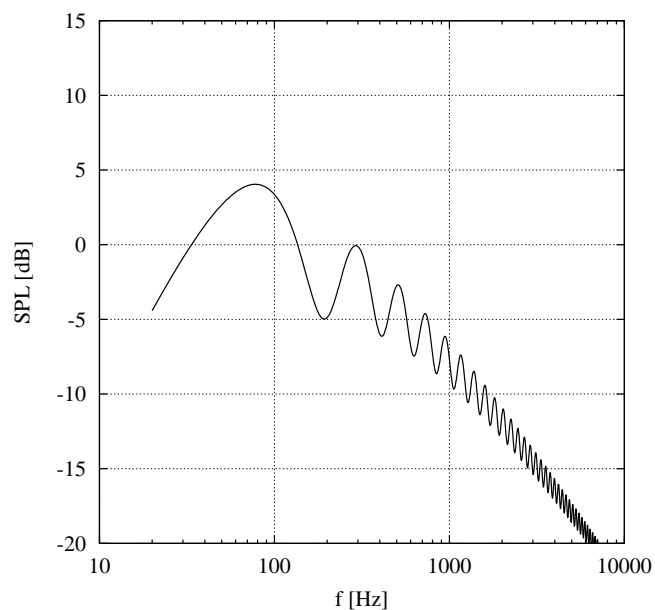


Figura 4.28 Spettro dell'emissione acustica dell'ala di irrigidimento per un osservatore posto a 55 m sulla verticale del bordo di fuga

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

### 4.3 Conclusioni

Le analisi preliminari condotte in questo capitolo hanno evidenziato gli elementi strutturali potenzialmente sorgenti di rumore. In Tabella 4.2 sono riportate quali sono le analisi delle emissioni aero-acustiche che verranno condotte su ciascun elemento individuato.

Elemento	Analisi da effettuare	
	U = 25m/s	U = 30m/s
Pendino F1	✓	✓
Pendino F2	✓	✓
Pendino F3	✓	✓
Pendino F4	✓	✓
Cavo di supporto della rete ferroviaria	✓	✗
Cavo di alimentazione ferrovia	✓	✗
Cavo di terra	✓	✗
Cavo principale	✗	✗
Piloni	✗	✗
Barriere frangivento	✗	✗
Ala di irrigidimento	✗	✗

Tabella 4.2 Elenco delle analisi aero-acustiche da condurre su ciascun elemento



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 5 Analisi Aeroacustica elementi lineari

In questo capitolo verranno presentate le simulazioni numeriche dettagliate sugli elementi lineari in configurazione isolata o tandem, analizzati nel capitolo 3. Come suddetto, vengono tralasciati gli elementi il cui spettro di frequenze principali esula dal range dell'udibile.

### 5.1 Pendini

Lo studio delle emissioni acustiche dei pendini investiti da una corrente a  $U=25$  m/s e 30 m/s è oggetto di studio in questa sezione. Per tutte le configurazioni si utilizza una discretizzazione simile a quella del pendino F1, descritta nel capitolo 2. Il dominio di calcolo è analogo a quanto riportato in Figura 2.2. La discretizzazione è fatta usando una griglia di calcolo strutturata formata da circa 80000 elementi quadrangolari e raffinata a parete in modo da garantire una  $y^+$  minore dell'unità su tutto il cilindro. La formulazione di Ffowcs Williams & Hawkings è stata applicata scegliendo come superficie di integrazione un cilindro dello stesso diametro del pendino e avente una lunghezza *spanwise* pari a 35 diametri.

Di seguito vengono presentati il campo di moto fluidodinamico ed i risultati acustici ottenuti per i diversi pendini alle due velocità di  $U=25$  m/s e 30m/s. Per quanto riguarda il campo fluidodinamico, vengono presentati i campi istantanei di velocità e pressione, inoltre, in Tabella 5.1 vengono fornite le frequenze di *shedding* associate ai diversi pendini. Per la parte acustica si riporta lo spettro lungo la direzione di massima emissione e la direttività valutati per un osservatore posto ad una distanza pari a 2 volte il diametro del pendino.

Codice Sezione Pendino	Diametro [mm]	Frequenza Shedding [Hz]	
		U = 25m/s	U = 30m/s
F1	106	62.4	76.3
F2	113	58.7	70.0
F3	147	46.0	56.0
F4	190	36.3	44.4

Tabella 5.1 Pendini: Frequenze di shedding del tono principale

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

### 5.1.1 Sezione F1

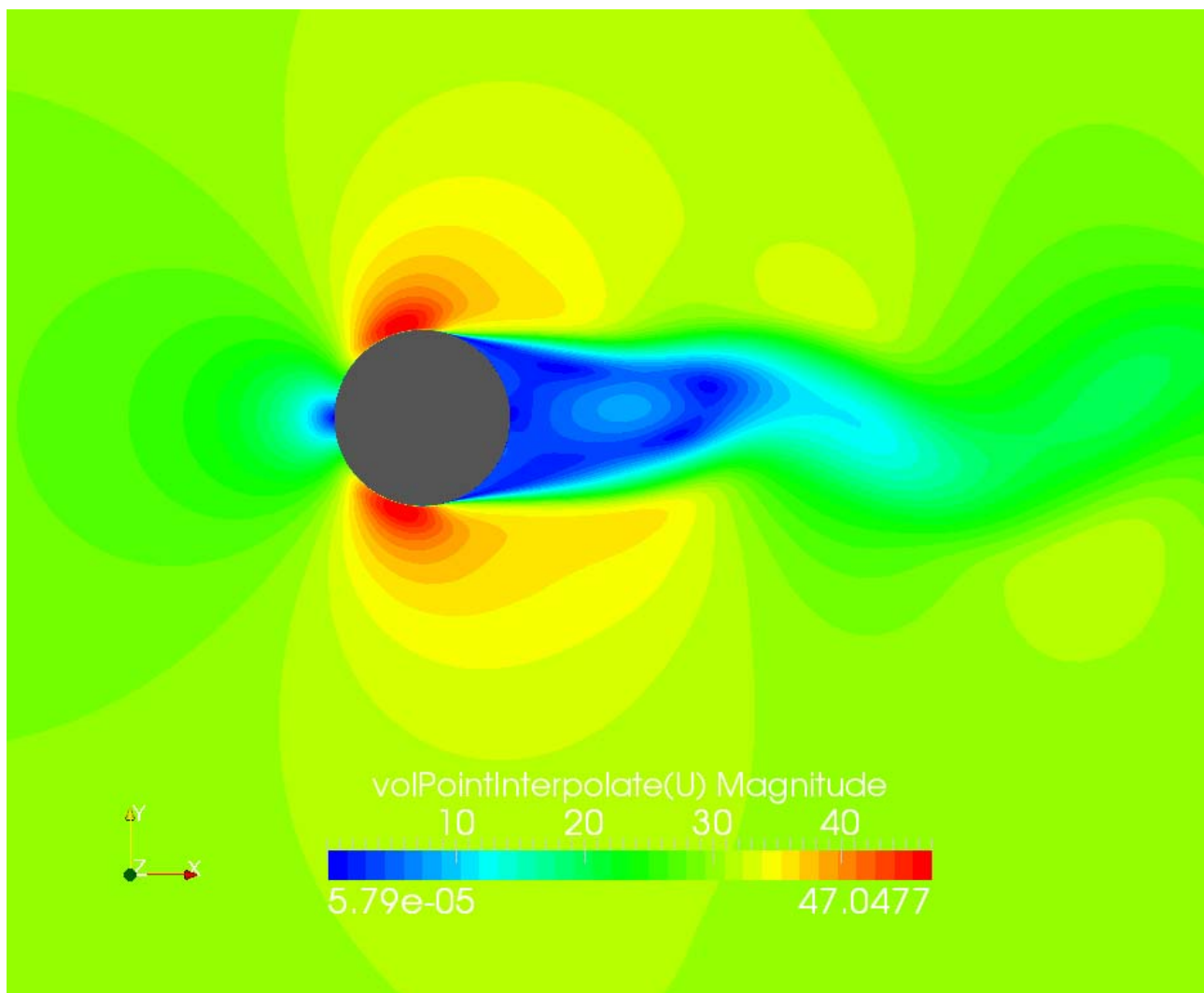


Figura 5.1 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F1 per una velocità di 25 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

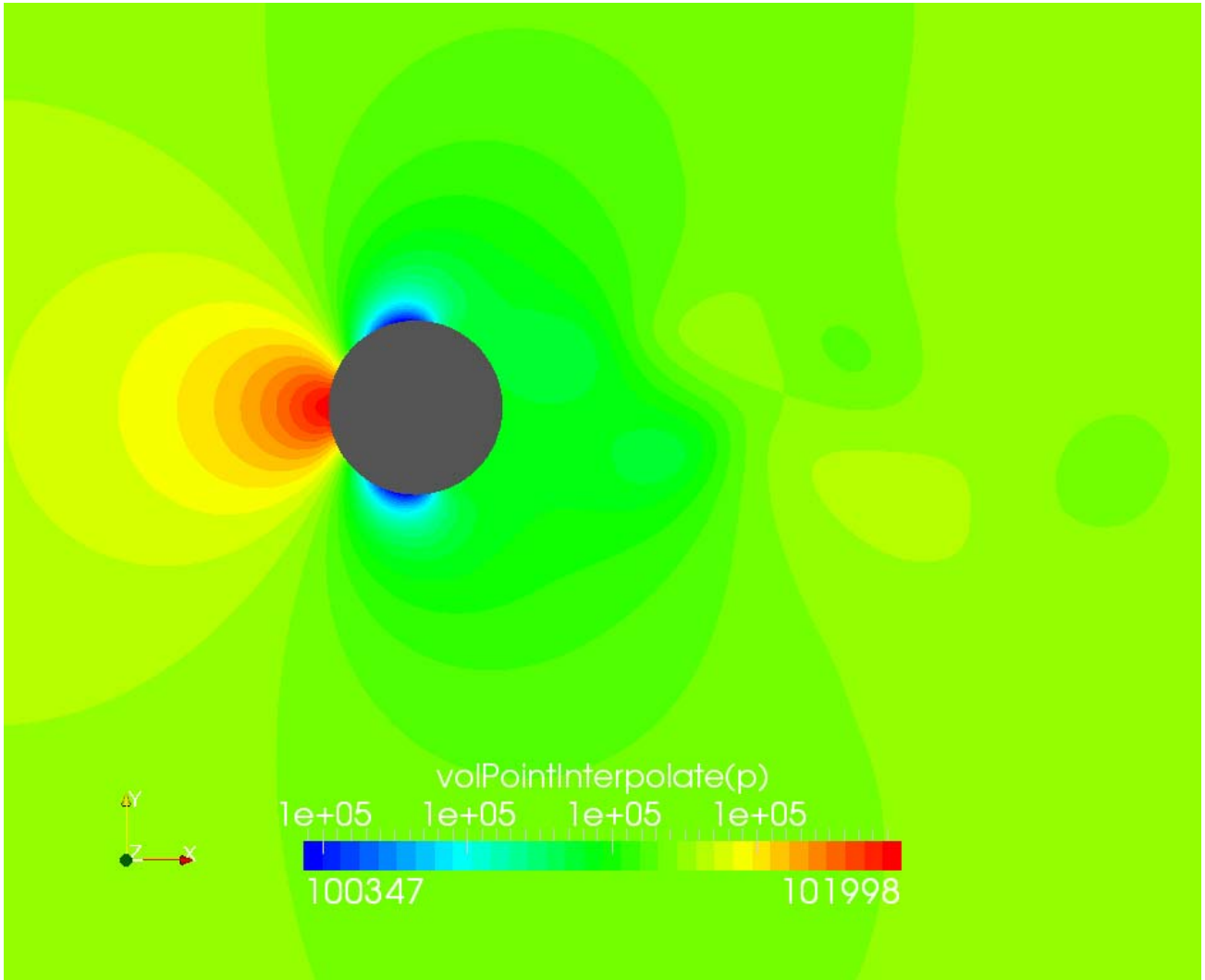


Figura 5.2 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F1 per una velocità di 25 m/s: pressione istantanea

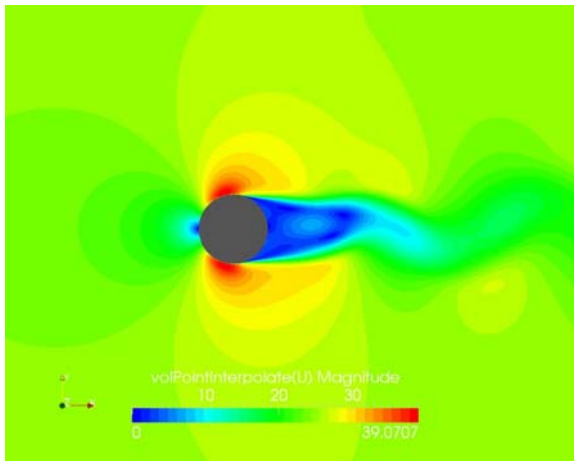
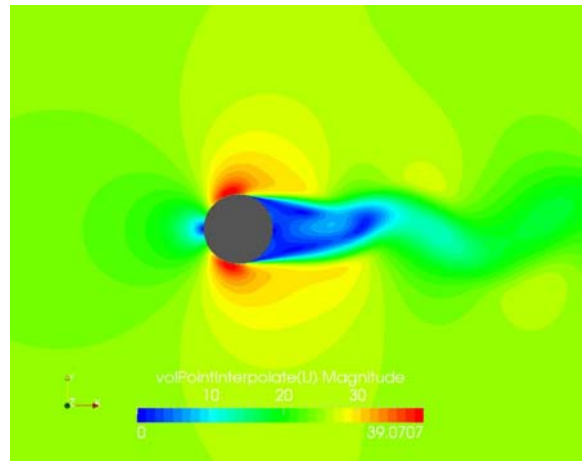
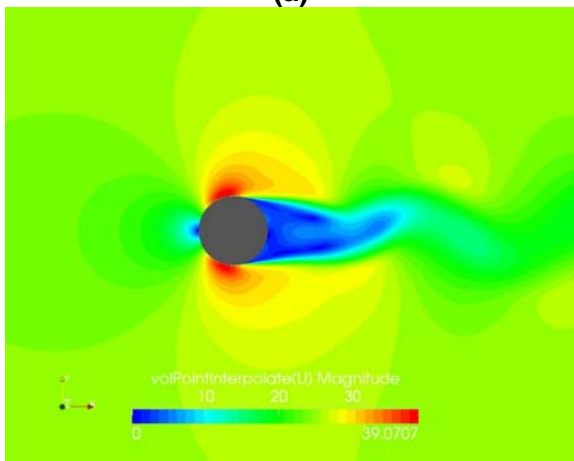
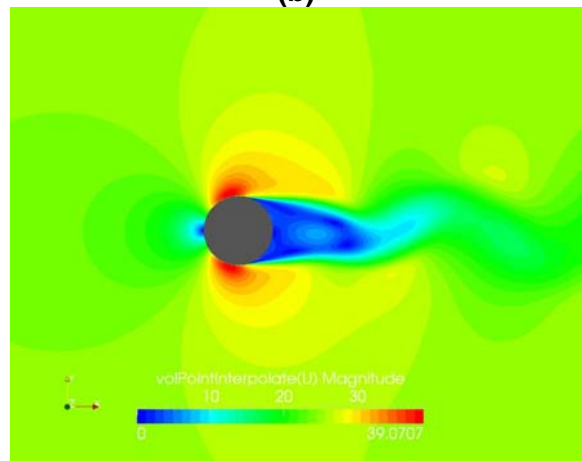
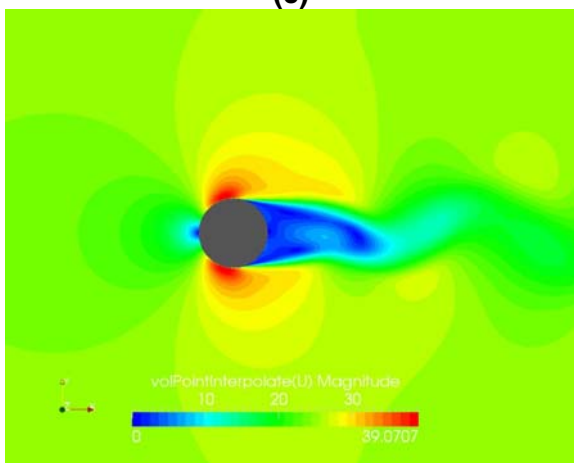
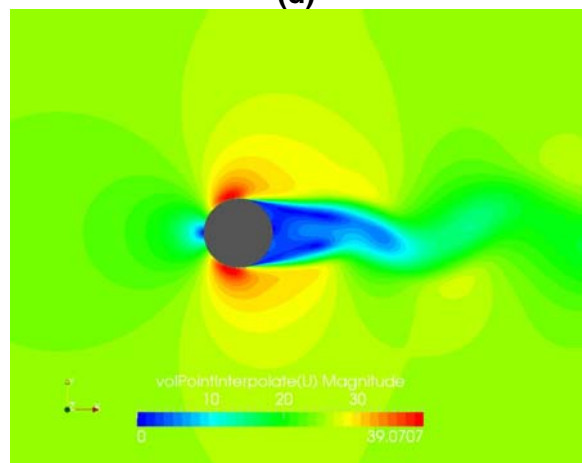
**(a)****(b)****(c)****(d)****(e)****(f)**

Figura 5.3 Storia temporale di un periodo di shedding del campo di velocità istantanea attorno al pendino F1 per una velocità di 25 m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

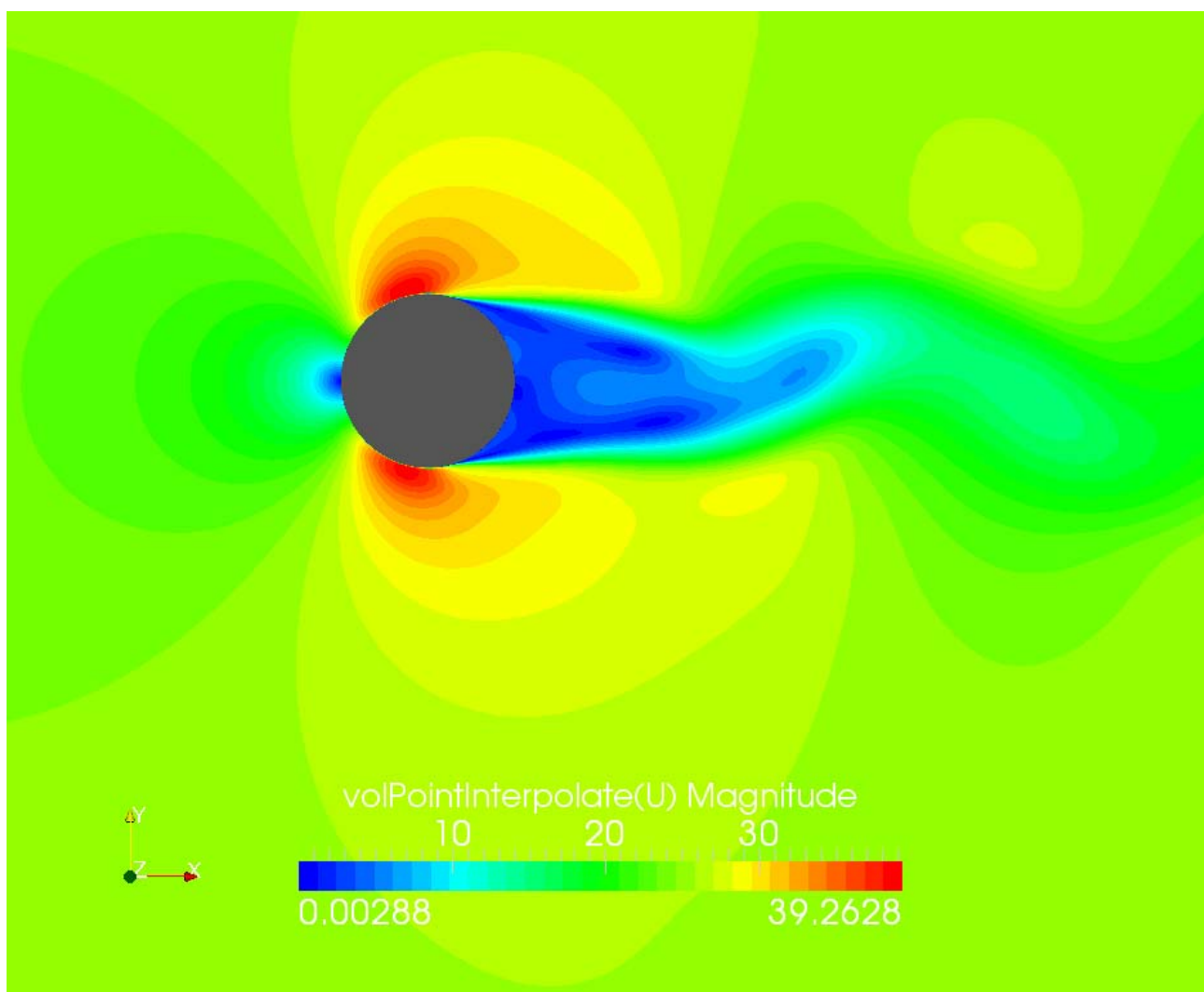


Figura 5.4 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F1 per una velocità di 30 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

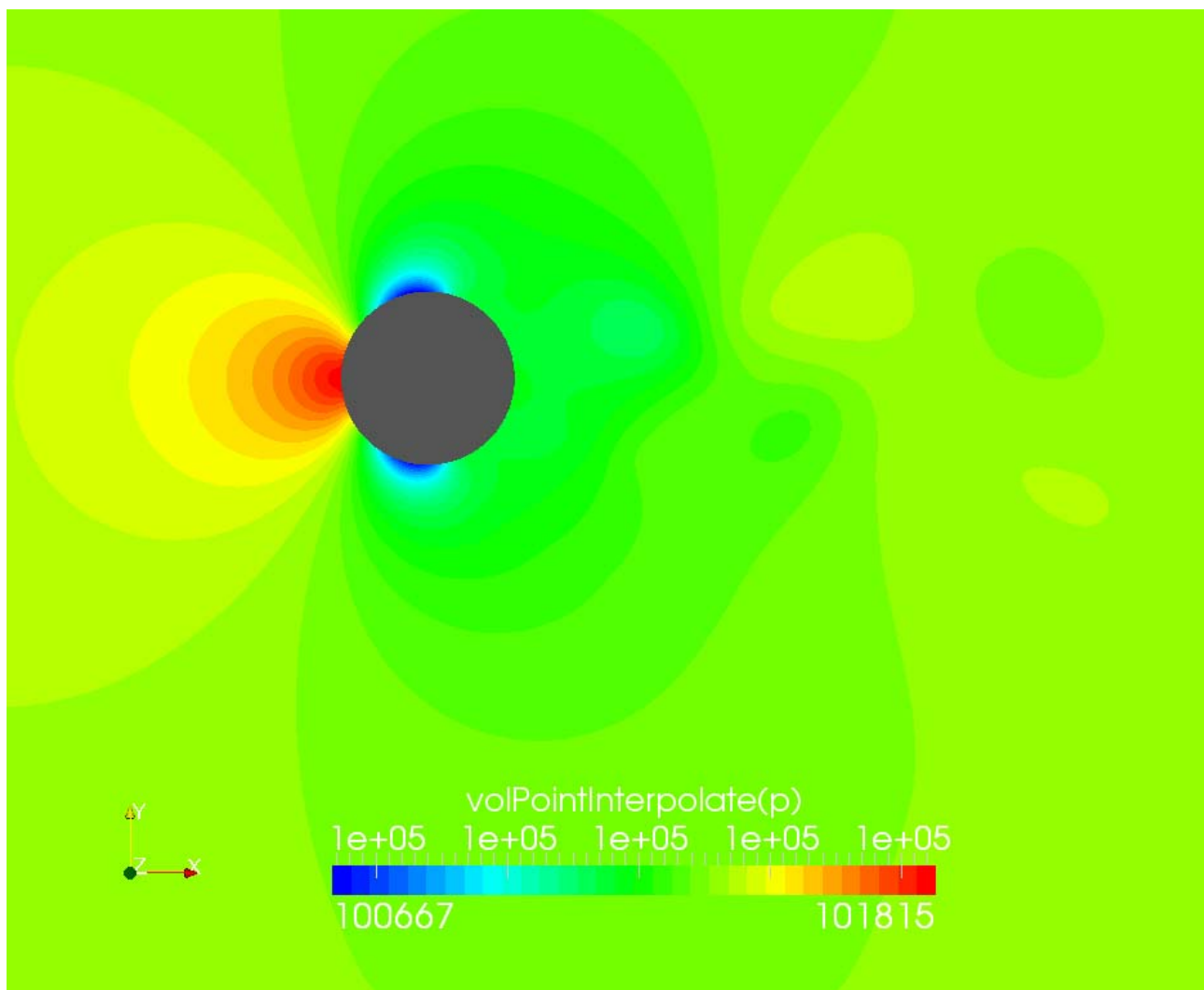


Figura 5.5 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F1 per una velocità di 30 m/s: pressione istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

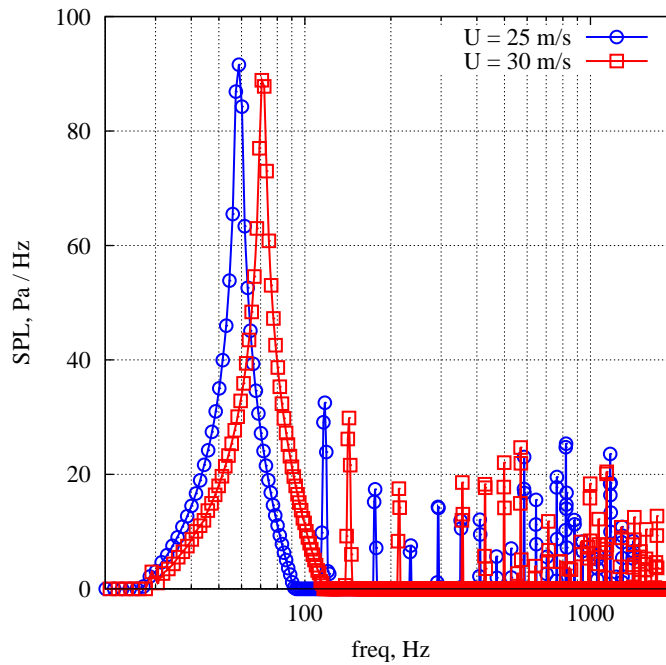


Figura 5.6 Spettro delle emissioni acustiche del pendino F1

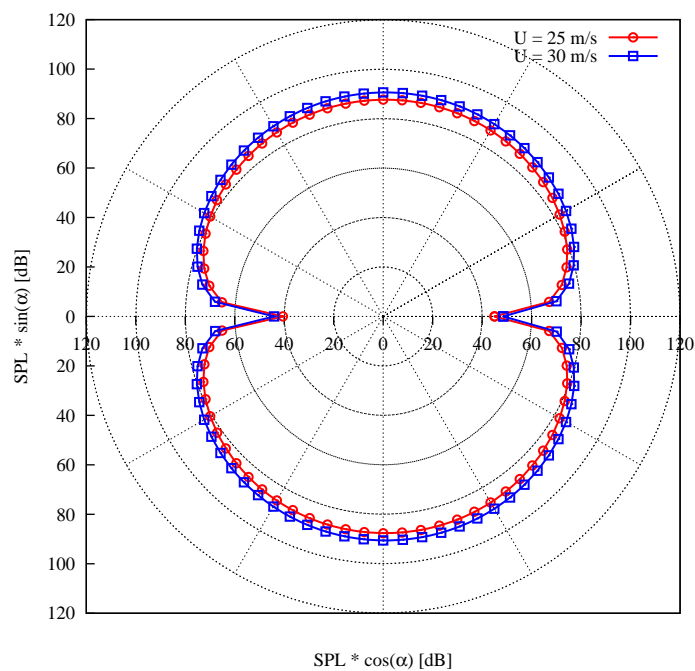


Figura 5.7 Direttività delle emissioni acustiche del pendino F1

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 5.1.2 Sezione F2

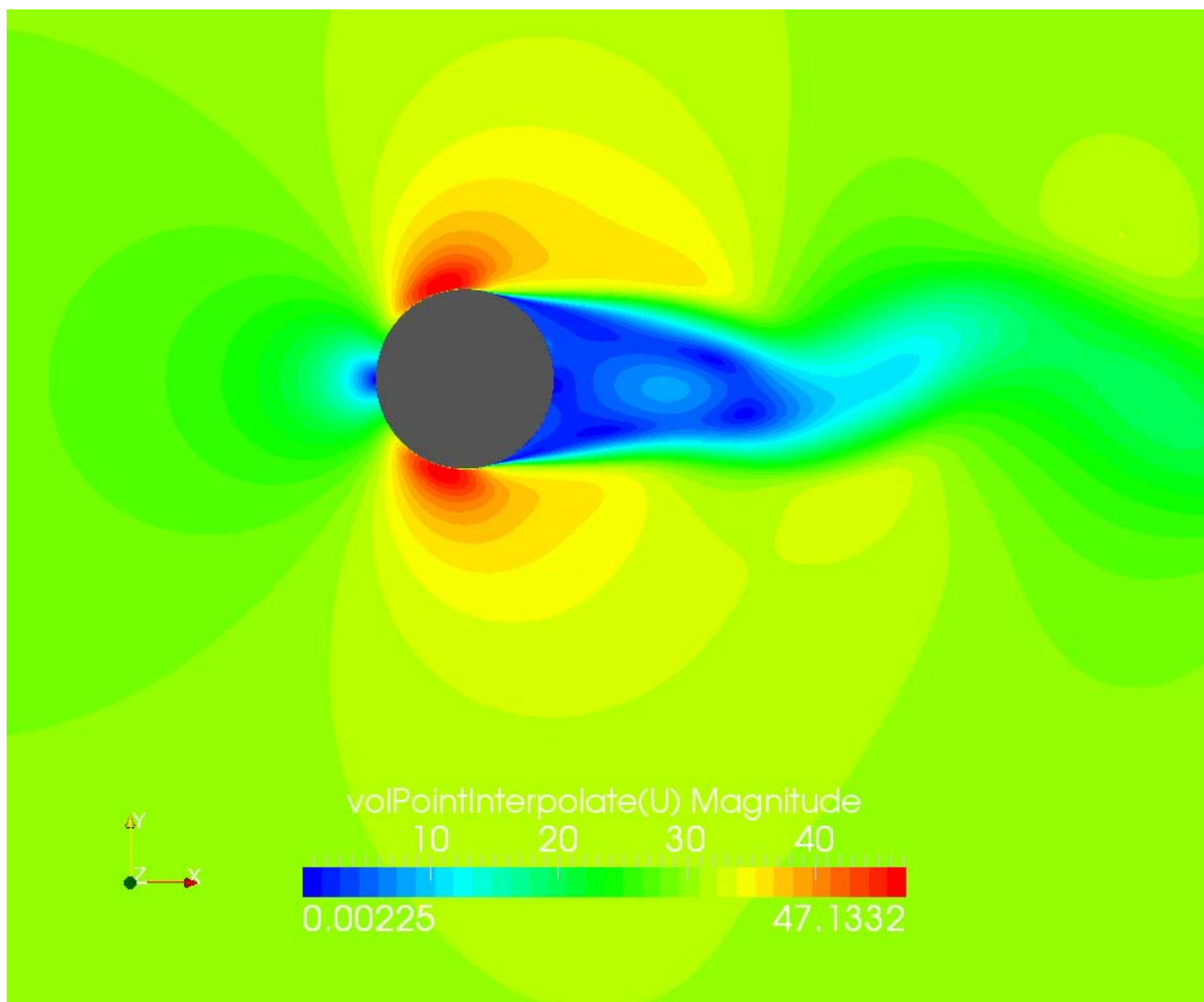


Figura 5.8 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F2 per una velocità di 25 m/s: modulo della velocità istantanea



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

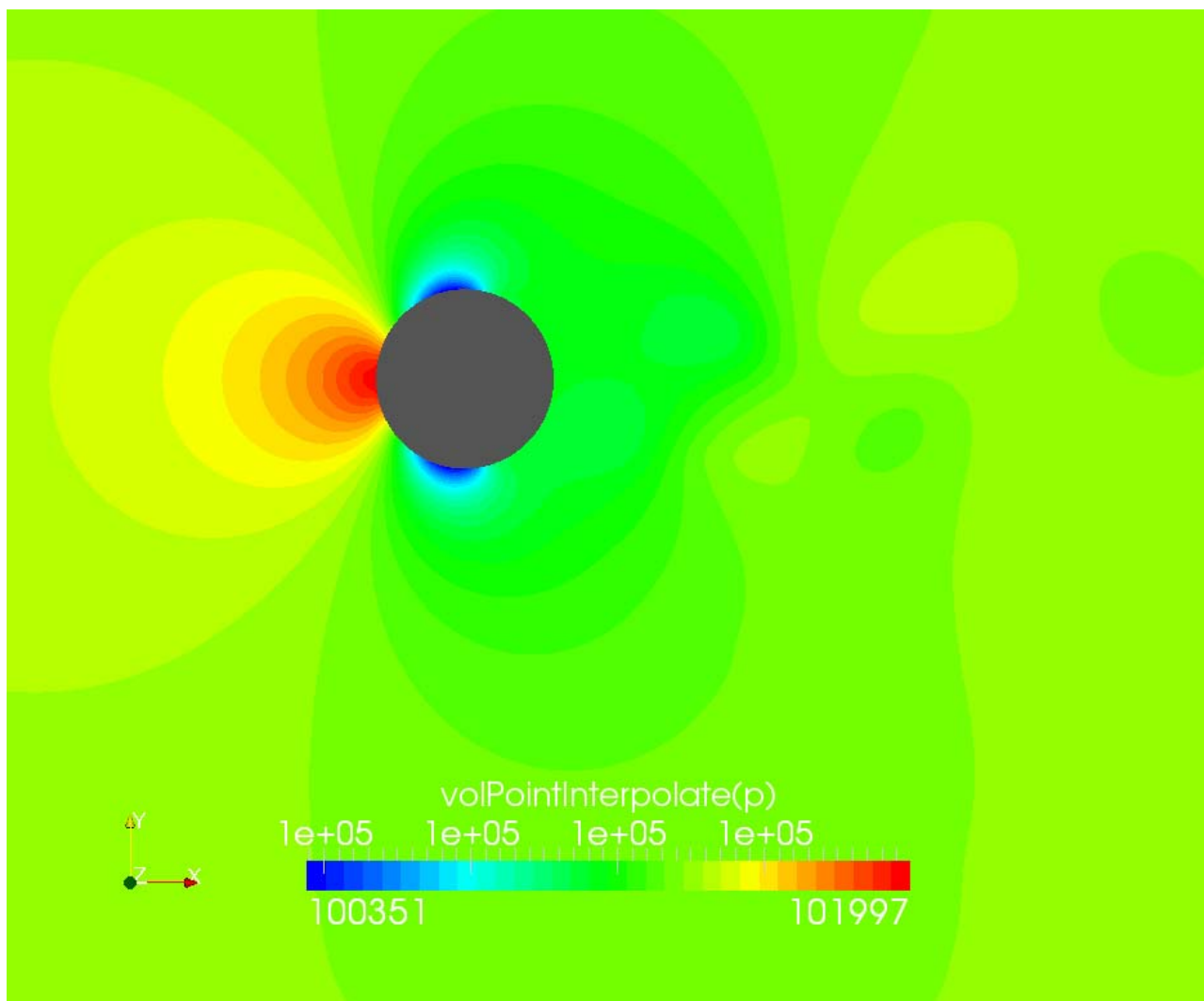


Figura 5.9 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F2 per una velocità di 25 m/s: pressione istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

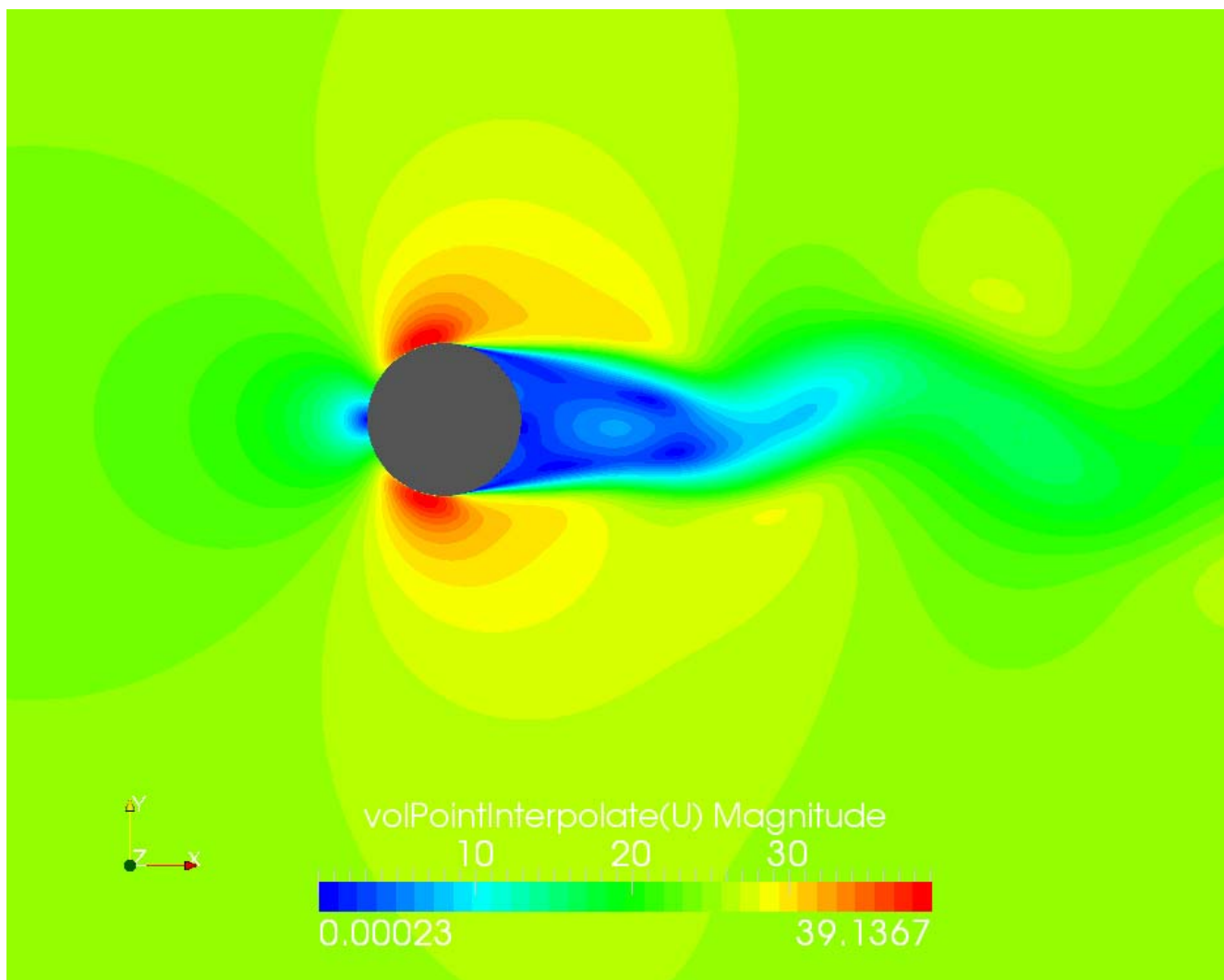


Figura 5.10 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F2 per una velocità di 30 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

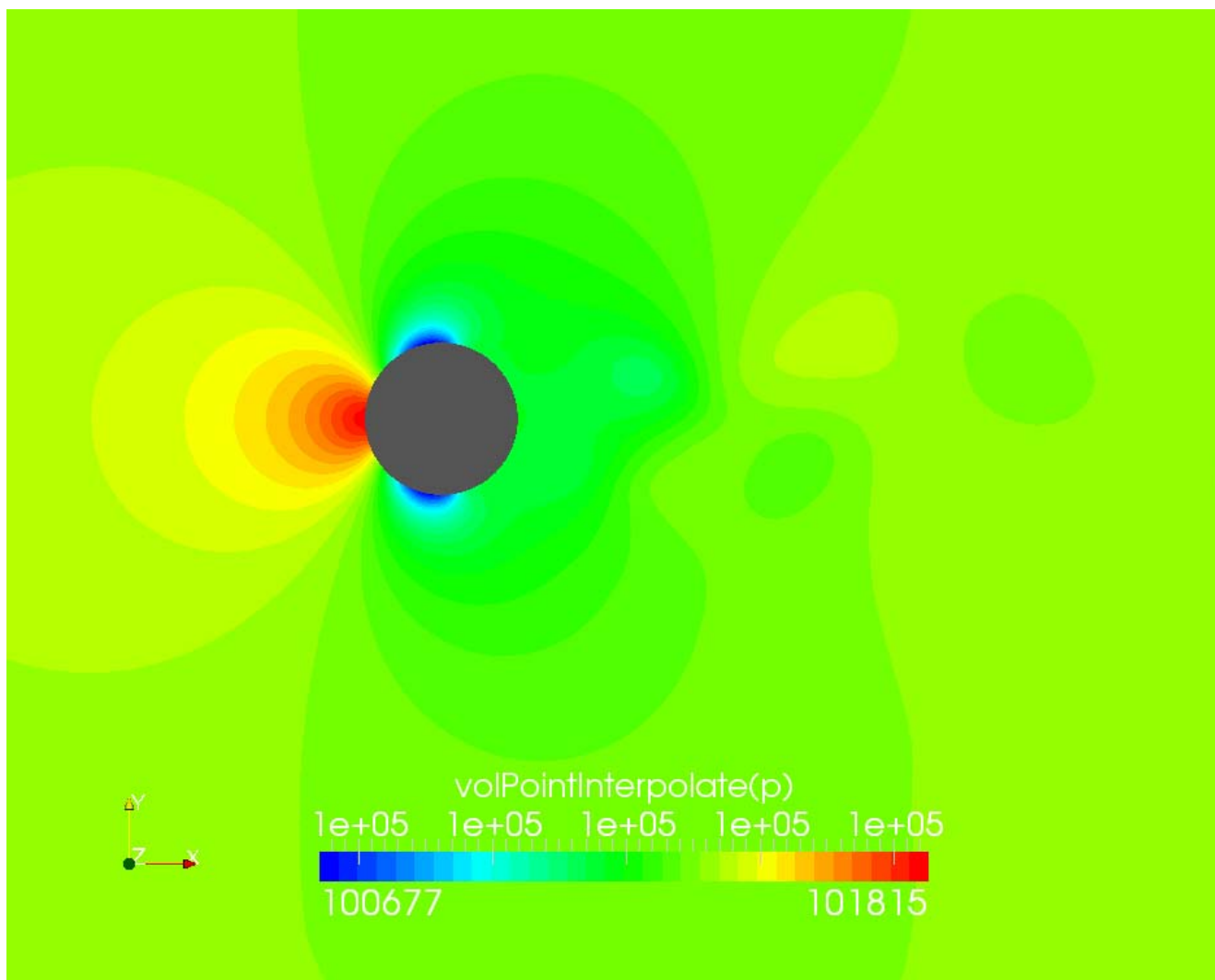


Figura 5.11 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F2 per una velocità di 30 m/s: pressione istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

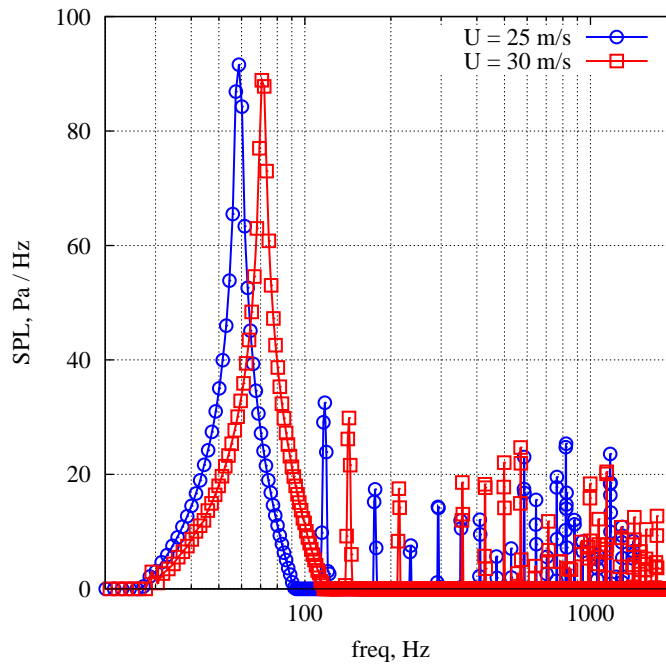


Figura 5.12 Spettro delle emissioni acustiche del pendino F2

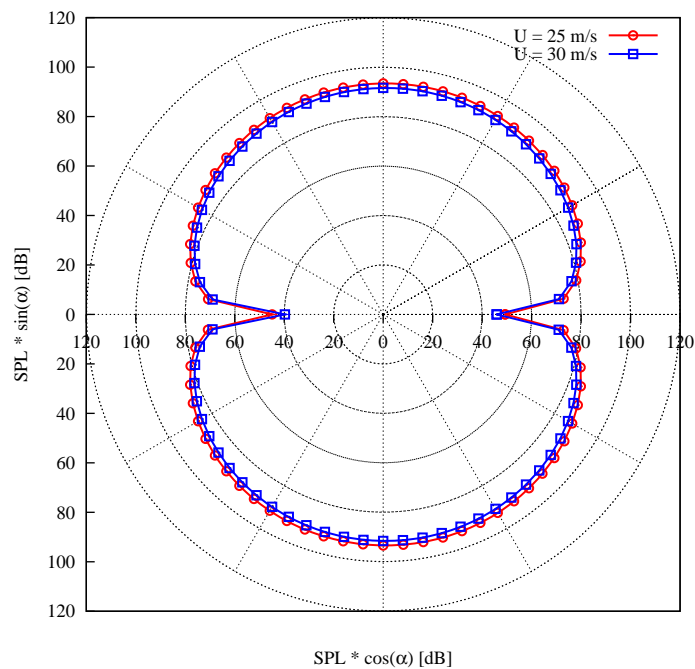


Figura 5.13 Direttività delle emissioni acustiche del pendino F2

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

### 5.1.3 Sezione F3

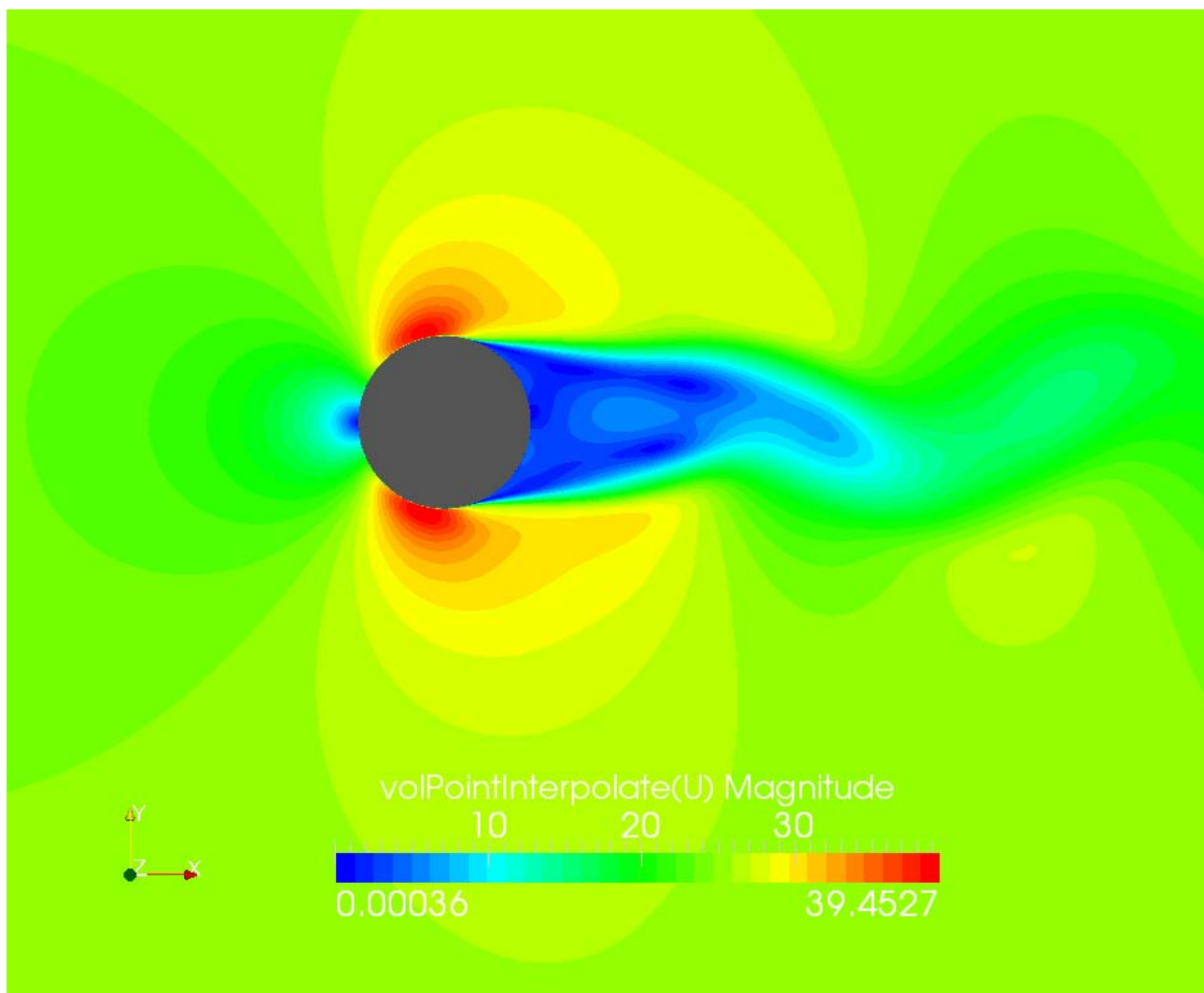


Figura 5.14 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F3 per una velocità di 25 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

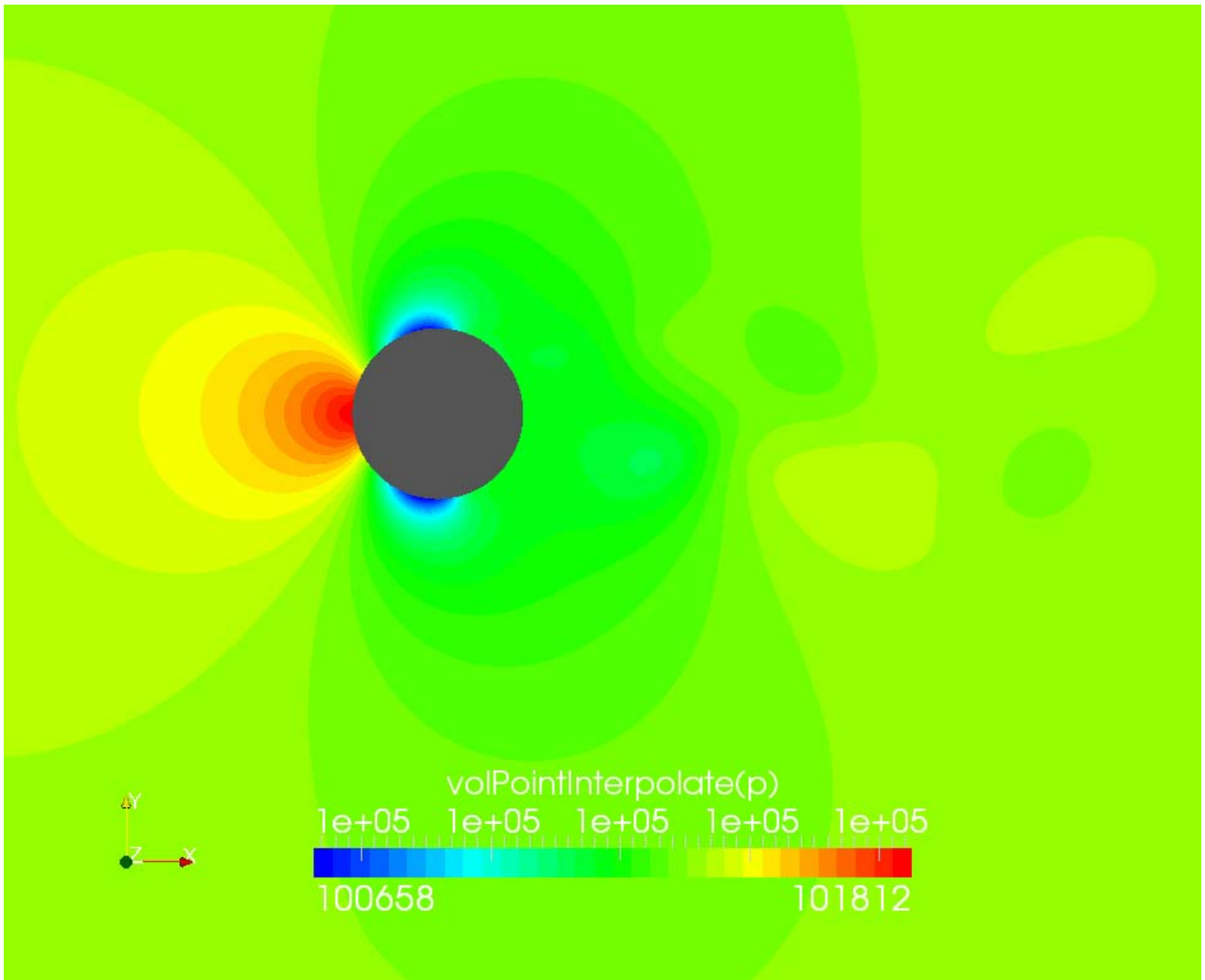


Figura 5.15 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F3 per una velocità di 25 m/s: pressione istantanea







		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

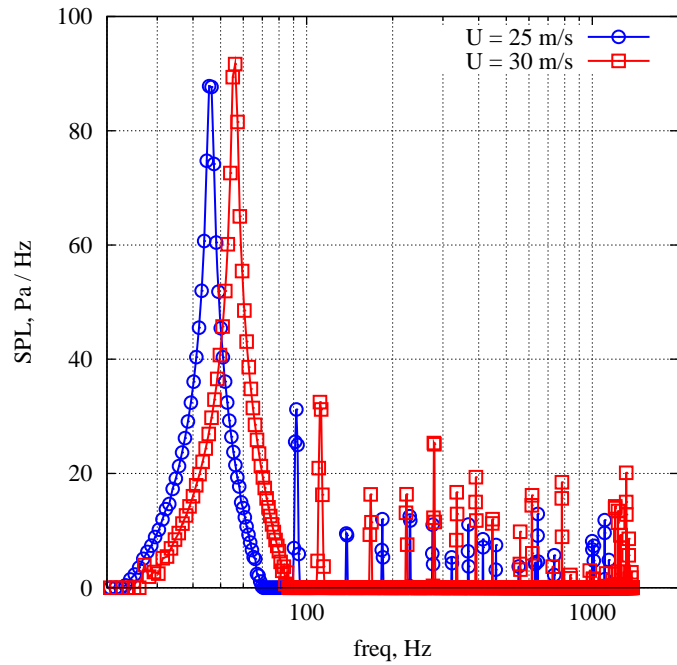


Figura 5.18 Spettro delle emissioni acustiche del pendino F3

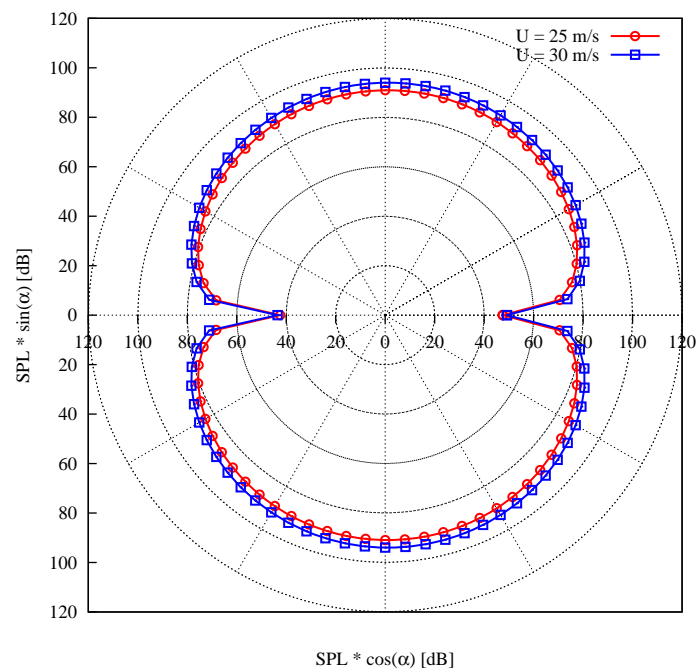


Figura 5.19 Direttività delle emissioni acustiche del pendino F3

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>					
<p>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</p>		<p>Codice documento AC0081_F0.doc</p>	<table border="1"> <tr> <td>Rev</td> <td>Data</td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						

#### 5.1.4 Sezione F4

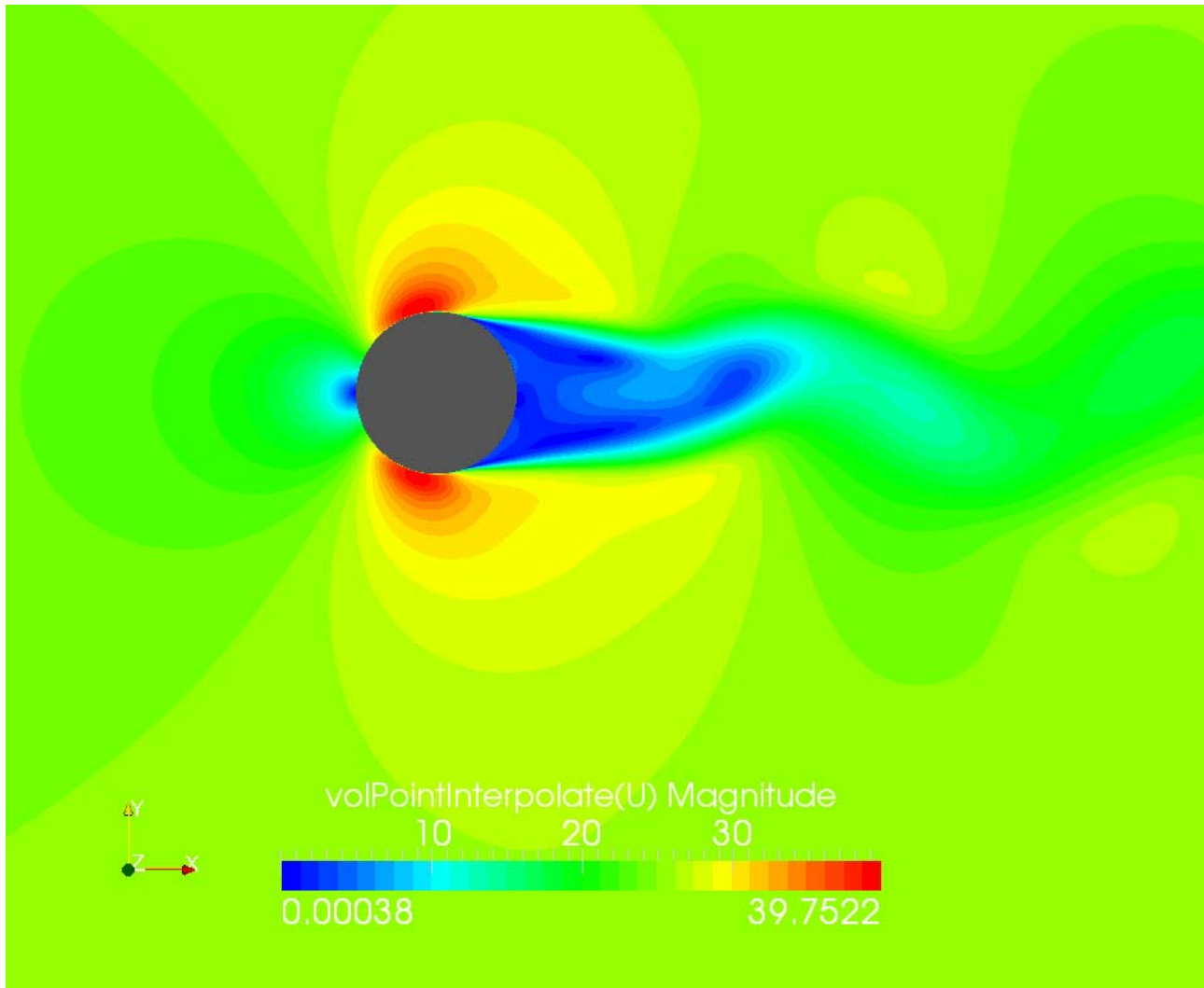


Figura 5.20 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F4 per una velocità di 25 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

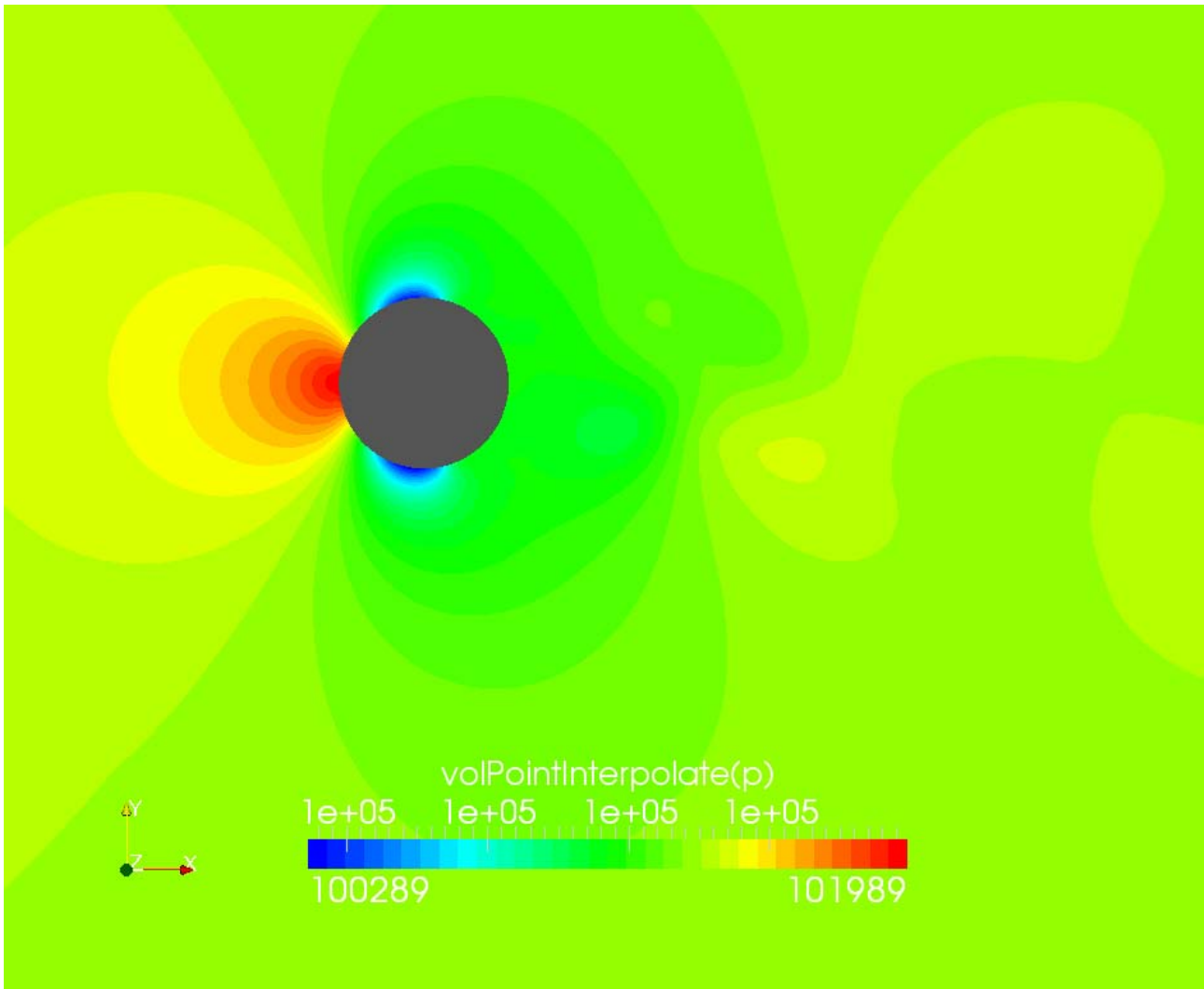


Figura 5.21 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F4 per una velocità di 25 m/s: pressione istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento <i>AC0081_F0.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

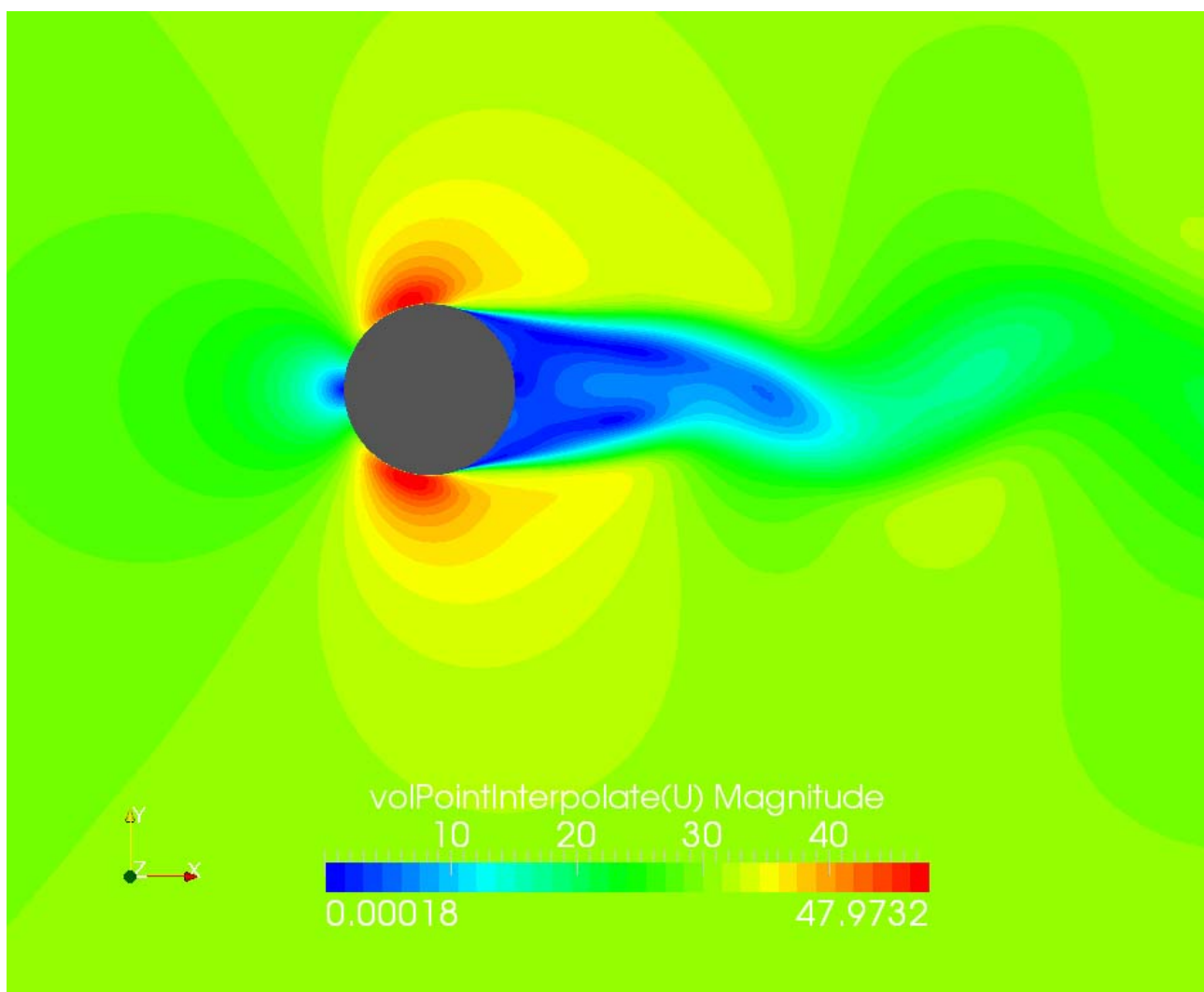


Figura 5.22 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F4 per una velocità di 30 m/s: modulo della velocità istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

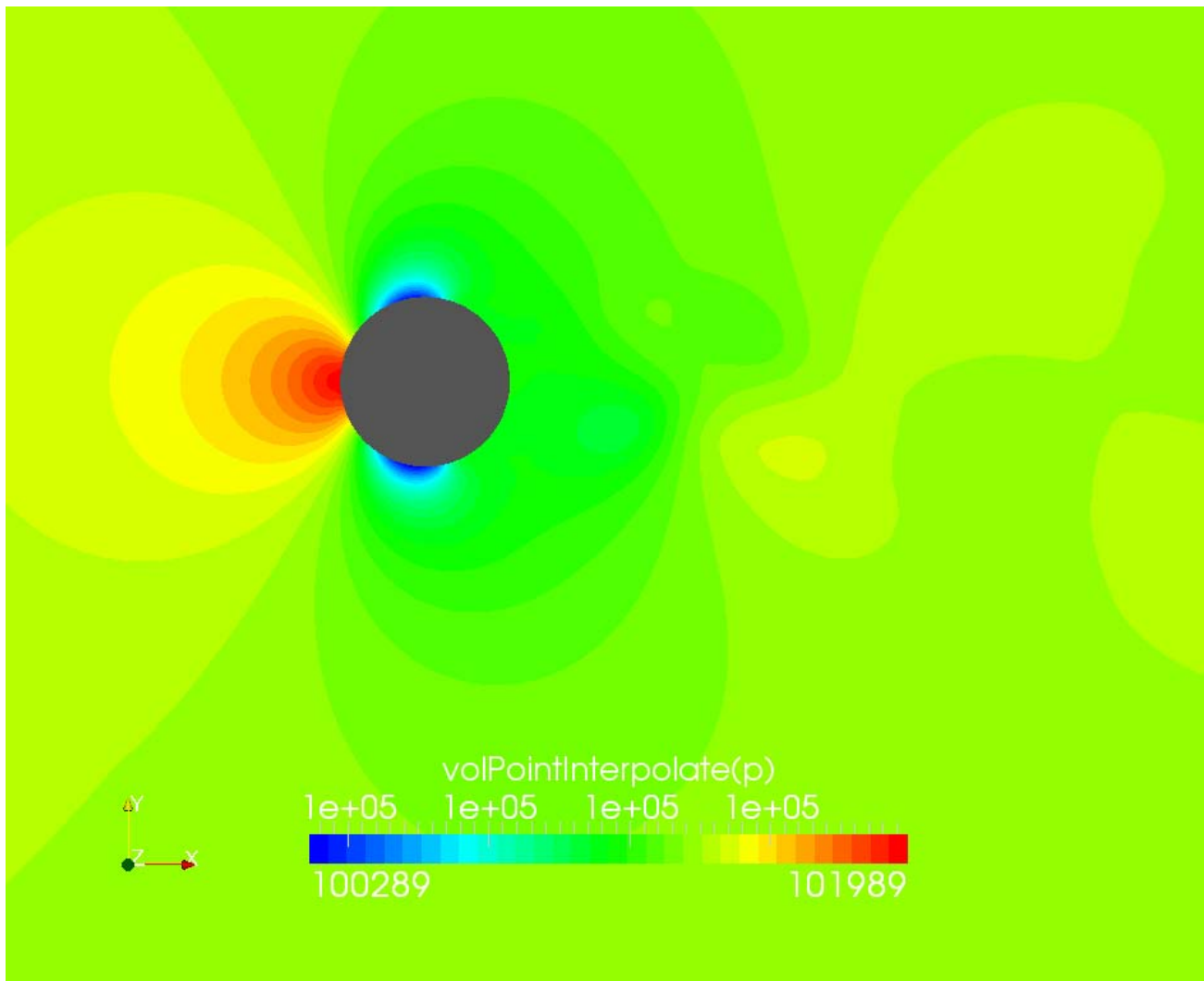


Figura 5.23 Campo fluidodinamico medio attorno al pendino F4 per una velocità di 30 m/s: pressione istantanea

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0 Data 20/06/2011

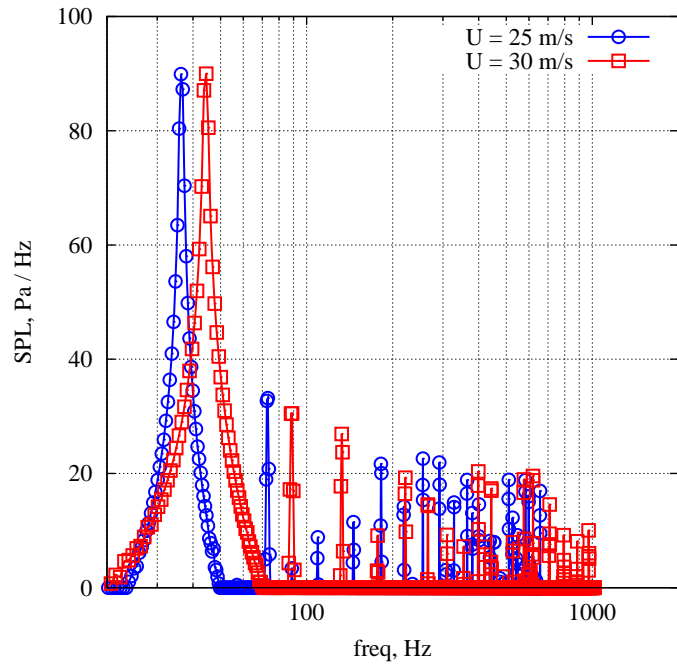


Figura 5.24 Spettro delle emissioni acustiche del pendino F4

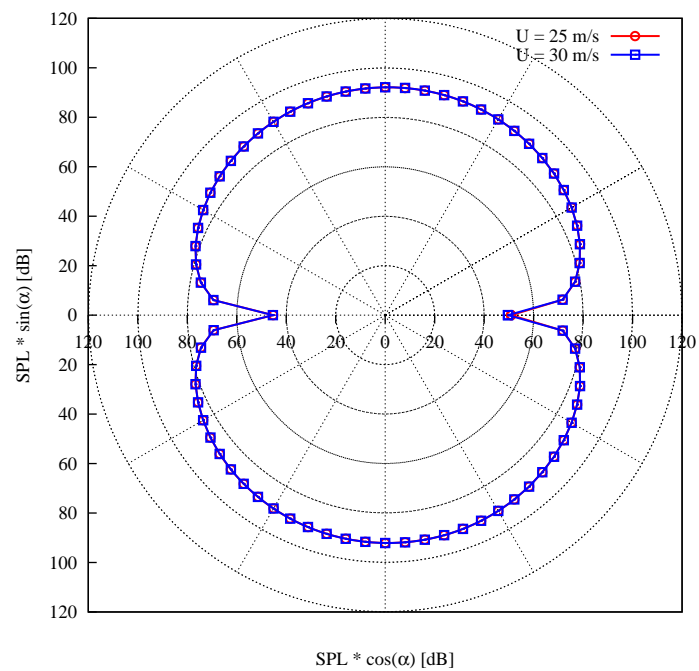


Figura 5.25 Direttività delle emissioni acustiche del pendino F4

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 5.2 Cavo supporto rete alimentazione ferroviaria

I due cavi di supporto della rete di alimentazione ferroviaria, uno per binario, sono formati ciascuno da una coppia di funi intrecciate (Figura 4.4, Figura 4.5). Le funi sono ricavate intrecciando 19 fili di rame del diametro di 2.8mm, per un diametro complessivo di 14 mm. La distanza tra le due funi è di 44mm, ovvero circa 3 volte il diametro della singola fune. Il cavo in questione percorre tutto il ponte all'altezza dell'impalcato; per questo motivo, si ipotizza che venga investito ad una velocità di 25 m/s.

La configurazione studiata è di tipo tandem, essendo la distanza tra i due corpi tale da non poterli considerare isolati. La discretizzazione della geometria consta di una griglia strutturata che vicino ai corpi diviene non strutturata per permettere di seguire agevolmente gli avvallamenti propri delle funi. In questo modo si garantisce una  $y^+$  minore dell'unità su tutto l'elemento. La superficie di integrazione di Ffowcs Williams and Hawkings è un parallelepipedo che ingloba i due elementi in esame ed è esteso in direzione *spanwise* per 35 diametri.

Il campo di moto fluidodinamico medio ed istantaneo è presentato da Figura 5.27 a Figura 5.31. Si può notare come il corpo più a valle sia in scia del primo; ne deriva un campo fluidodinamico modificato rispetto al caso dei cilindri isolati. I risultati acustici sono valutati ad una distanza pari a 8 volte il diametro delle funi, ponendo l'origine al centro dei due elementi. Lo spettro acustico a 90° rispetto alla direzione della corrente evidenzia un picco principale attorno ai 350 Hz di poco inferiore ai 100dB; per frequenze maggiori sono evidenti tutte le armoniche superiori, legate anche all'interazione reciproca tra i due cavi (Figura 5.32). In Figura 5.33 è riportata la direttività a 8 diametri, pressoché omnidirezionale.

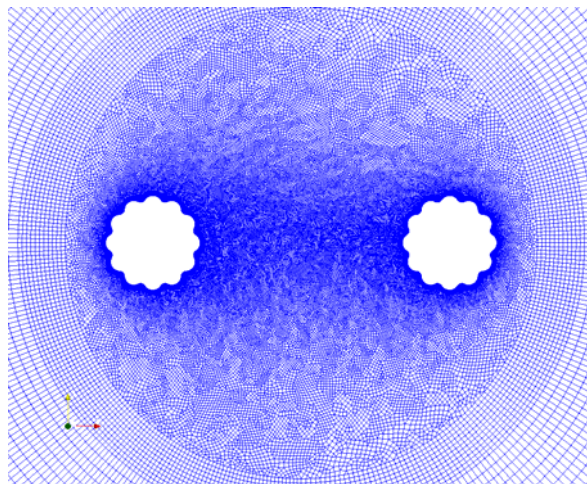


Figura 5.26 Dettaglio della griglia di calcolo dei cavi di supporto della rete di alimentazione

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

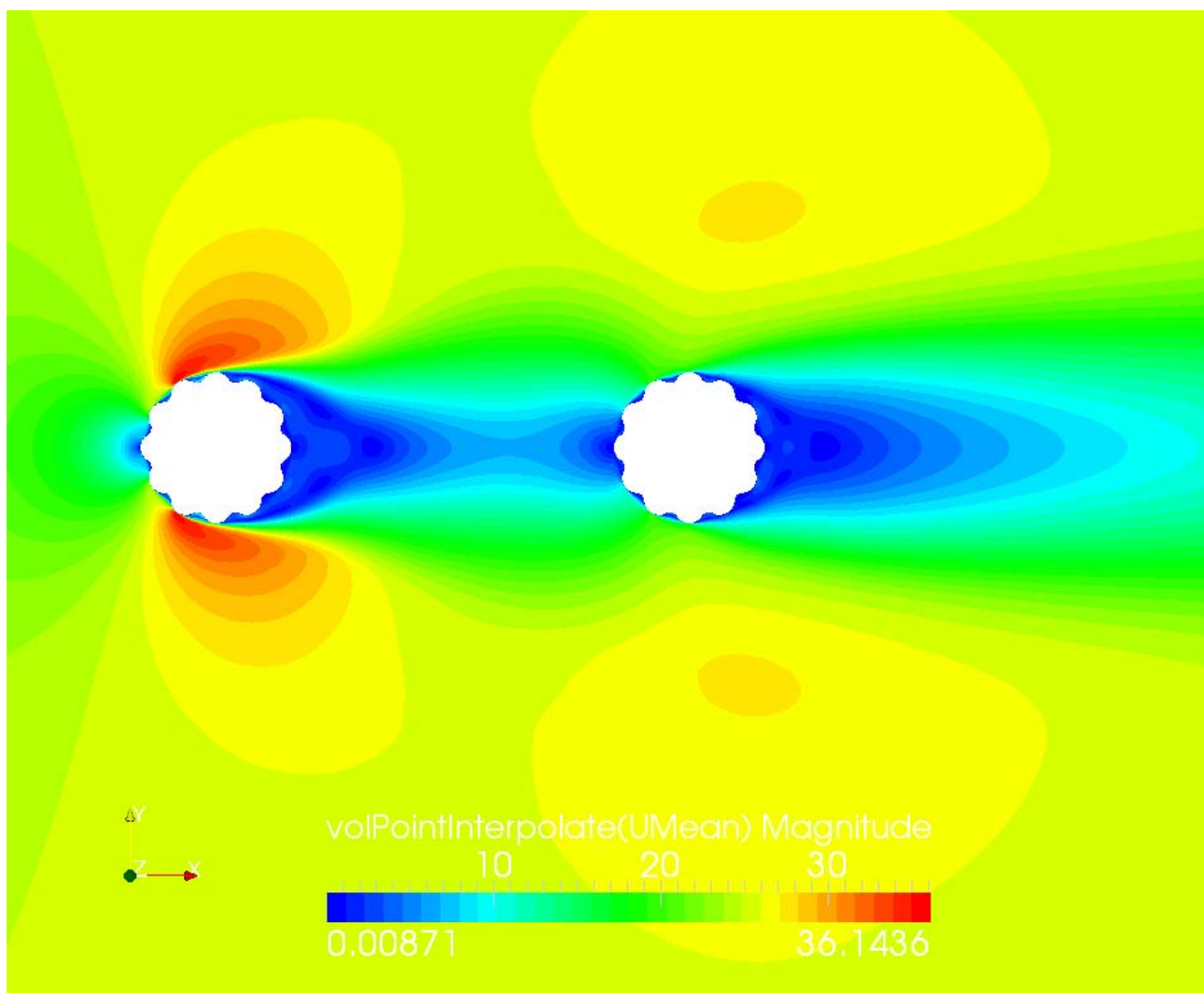


Figura 5.27 Campo fluidodinamico medio attorno ai cavi di supporto della rete di alimentazione: modulo della velocità



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

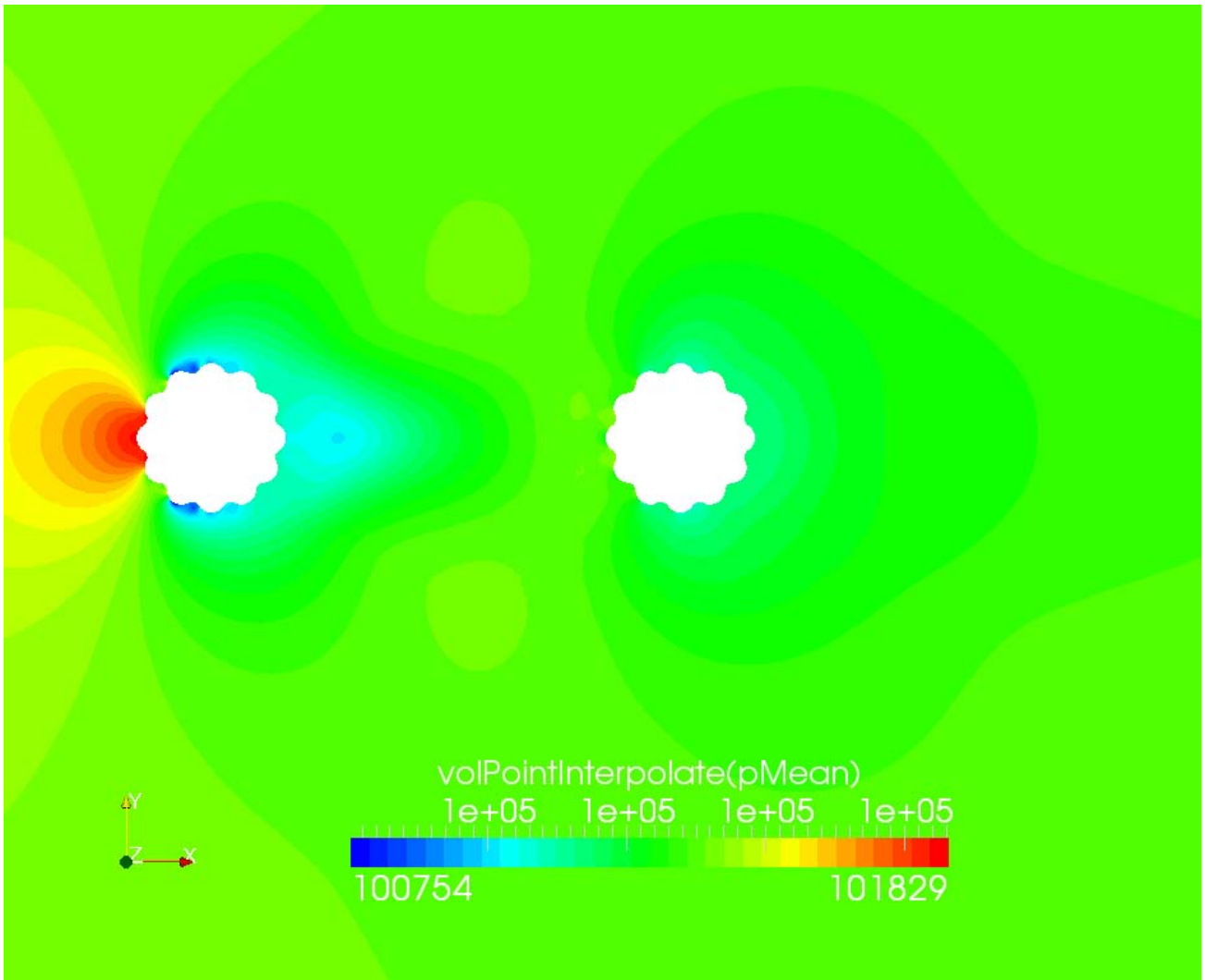


Figura 5.28 Campo fluidodinamico medio attorno ai cavi di supporto della rete di alimentazione: pressione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento <i>AC0081_F0.doc</i>	Rev <i>F0</i>	Data <i>20/06/2011</i>

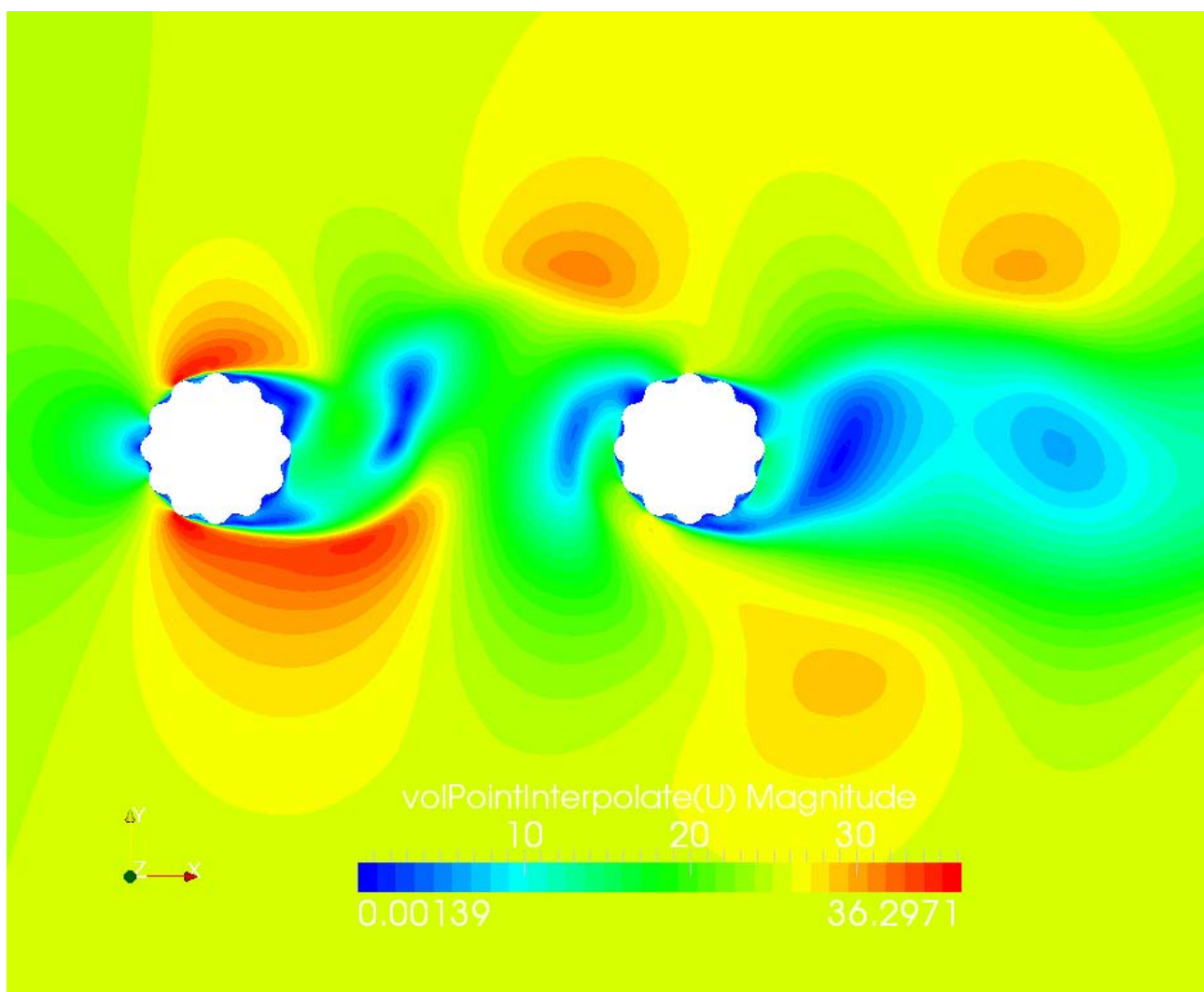


Figura 5.29 Campo fluidodinamico istantaneo attorno ai cavi di supporto della rete di alimentazione: modulo della velocità

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

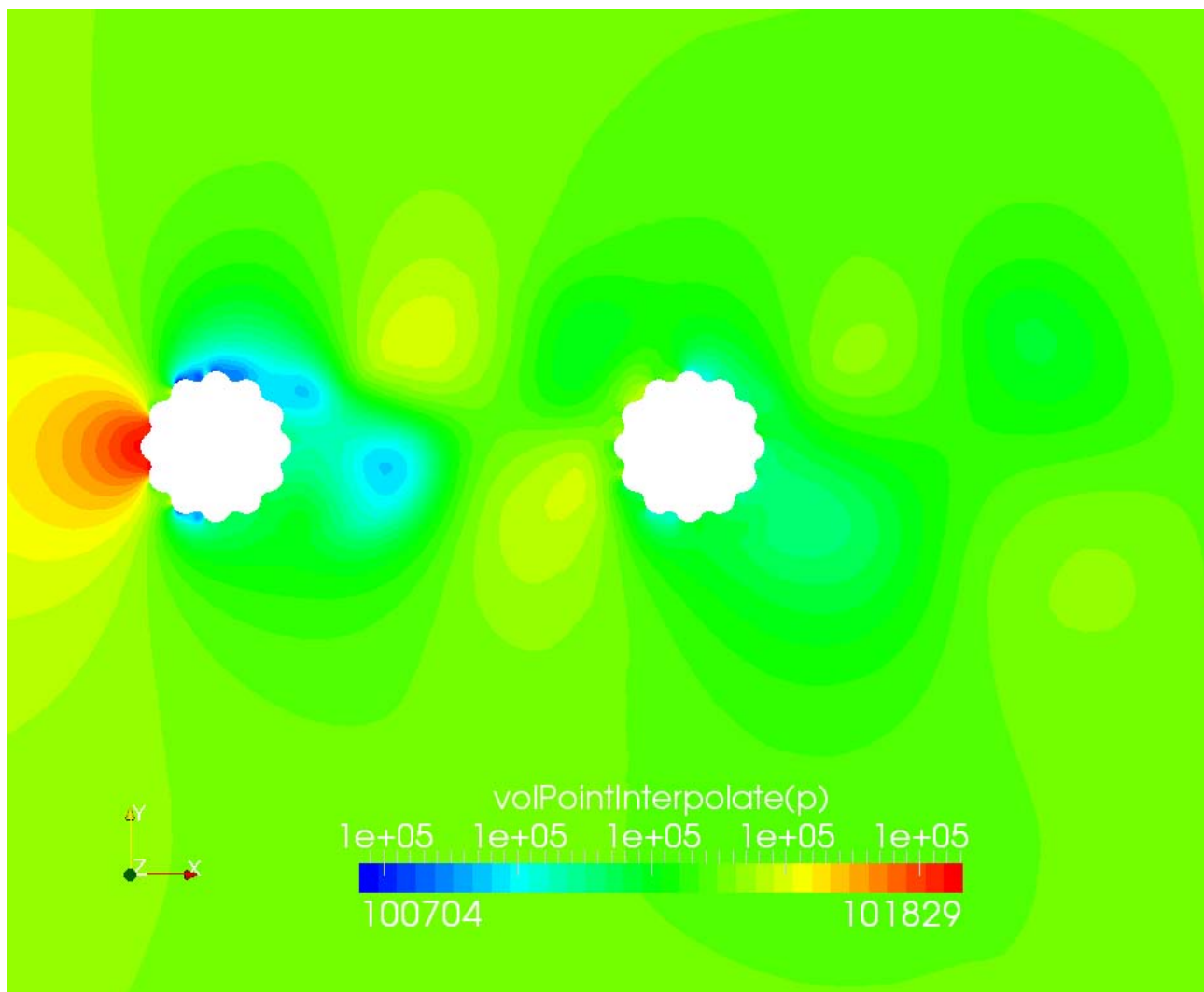
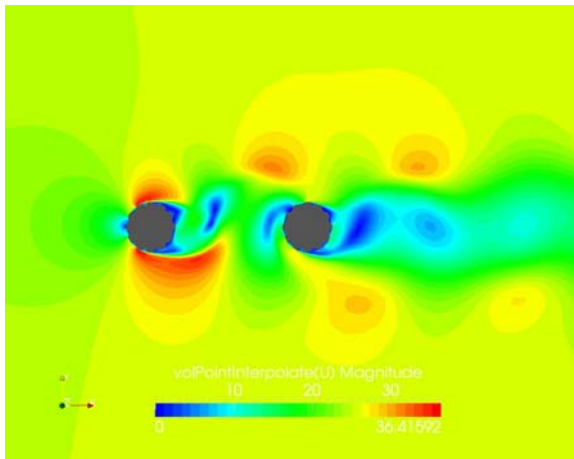
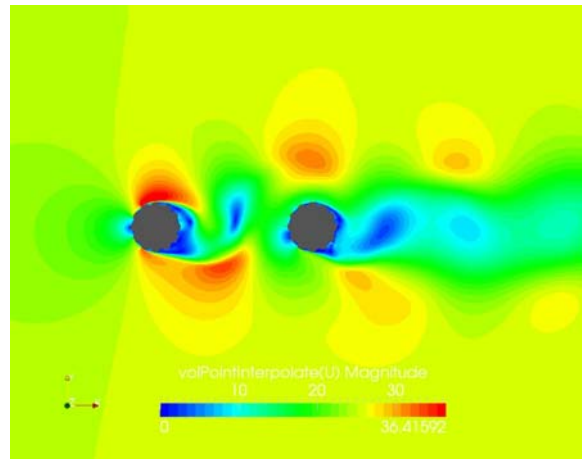


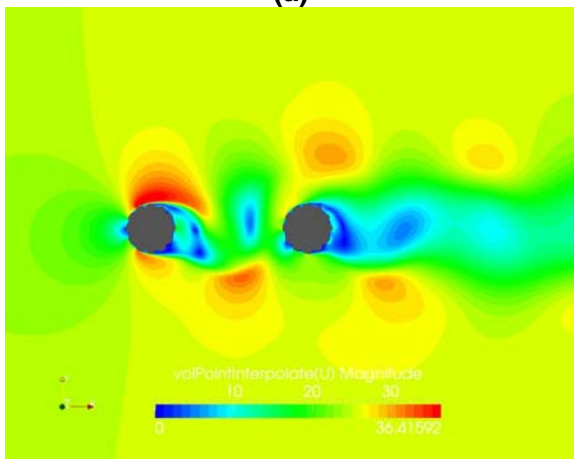
Figura 5.30 Campo fluidodinamico istantaneo attorno ai cavi di supporto della rete di alimentazione:  
 pressione



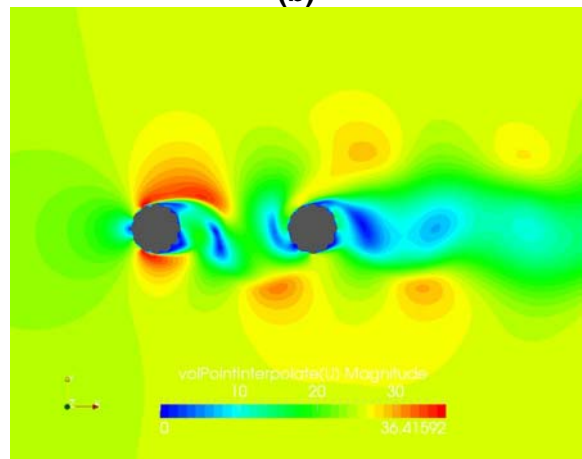
(a)



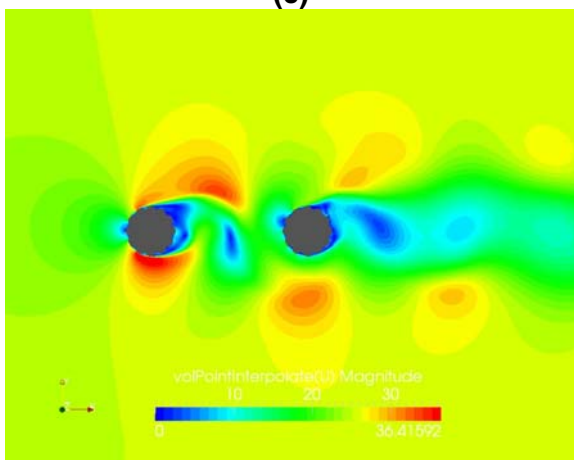
(b)



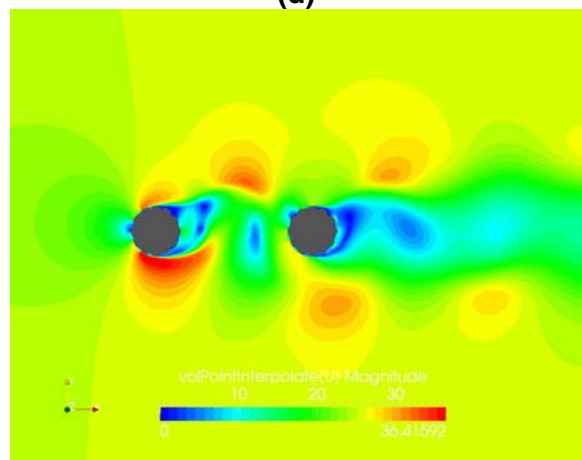
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.31 Storia temporale di un periodo di shedding del campo di velocità istantanea attorno ai cavi di supporto della rete di alimentazione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	Rev Data F0 20/06/2011

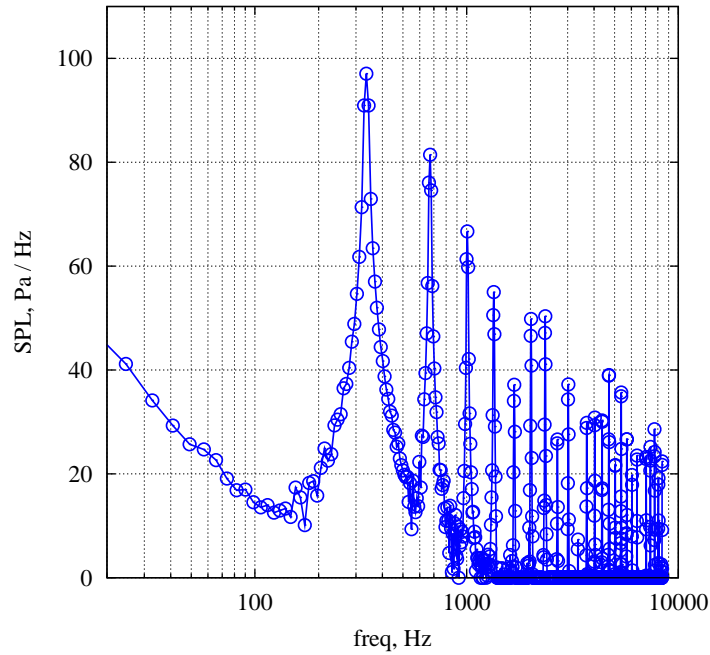


Figura 5.32 Spettro delle emissioni acustiche del cavo di supporto

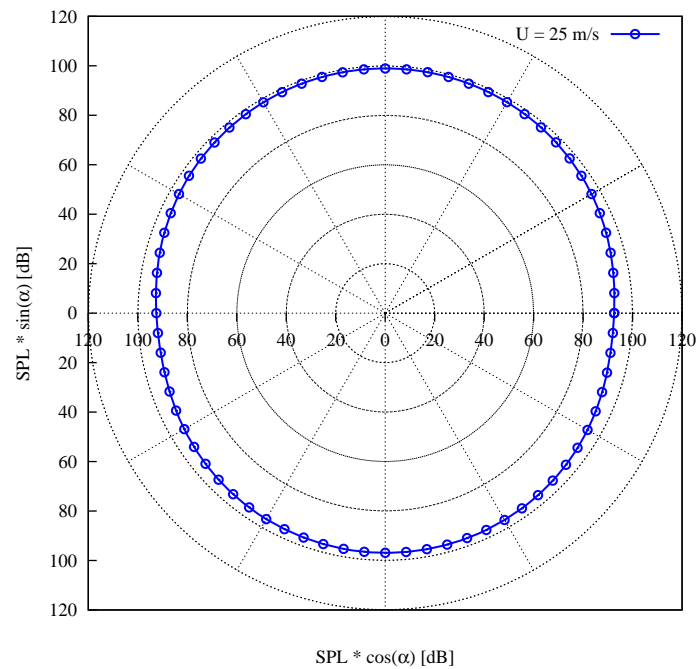


Figura 5.33 Direttività delle emissioni acustiche del cavo di supporto

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 5.3 Cavo alimentazione ferrovia

I due cavi di alimentazione della ferrovia, uno per binario, sono formati ciascuno da una coppia di funi piene sagomate (Figura 4.6 e Figura 4.7). Le funi hanno un diametro di 14mm e sono distanti 50 mm, ossia 3.5 volte il loro diametro. I cavi di alimentazione percorrono tutto il ponte all'altezza dell'impalcato, per questo motivo si ipotizza che vengano investiti ad una velocità di 25 m/s.

Analogamente a quanto detto nel paragrafo precedente, anche in questo caso trattasi di configurazione tandem. Pertanto, i due corpi dovranno essere studiati in un'unica simulazione aeroacustica.

Come visibile in Figura 5.34 la griglia di calcolo strutturata diviene non strutturata vicino ai cavi, consentendo una discretizzazione accurata della sagomatura. Quest'ultima influenza il campo di moto fluidodinamico forzando il distacco della vena fluida in corrispondenza dello spigolo (vedi campi di moto riportati da Figura 5.35 a Figura 5.39). I risultati acustici sono valutati ad una distanza di 8 diametri dal centro dei due elementi. Lo spettro è valutato a 90° rispetto alla direzione della corrente. I risultati mostrano un picco principale attorno ai 350Hz di poco superiore ai 90dB.

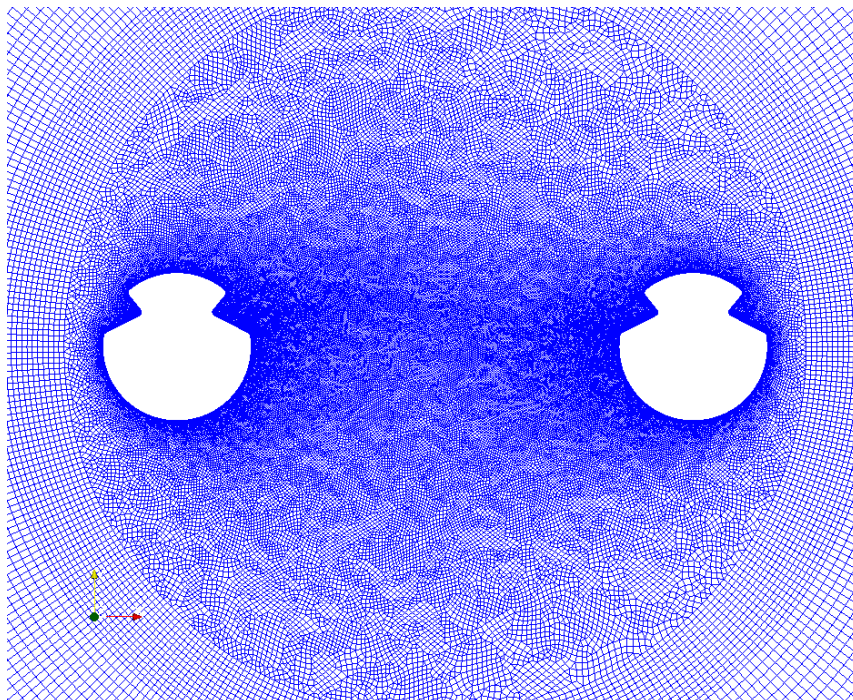


Figura 5.34 Dettaglio della griglia di calcolo dei cavi di alimentazione della ferrovia

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011	

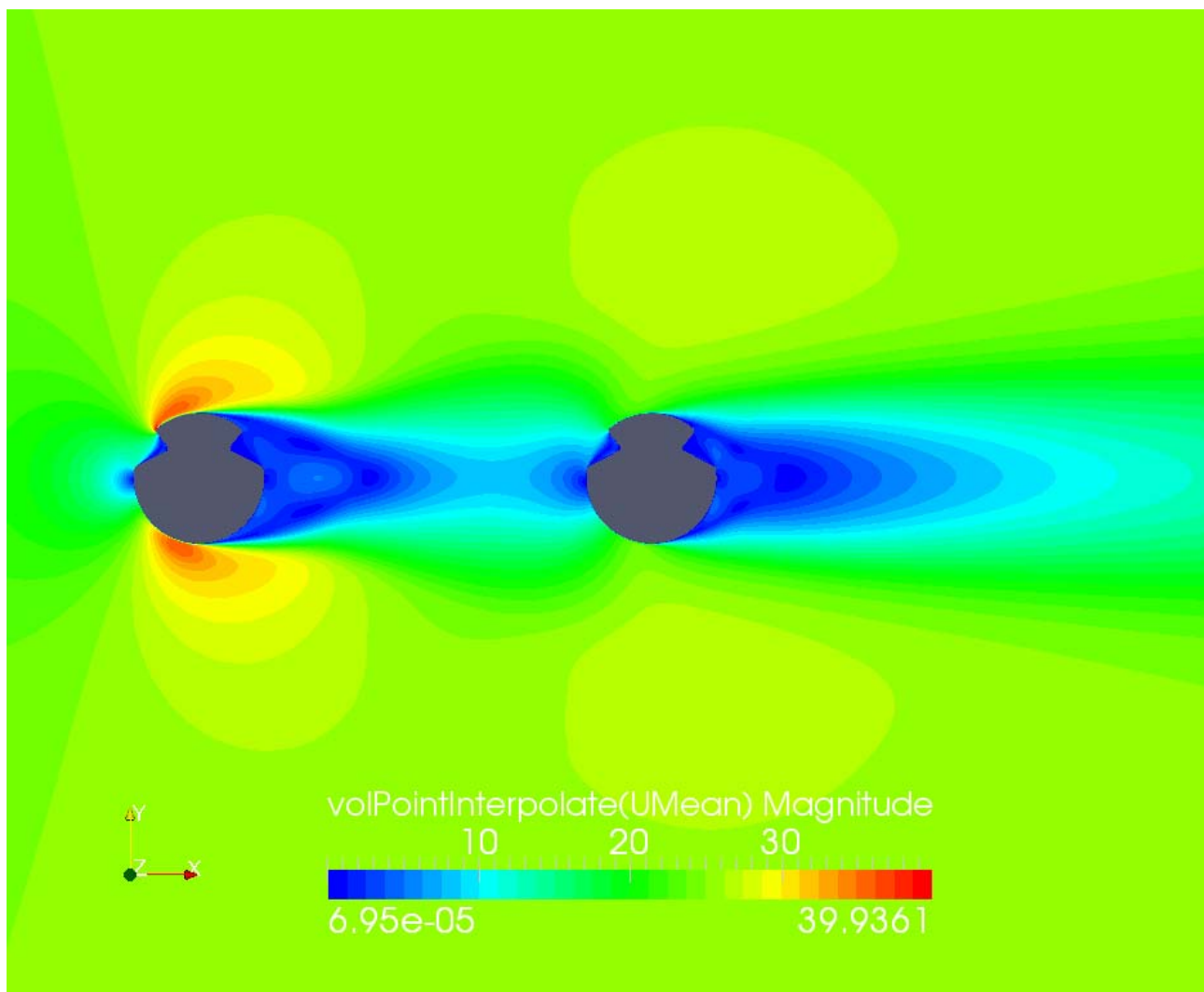


Figura 5.35 Campo fluidodinamico medio attorno ai cavi di alimentazione della ferrovia: modulo della velocità

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

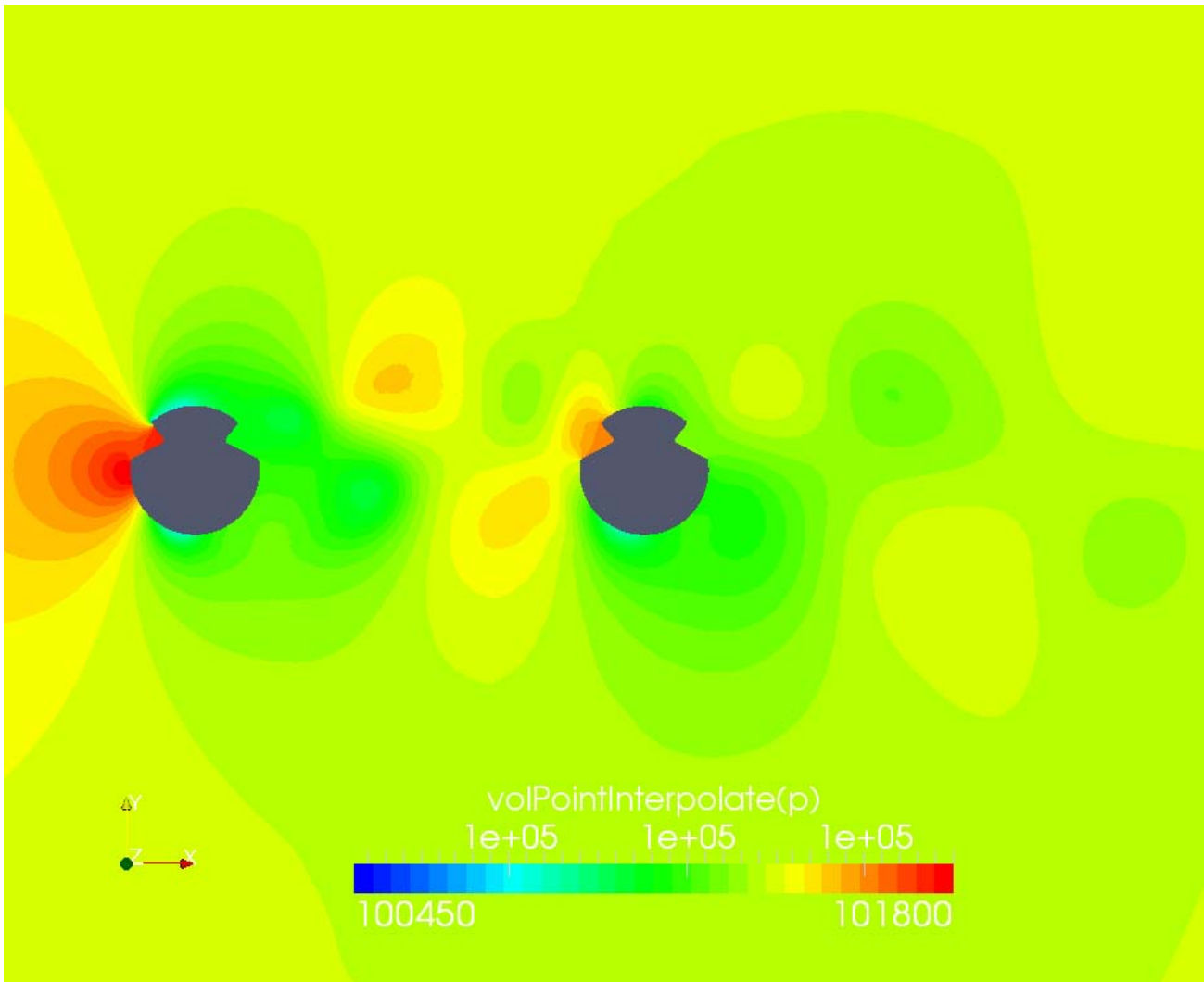


Figura 5.36 Campo fluidodinamico medio attorno ai cavi di alimentazione della ferrovia: pressione



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

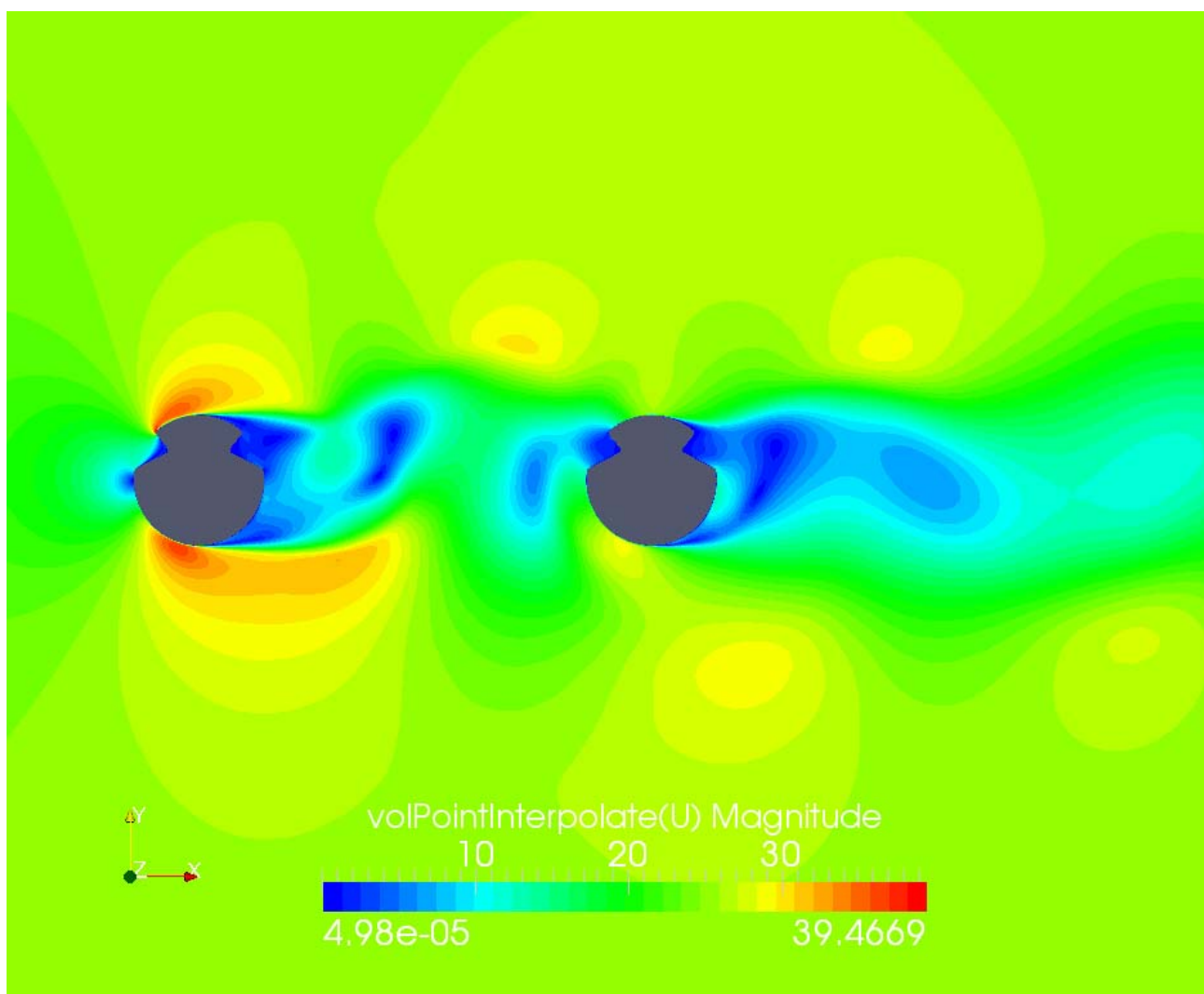


Figura 5.37 Campo fluidodinamico istantaneo attorno ai cavi di alimentazione della ferrovia: modulo della velocità

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

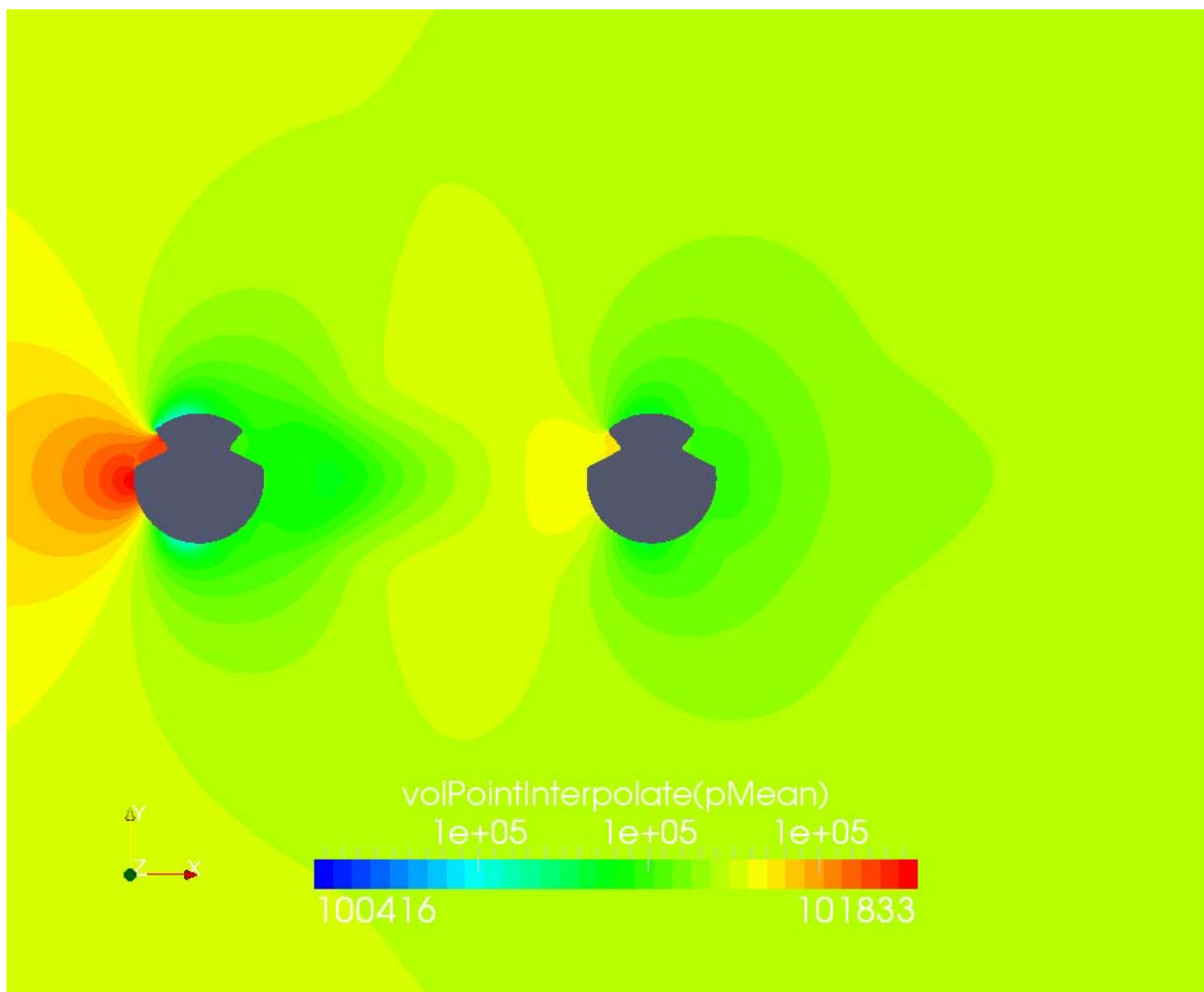
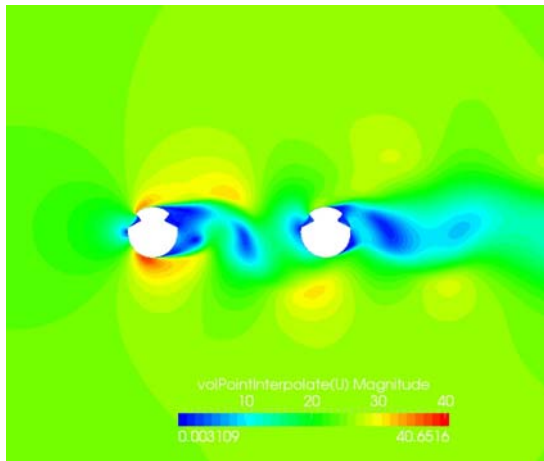
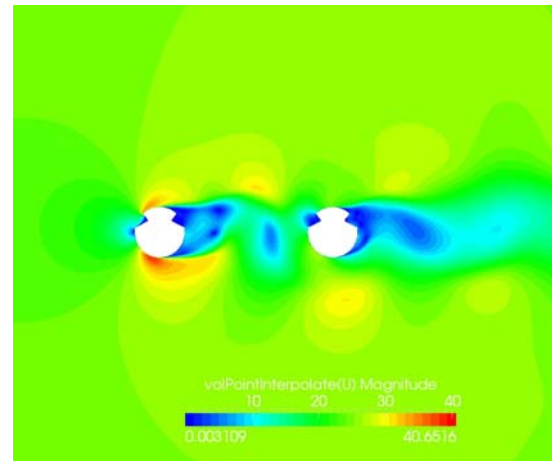


Figura 5.38 Campo fluidodinamico istantaneo attorno ai cavi di alimentazione della ferrovia: pressione

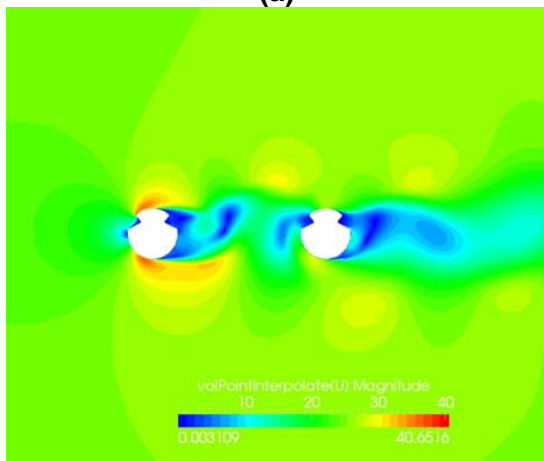
		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



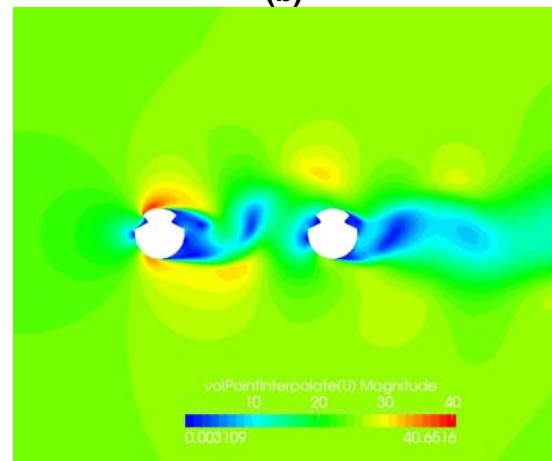
(a)



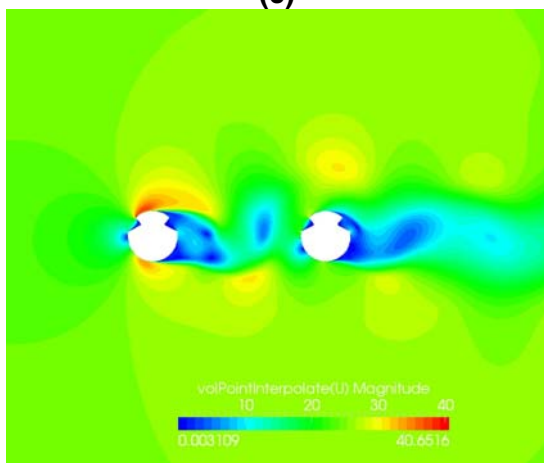
(b)



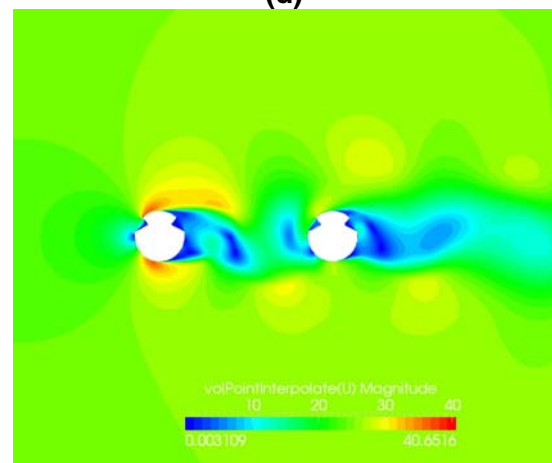
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.39 Storia temporale di un periodo di shedding del campo di velocità istantanea attorno ai cavi di alimentazione della ferrovia

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

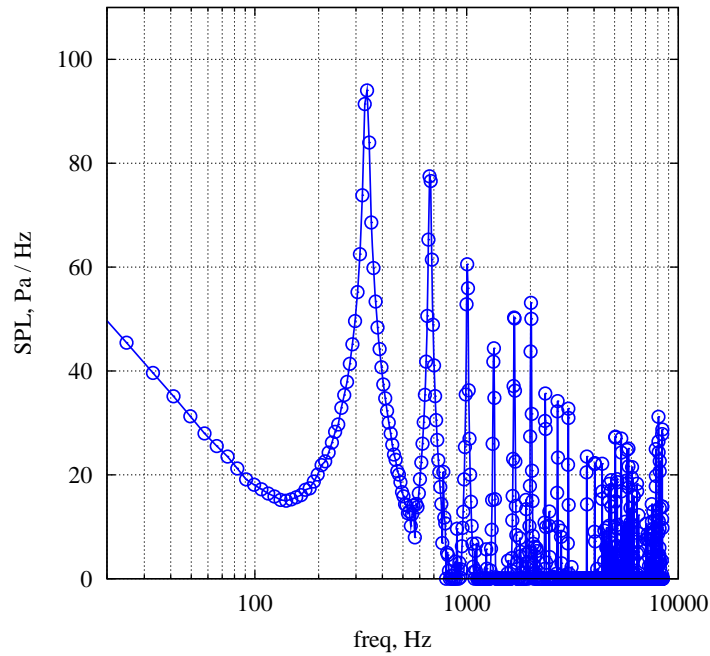


Figura 5.40 Spettro delle emissioni acustiche dei cavi di alimentazione

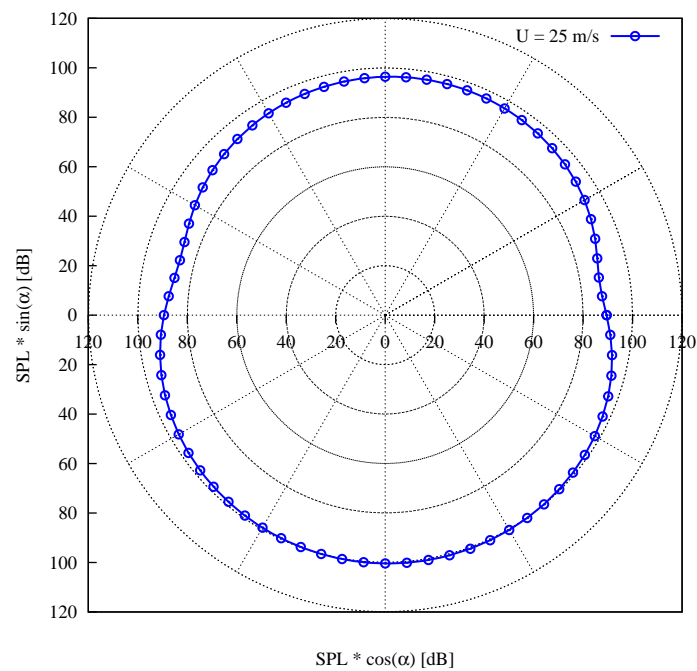


Figura 5.41 Direttività delle emissioni acustiche dei cavi di alimentazione

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 5.4 Cavo terra ferroviaria

Nella sede ferroviaria sono presenti quattro cavi di terra che percorrono tutta la lunghezza del ponte (Figura 4.8). I cavi sono formati da fili di rame ed alluminio intrecciati per un diametro complessivo di 15.85mm (Figura 4.9). La geometria è discretizzata con una griglia di calcolo strutturata che vicino a parete diventa non strutturata permettendo, così, di discretizzare gli avvallamenti delle funi (Figura 5.42). In questo modo si garantisce una  $y^+$  minore di uno su tutto l'elemento considerato. Di seguito è riportato il campo di moto medio ed istantaneo (da Figura 5.43 a Figura 5.47). Si può notare l'effetto delle funi intrecciate rispetto al caso dei pendini lisci ed anche il differente campo di moto rispetto alla configurazione tandem di una geometria analoga (vedi le figure relative al cavo di supporto rete alimentazione ferroviaria, da Figura 5.27 a Figura 5.31). I risultati acustici si riferiscono ad una distanza di 2 diametri (Figura 5.48 e Figura 5.49). Analizzando lo spettro, valutato a  $90^\circ$  rispetto alla direzione della corrente, si nota come, differentemente dalla configurazione tandem (Figura 5.32), vi siano solo le armoniche legate all'elemento isolato.

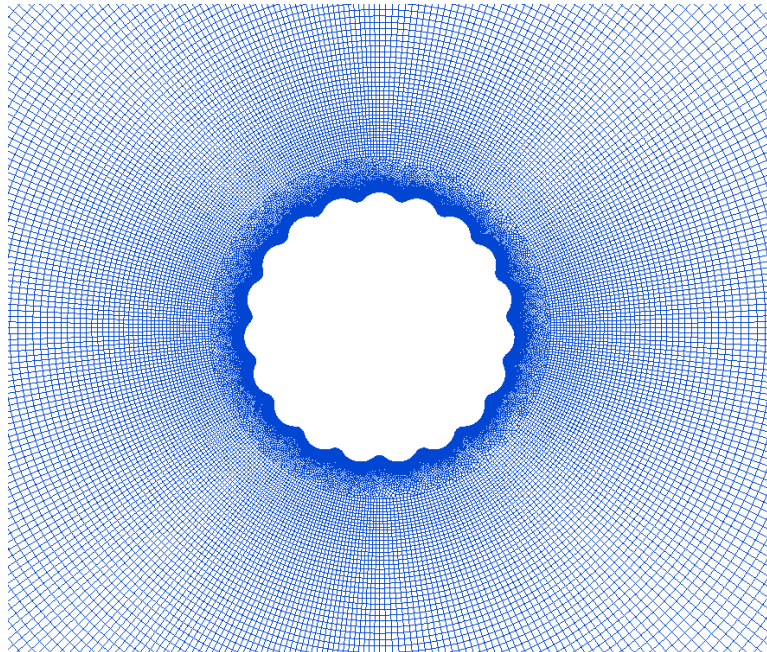


Figura 5.42 Dettaglio della mesh del cavo di terra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

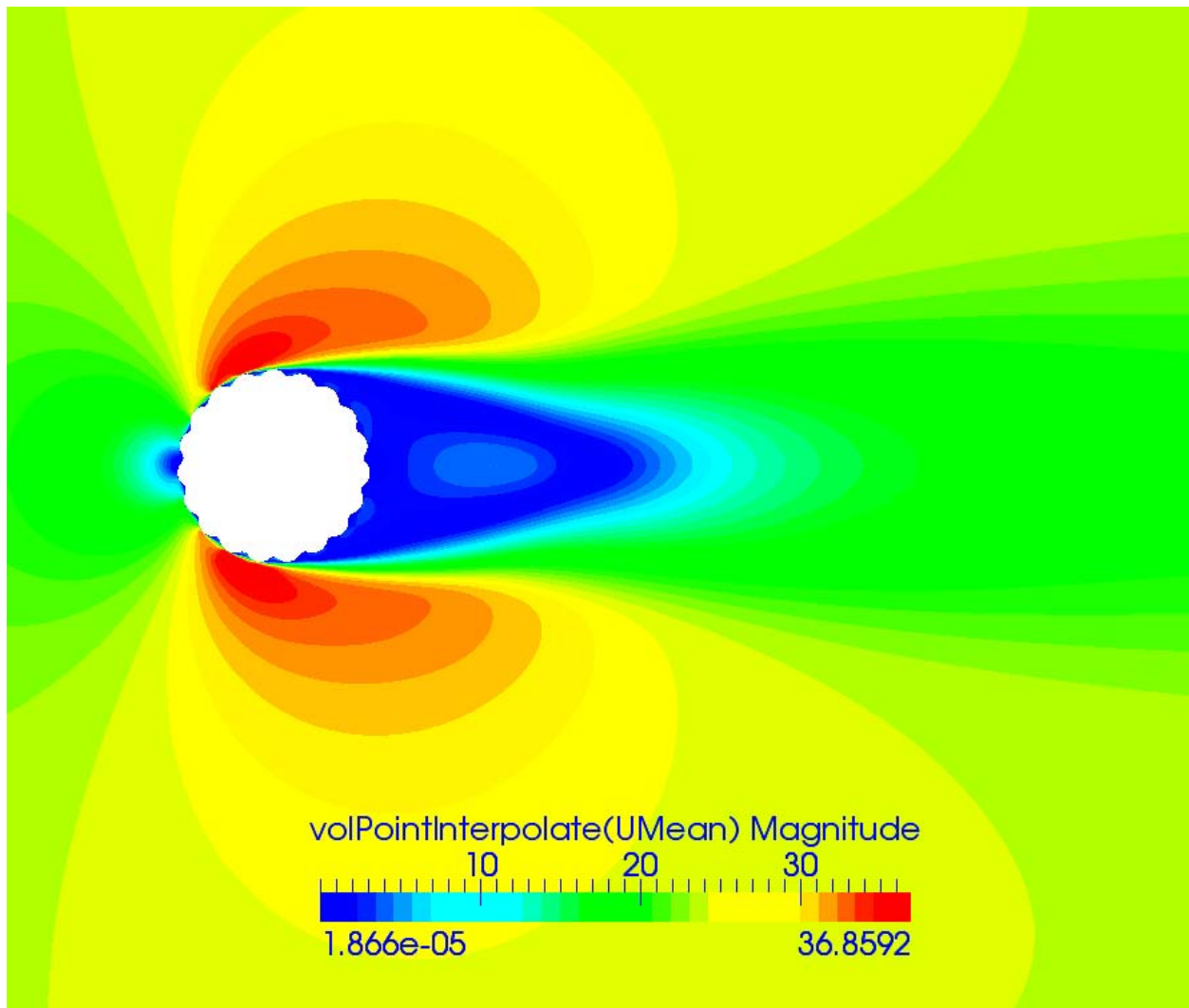


Figura 5.43 Campo fluidodinamico medio attorno al cavo di terra: modulo della velocità

 <b>Stretto di Messina</b>	 EuroLink	<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

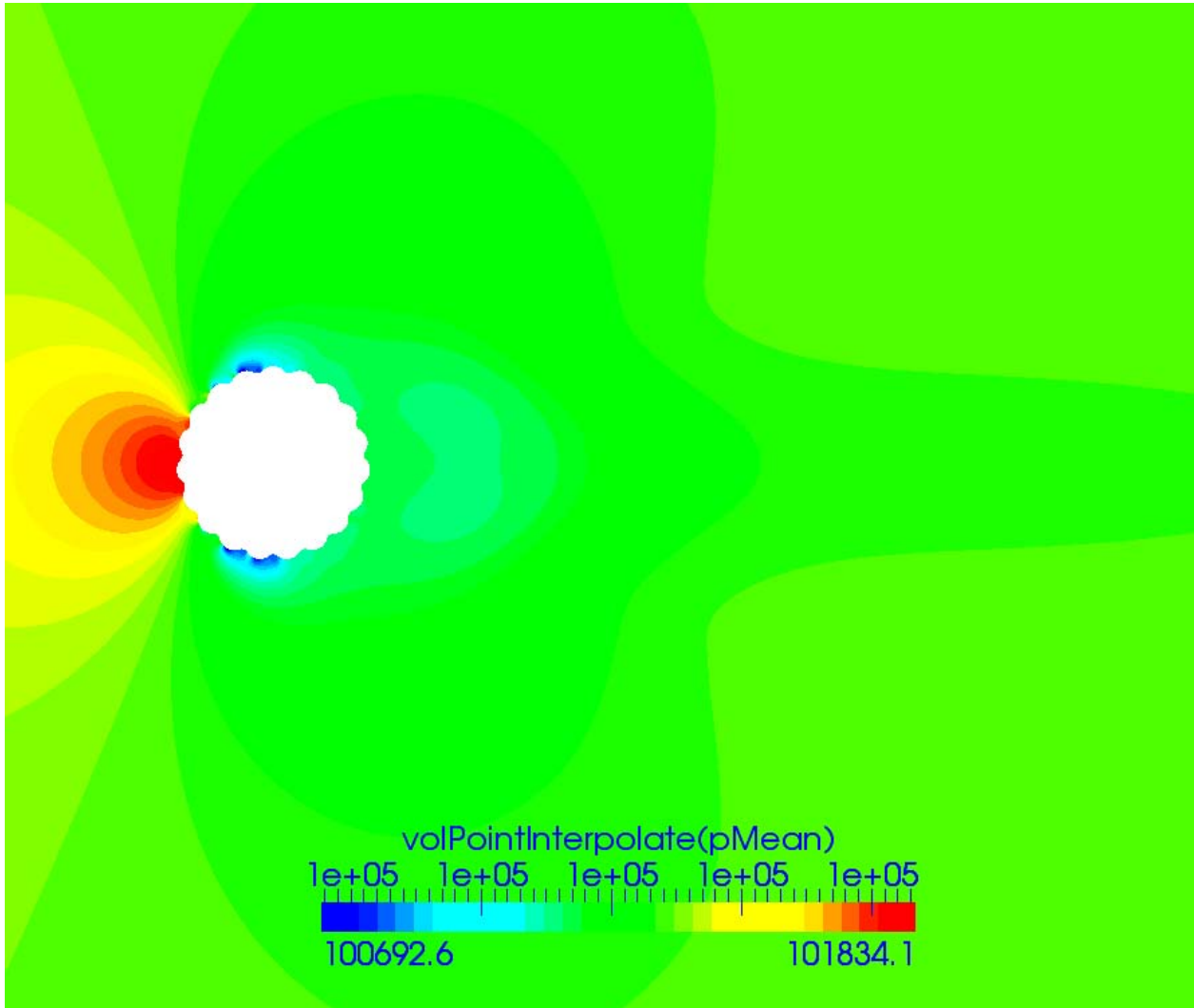


Figura 5.44 Campo fluidodinamico medio attorno al cavo di terra: pressione

 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

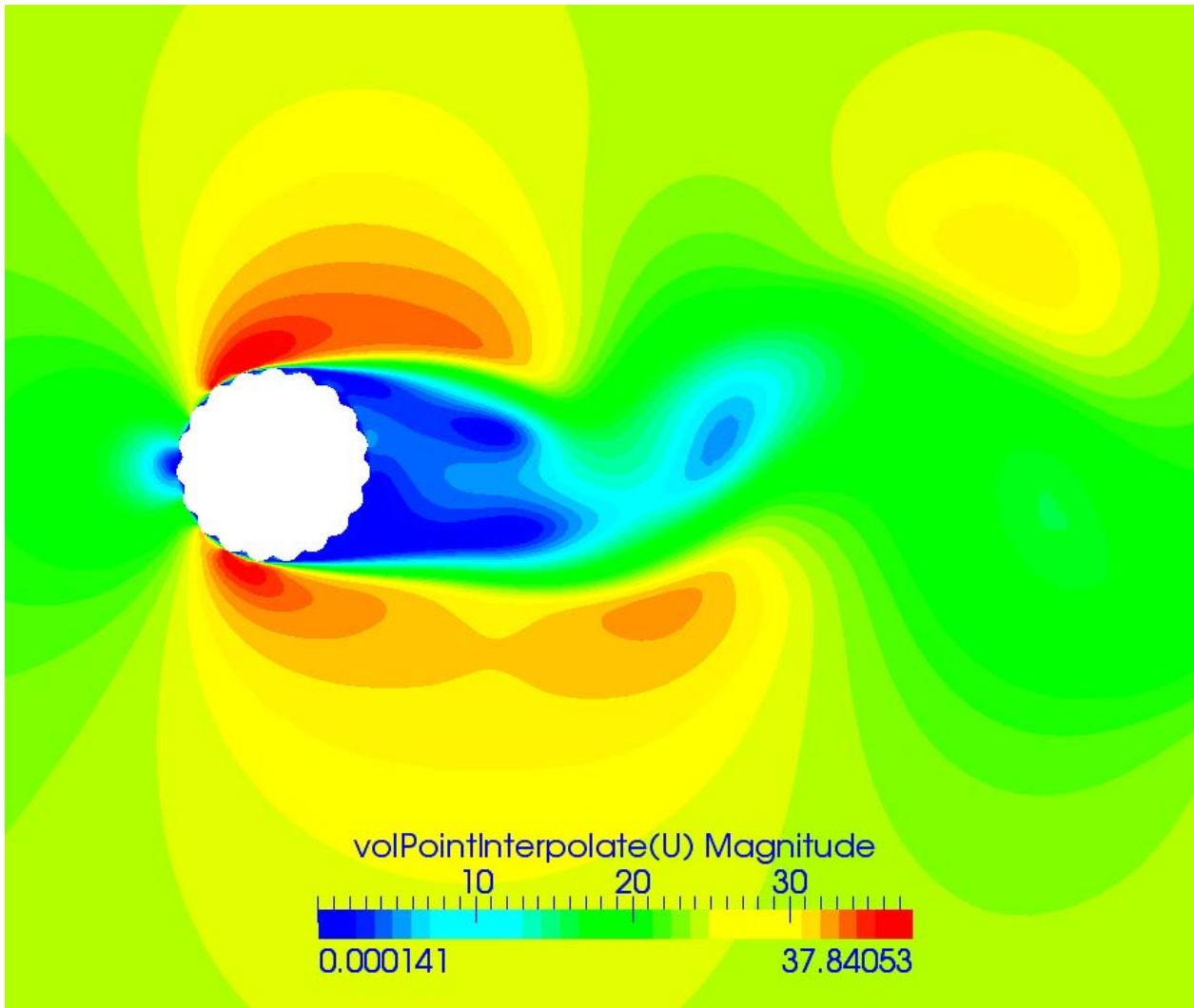


Figura 5.45 Campo fluidodinamico istantaneo attorno al cavo di terra: modulo della velocità



 <b>Stretto di Messina</b>		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

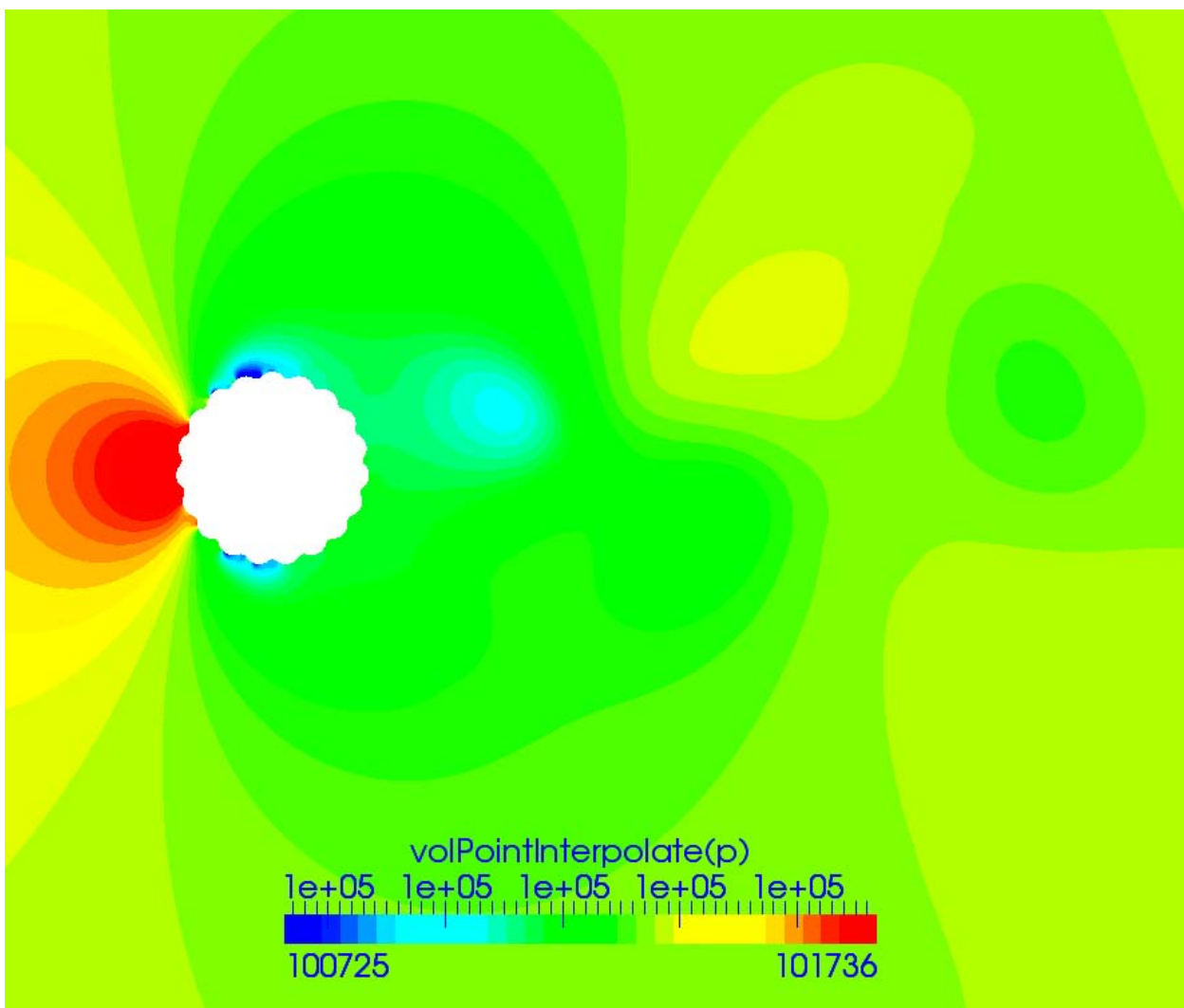
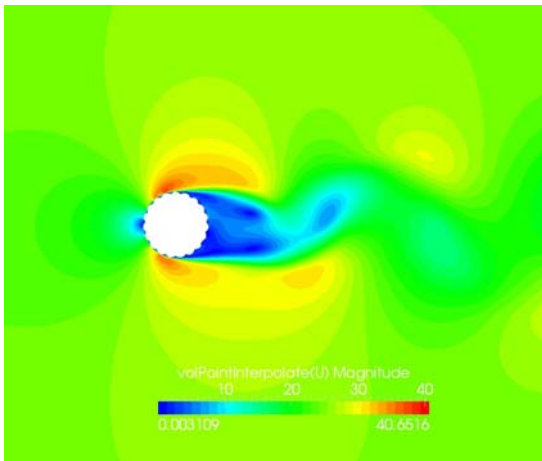
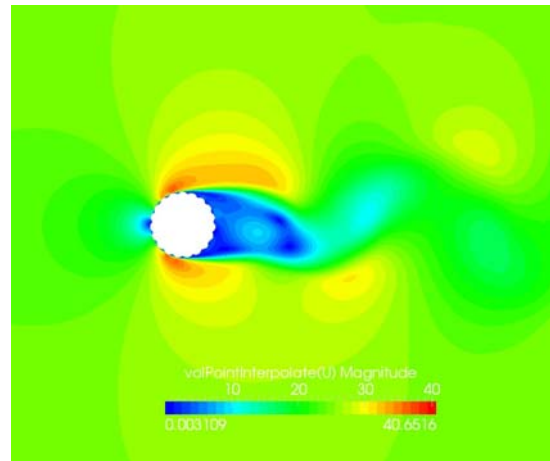


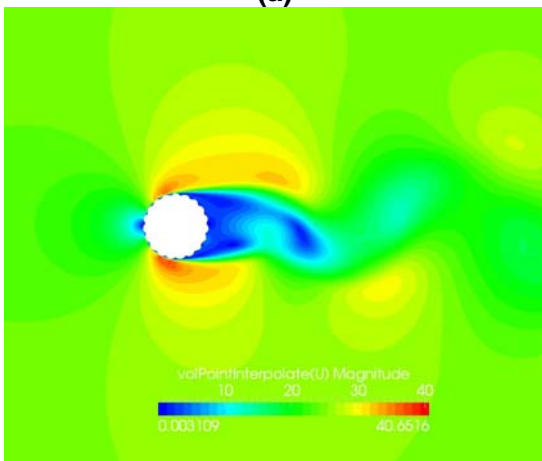
Figura 5.46 Campo fluidodinamico istantaneo attorno al cavo di terra: pressione



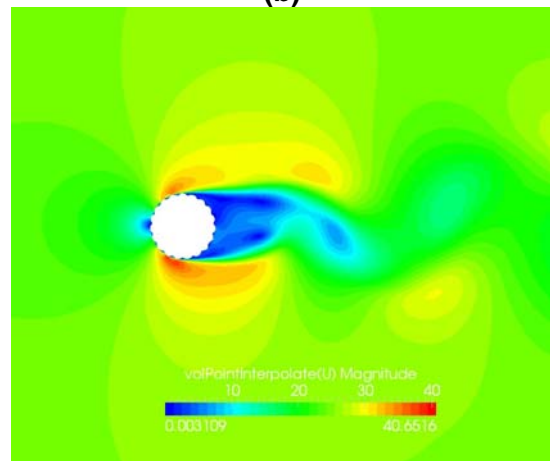
(a)



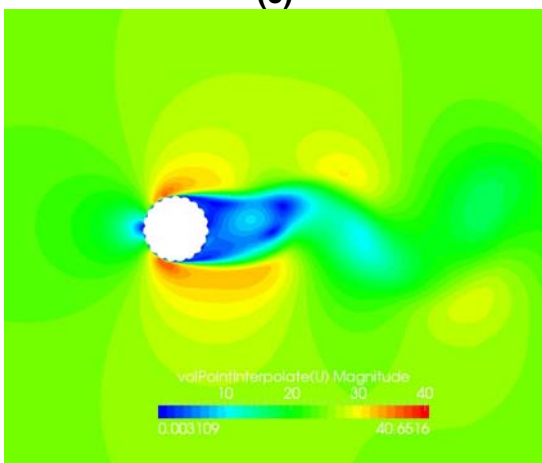
(b)



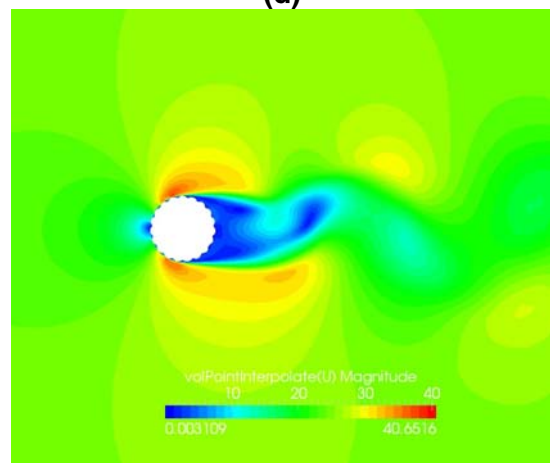
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.47 Storia temporale di un periodo di shedding del campo di velocità istantanea attorno al cavo di terra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

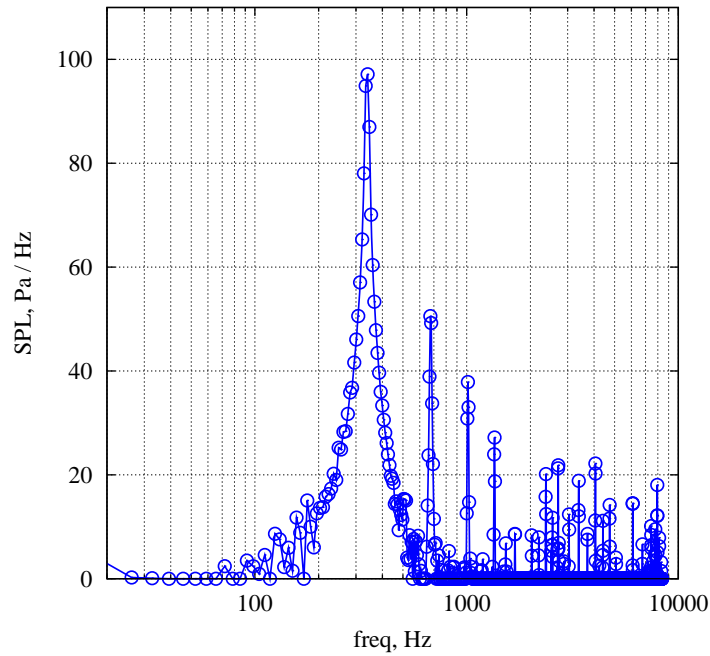


Figura 5.48 Spettro delle emissioni acustiche del cavo di terra

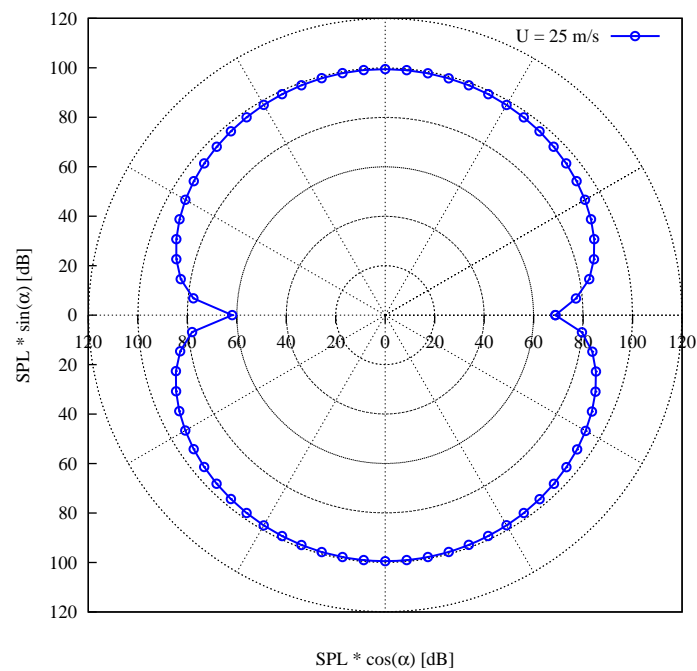


Figura 5.49 Direttività delle emissioni acustiche del cavo di terra

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%; text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 5.5 Conclusioni

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva contenente le frequenze principali e gli SPL degli elementi strutturali analizzati. I dati si riferiscono alla direzione di massima emissione. Si riportano solo le armoniche la cui emissione superi i 60dB.

Elemento	Velocità vento [m/s]	Frequenza [Hz]	SPL [dB]
Pendino F1	25	62.4	85.9
	30	77.0	88.0
Pendino F2	25	58.6	91.7
	30	71.1	88.7
Pendino F3	25	45.9	87.8
	30	56.0	91.5
Pendino F4	25	36.2	90.0
	30	45.0	90.5
Cavo di supporto rete ferroviaria (tandem)	25	335.0 (I armonica)	97.2
		671.0 (II armonica)	81.6
		1006.7 (III armonica)	66.8
Cavo di alimentazione (tandem)	25	336.1 (I armonica)	94.1
		673.5 (II armonica)	77.6
		1005.3 (III armonica)	60.7
Cavo di terra	25	340.6	96.8

Tabella 5.2 Emissioni rilevanti degli elementi strutturali analizzati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 6 Propagazione acustica mediante ray-tracing

Il lavoro svolto nei capitoli precedenti fornisce il supporto per la valutazione delle emissioni sonore complessive del ponte nelle condizioni di vento indagate. Di fatto in questa fase si sposta l'attenzione dalla scala locale che valuta il comportamento aeroacustico dei singoli elementi strutturali alla scala globale che valuta l'insieme delle emissioni sonore del ponte e ne calcola la funzione di trasferimento sui ricettori distribuiti sul territorio.

### 6.1 Modello di calcolo

Per i calcoli di area vasta è necessario adottare modelli di simulazione di tipo differente da quanto utilizzato nelle fasi precedenti, in quanto le scale geometriche indagate necessitano di considerare nelle simulazioni solo gli elementi di primaria importanza. I modelli di calcolo di tipo ray-tracing costituiscono da questo punto di vista un ottimo compromesso, che consente di mantenere un livello di dettaglio sufficientemente elevato e di considerare nel contempo grandi geometrie e numeri di ricettori.

Il software previsionale Raynoise 3.1 prodotto dalla società belga LMS costituisce uno standard affermato da tempo nel campo del ray-tracing acustico ed è stato utilizzato in tutta la fase di calcolo dei livelli di immissione sonora del ponte.

#### 6.1.1 Modello previsionale RAYNOISE

Il RAYNOISE è un modello di simulazione della propagazione del suono di tipo ray tracing. In particolare consente di utilizzare due algoritmi di simulazione denominati *metodo dei raggi conici* e *metodo dei raggi triangolari*. Il metodo dei raggi conici utilizza un modello numerico derivato dall'acustica geometrica e considera le onde sonore come raggi conici emessi in gran numero dalla sorgente sonora. Ciascun raggio segue le stesse leggi di riflessione dell'ottica geometrica: superfici concave concentrano i raggi mentre superfici convesse li disperdono. Conseguentemente fenomeni come l'interferenza, la diffrazione, la rifrazione, la diffusione, non possono essere presi in considerazione intrinsecamente. Il metodo dei raggi conici rappresenta una combinazione e una evoluzione di due algoritmi dell'acustica geometrica utilizzati con successo da alcuni decenni: il metodo delle sorgenti immagine e il metodo ray tracing.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <tr> <td><i>Rev</i></td> <td><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

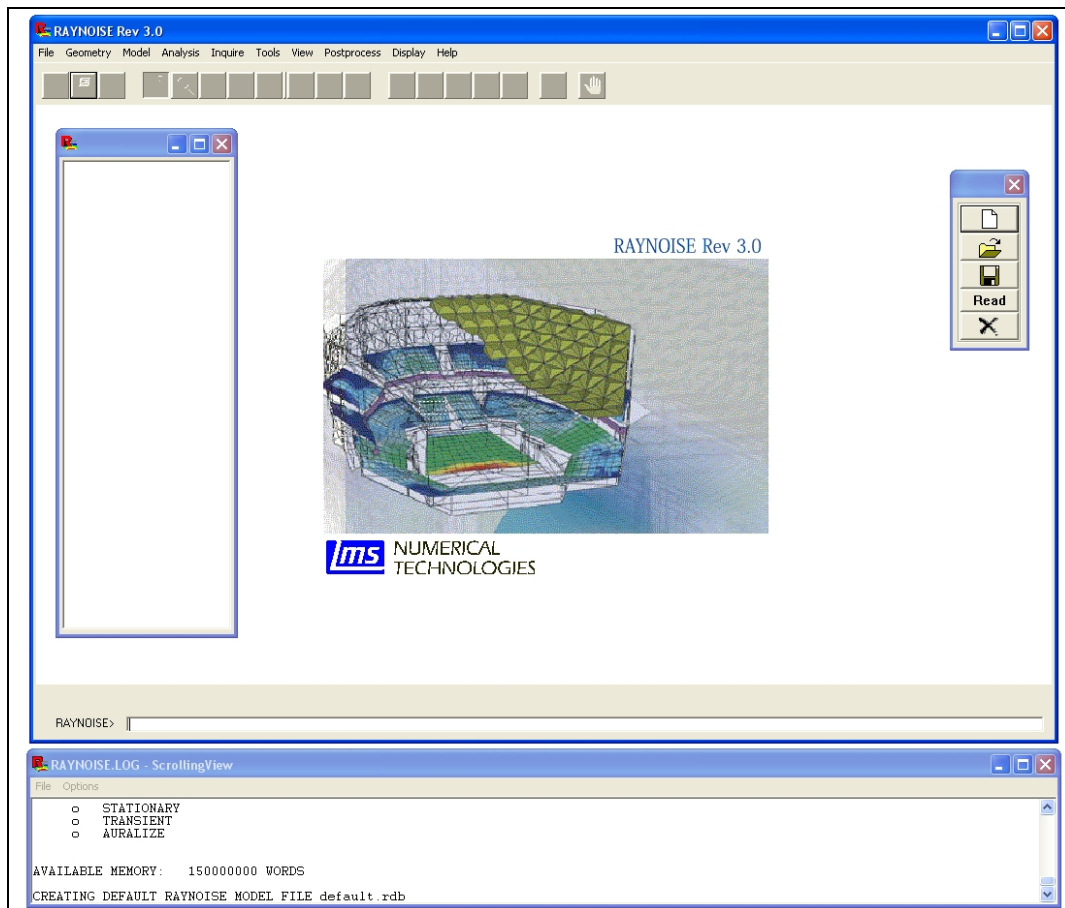


Figura 6.1 Modello di simulazione geometrica RAYNOISE

Il metodo delle sorgenti immagine è un metodo deterministico che utilizza sorgenti virtuali per ricostruire la traiettoria del raggio sonoro tra sorgente e ricevitore: si applica rigorosamente il concetto di riflessione speculare del suono sulle pareti, per cui l'onda riflessa può essere considerata come proveniente da una sorgente virtuale, costituita dalla immagine della sorgente reale riflessa dalla parete. In questo modo si costruiscono le sorgenti immagine del 1° ordine.

È poi possibile costruire sorgenti di ordine successivo, ripetendo il procedimento di specularizzazione rispetto alle altre pareti riflettenti. Naturalmente ciascuna sorgente immagine risulta sincronizzata rispetto alla sorgente reale. Questo processo può essere ripetuto fino ad un determinato ordine di riflessione, funzione delle risorse di calcolo e della precisione desiderata per la simulazione.

Il limite principale di questo modello deriva dai lunghi tempi di calcolo che occorrono nella risoluzione di problemi complessi, caratterizzati da un elevato numero di superfici riflettenti e da

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

bassi coefficienti di assorbimento delle pareti, con conseguente necessità di incrementare il numero di riflessioni di cui tenere conto.

Il metodo ray tracing è invece una tecnica di tipo statistico che consiste nella discretizzazione dell'energia emessa dalla sorgente in raggi sonori lanciati in tutte le direzioni. I raggi si propagano rettilinei e rimbalzano entro l'ambiente seguendo le leggi della riflessione speculare. Il livello energetico di ciascun raggio decresce progressivamente in funzione dell'assorbimento delle pareti su cui i raggi collidono e dell'assorbimento dell'aria.

I ricevitori nell'ambiente di studio sono costituiti solitamente da sfere aventi un certo diametro: quando un raggio raggiunge una sfera le trasmette una dose d'energia proporzionale al segmento intersecato. Un raggio viene abbandonato quando il suo contenuto energetico cade al di sotto di un determinato livello di soglia.

Affinché i risultati siano statisticamente stabili, è necessario però lanciare moltissimi raggi in modo che siano mediamente coperte tutte le direzioni. La precisione del metodo, così come il tempo di calcolo, cresce con il numero di raggi lanciati e con il livello di soglia adottato.

Confrontando i due metodi descritti risulta che il metodo delle sorgenti immagine è acusticamente più accurato della tecnica del ray tracing, ma i tempi di calcolo crescono in misura esponenziale con l'ordine di riflessione mentre crescono solo linearmente per il ray tracing. Il metodo dei raggi conici combina i pregi di entrambe le tecniche in un unico algoritmo: ciascuna sorgente emette un elevato numero di coni che si propagano nell'ambiente utilizzando l'algoritmo ray tracing applicato ai loro assi. Quando un cono raggiunge un punto ricevente fra due successive riflessioni, viene creata una sorgente immagine il cui contributo energetico viene facilmente calcolato, considerando la divergenza sferica del cono. L'algoritmo permette inoltre di ricostruire l'originale fronte sferico dell'onda sonora procedendo ad una sovrapposizione dei coni e prevedendo l'applicazione di una funzione peso sulla sezione di ciascun cono.

Il metodo dei raggi triangolari è molto simile al metodo dei raggi conici ma discretizza il fronte d'onda sferico attraverso l'emissione di piramidi a base triangolare senza l'utilizzo di funzioni peso applicate sulle sezioni trasversali dei raggi. Tale metodo conduce a risultati leggermente più accurati del metodo dei raggi conici, a parità di parametri di calcolo, ma converge meno rapidamente verso i valori corretti. La scelta dell'algoritmo con cui effettuare le analisi acustiche sarà pertanto effettuata realizzando un compromesso fra la precisione desiderata e l'impiego delle risorse di calcolo.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 6.1.1.1 Modellazione della sorgente sonora

La modellazione della sorgente di rumore rappresenta l'aspetto più delicato nella definizione del problema acustico. Sotto questo punto di vista RAYNOISE presenta un'ottima flessibilità.

Sono previste tre tipi di fonti sonore variamente combinabili fra loro: sorgente puntuale, sorgente lineare, sorgente superficiale. Ciascuna sorgente è caratterizzata dalla sua posizione nel sistema di coordinate cartesiane con cui è stata definita la geometria della zona di studio e dal livello di potenza sonora (dB) in banda d'ottava o in terzi d'ottava.

Possono inoltre essere definiti i seguenti parametri:

*Angolo di emissione:* rappresenta l'angolo solido centrato sulla sorgente attraverso il quale sono lanciati i raggi conici. Limitare l'angolo di emissione può essere utile, per ridurre il tempo di calcolo, quando la sorgente è posizionata contro una superficie o in un angolo.

*Direttività:* generalmente la sorgente non emette con uguale intensità in tutte le direzioni ma presenta una direzionalità caratterizzata da una distribuzione in un piano orizzontale e in un piano verticale. RAYNOISE definisce questo parametro attraverso l'angolo di taglio a 3dB: si tratta dell'angolo, misurato in gradi sessagesimali e riferito agli assi principali, per cui l'intensità sonora è di 3dB inferiore al livello massimo. La direttività è funzione della frequenza, occorre perciò inserire valori definiti in bande o terzi d'ottava.

*Orientazione:* è determinata attraverso tre angoli riferiti agli assi principali.

*Ritardo di tempo:* permette di definire uno sfasamento temporale fra due sorgenti. È un parametro disponibile solamente nell'opzione Image.

Con l'opzione Mapping (utilizzando il metodo dei raggi triangolari) è possibile inoltre considerare l'emissione delle varie sorgenti correlata fra di loro. In questo modo è possibile modellare alcuni fenomeni di interferenza ottenendo risultati confrontabili con quelli ottenibili con i metodi FEM o BEM. Attraverso questa opzione è possibile ad esempio calcolare l'interferenza costruttiva e distruttiva fra due altoparlanti posti in un auditorium.

#### 6.1.1.2 Modellazione dei ricettori

In opzione Mapping occorre definire almeno una superficie ricevente su cui calcolare e successivamente visualizzare le grandezze acustiche. Una superficie ricevente è costituita da una griglia di microfoni posizionati su uno stesso elemento acusticamente trasparente e costituito da quattro nodi.

Il numero di microfoni costituisce un parametro importante nella determinazione del tempo di



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

calcolo essendo le due grandezze in correlazione lineare. Tuttavia maggiore è il numero di microfoni, maggiore risulterà la precisione del calcolo e la definizione grafica.

In opzione Image i ricevitori sono costituiti da uno o più microfoni isolati fra di loro e localizzati nelle posizioni di maggiore interesse nell'ambito del problema in esame.

Ciascun microfono cattura il cono o la piramide che sopraggiunge nella sua posizione immagazzinandone il relativo contenuto energetico e registrando l'istante di arrivo, raccogliendo cioè i dati necessari alla stesura del riflettogramma.

### 6.1.1.3 Modello della diffrazione

RAYNOISE consente di modellare fenomeni diffrattivi causati da schermi e barriere. Il programma è infatti in grado di verificare se, fra due successive riflessioni di ciascun raggio conico, esista qualche microfono posto nell'angolo solido del cono ma non raggiungibile direttamente per la frapposizione di superfici acusticamente opache.

Per poter considerare la diffrazione occorre specificare delle linee di diffrazione poste sui bordi delle superfici frapposte. L'algoritmo utilizzato per calcolare il contributo energetico del raggio diffratto, è la ben nota formula di Kurze-Anderson:

$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad [dB]$$

dove  $\Delta L_B$  è l'attenuazione dovuta alla presenza dello schermo, [dB];

$N$  è il numero di Fresnel.

Con questo algoritmo è possibile solo considerare fenomeni diffrattivi del primo ordine che tuttavia rappresentano i casi più ricorrenti nell'ambito dell'acustica ambientale.

## 6.2 Impostazione delle simulazioni e scelta delle condizioni di emissione

Le simulazioni previsionali delle emissioni sonore dell'intero ponte si compongono dei seguenti elementi:

- sorgenti sonore
- elementi geometrici
- punti di calcolo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Le sorgenti sonore, in particolare, costituiscono l'elemento di raccordo con le analisi aeroacustiche svolte in precedenza. Sulla base di tali risultati si è proceduto infatti con la taratura degli elementi da inserire nel modello di simulazione numerica RAYNOISE come di seguito descritto.

### 6.2.1 Scopo della taratura

Lo scopo di questa fase è il conseguimento di una configurazione che meglio approssimi il comportamento reale della struttura. In particolare, la taratura del modello è stata eseguita ai fini di applicare i dati ottenuti dalle analisi aeroacustiche, precedentemente illustrate, all'insieme degli elementi strutturali in considerazione. Per fare questo è necessario individuare quei valori di attenuazione di potenza della sorgente, in termini di direttività orizzontale e verticale, che permettano di conseguire gli obiettivi richiesti.

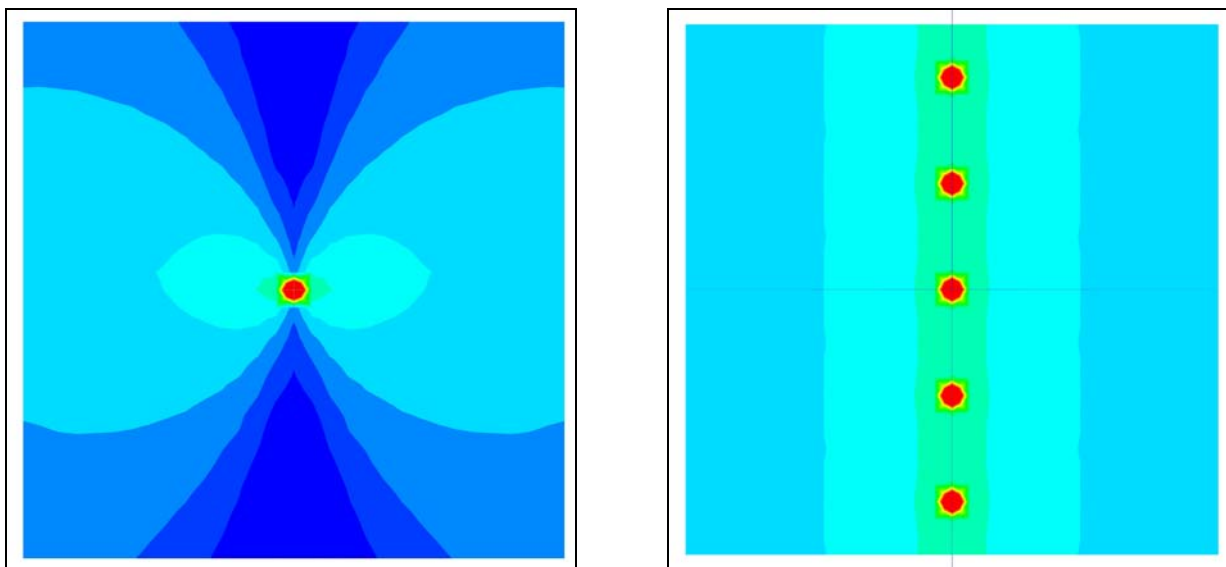


Figura 6.2 Effetto dell'introduzione di valori di direttività per una sorgente lineare, Piano XY – Piano XZ

La necessità di approssimare l'evento dipende da diversi fattori tra cui il metodo di calcolo proprio di RAYNOISE.

La taratura è stata effettuata mediante la realizzazione di un modello numerico che comprende la sola sorgente analizzata e una serie di punti di calcolo che riproducono la configurazione testata nelle simulazioni aeroacustiche. La procedura è stata eseguita con modalità differenti per gli elementi verticali ed orizzontali.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 6.2.1.1 Taratura degli elementi verticali

Gli elementi strutturali verticali sono stati simulati come una sorgente lineare, di lunghezza complessiva pari a 40 m. Il modello previsionale RAYNOISE prevede, per questo tipo di sorgenti, la divisione in un numero  $n$  di poli definito dell'utente. La potenza sonora della sorgente lineare è ugualmente divisa tra tutti i poli che la costituiscono. Ogni polo si comporta come una sorgente puntiforme. Se da una parte una maggiore densità di poli lungo la sorgente permette una migliore approssimazione del fenomeno, dall'altra comporta un notevole aumento della complessità del calcolo e dell'utilizzo della memoria del software stesso. È quindi necessario individuare una configurazione che concili questi due aspetti. Nel caso in esame si è optato per una suddivisione in 101 poli.

In questa fase, inoltre, la definizione dei ricettori è stata fatta sulla base di quanto elaborato dagli studi aeroacustici. In particolare, i punti di calcolo sono stati collocati su di una circonferenza con  $r = 2D$ , cioè pari a 0.212 m, ogni  $10^\circ$ . Inoltre, sono stati inseriti altri punti di calcolo posti su una circonferenza di raggio pari a 5 m, così da minimizzare gli effetti di vicinanza con i poli emissivi e valutare l'attenuazione in un campo più lontano.

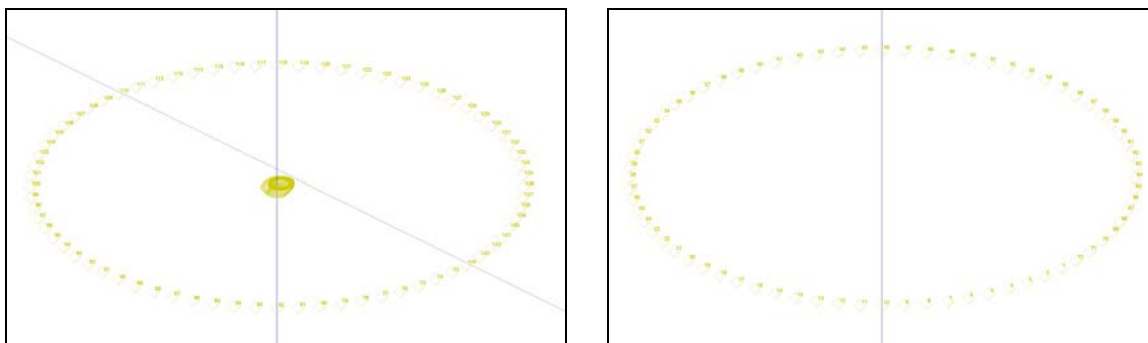


Figura 6.3 Visualizzazione dei punti di calcolo a 5 m e a 0.212 m

La prima fase di taratura consiste, quindi, nella simulazione di questa sorgente senza alcuna direttività per poter valutare l'attenuazione puramente geometrica che questa condizione induce. I valori così ottenuti sono stati confrontati con quanto desunto dai calcoli aeroacustici: attraverso le differenze tra i due risultati è quindi possibile definire dei valori di direttività per ogni frequenza e per ogni angolo delle circonferenze sulle quali si trovano i punti di calcolo. Introducendo, dunque, questi nuovi valori di direttività si ottengono nei punti di taratura i valori che meglio approssimano il comportamento emissivo della sorgente indagata.

In questo modo, semplicemente variando la potenza della sorgente, sarà possibile ottenere dei

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Rev</i></td> <td style="text-align: center;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

risultati che corrispondono al comportamento reale dell'elemento strutturale.

L'insieme di queste considerazioni è stato applicato a tutte le configurazioni indicate in Tabella 5.2. Per ogni elemento verticale sono state quindi individuate le frequenze maggiormente significative in termini di emissioni, dedotte dagli studi numerici.

In Tabella 6.1 sono riportati i valori delle bande analizzate per ciascun elemento verticale in funzione della velocità del vento. Le frequenze evidenziate corrispondono alle massime emissioni in termini di SPL.

TIPO PENDINO	VELOCITA' DEL VENTO	
	25 m/s	30 m/s
<b>F1</b>	40	50
	50	63
	63	80
	80	100
	125	160
<b>F2</b>	50	63
	63	80
<b>F3</b>	40	50
	50	63
<b>F4</b>	31.5	40
	40	50

Tabella 6.1 Frequenze di taratura dei pendini (evidenziate le fondamentali)

Le Figura 6.4 - Figura 6.11 riportano il confronto tra i risultati del processo di taratura e le curve di direttività dei calcoli aeroacustici.

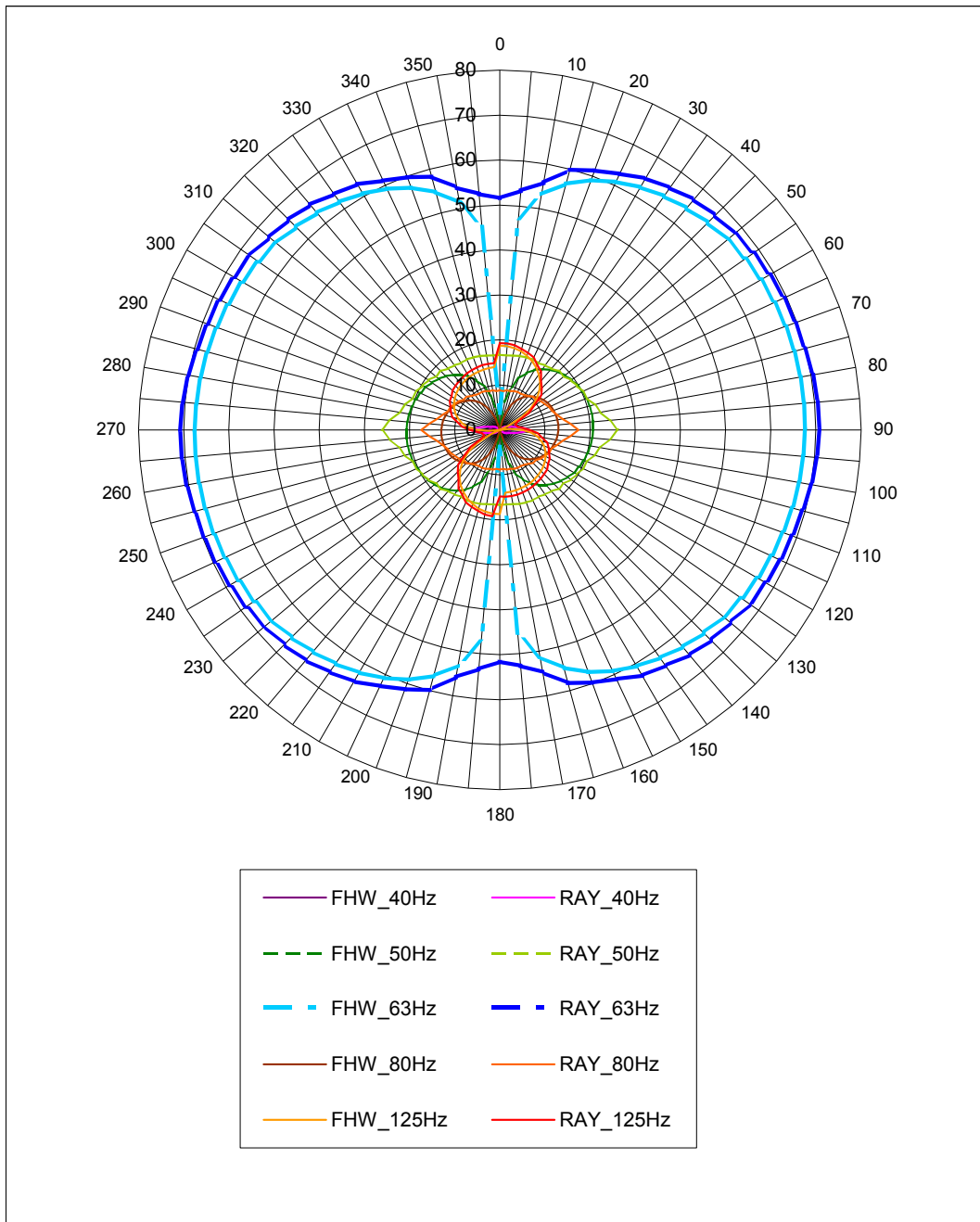


Figura 6.4 Direttività pendino F1, U = 25 m/s

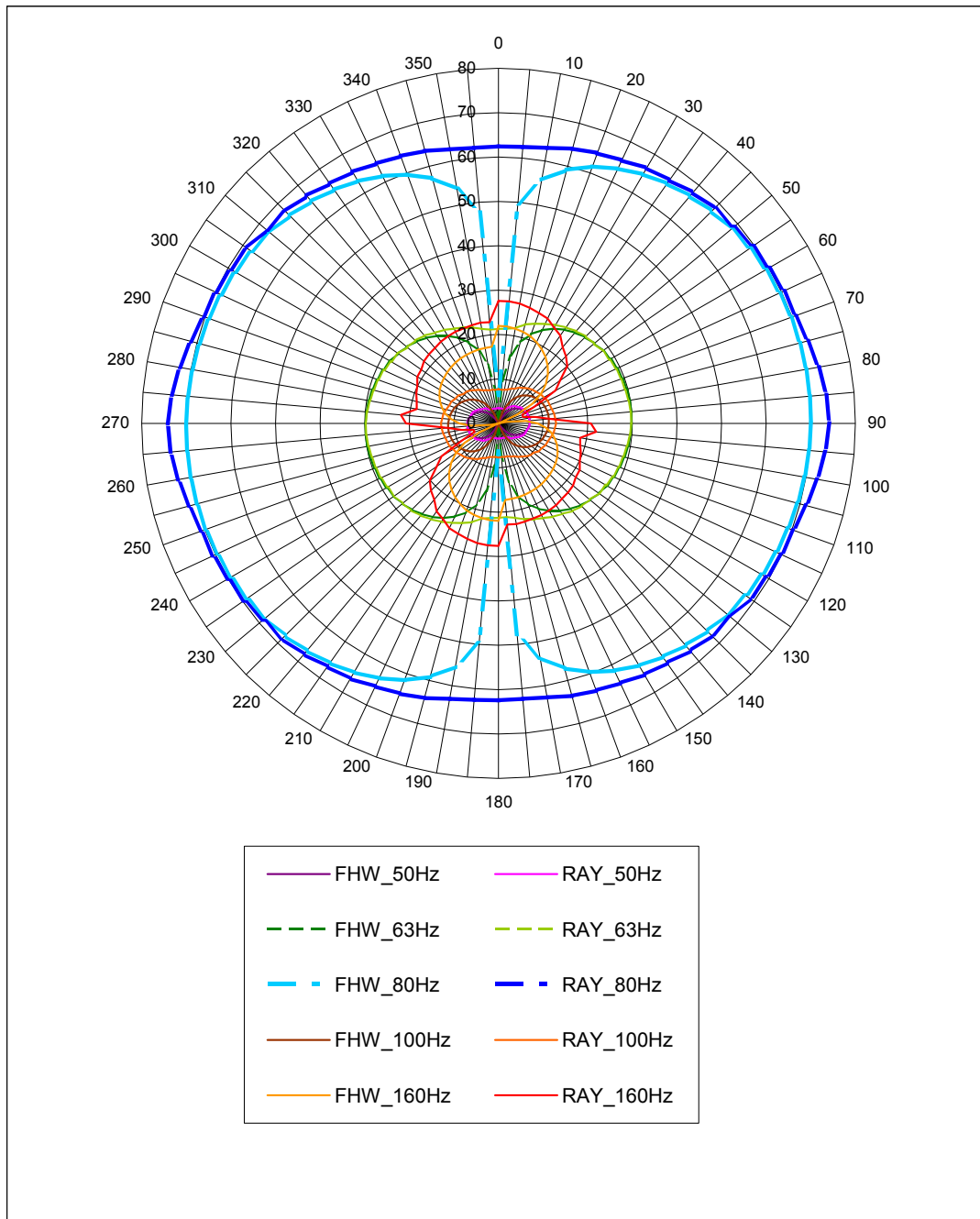


Figura 6.5 Direttività pendino F1, U = 30 m/s

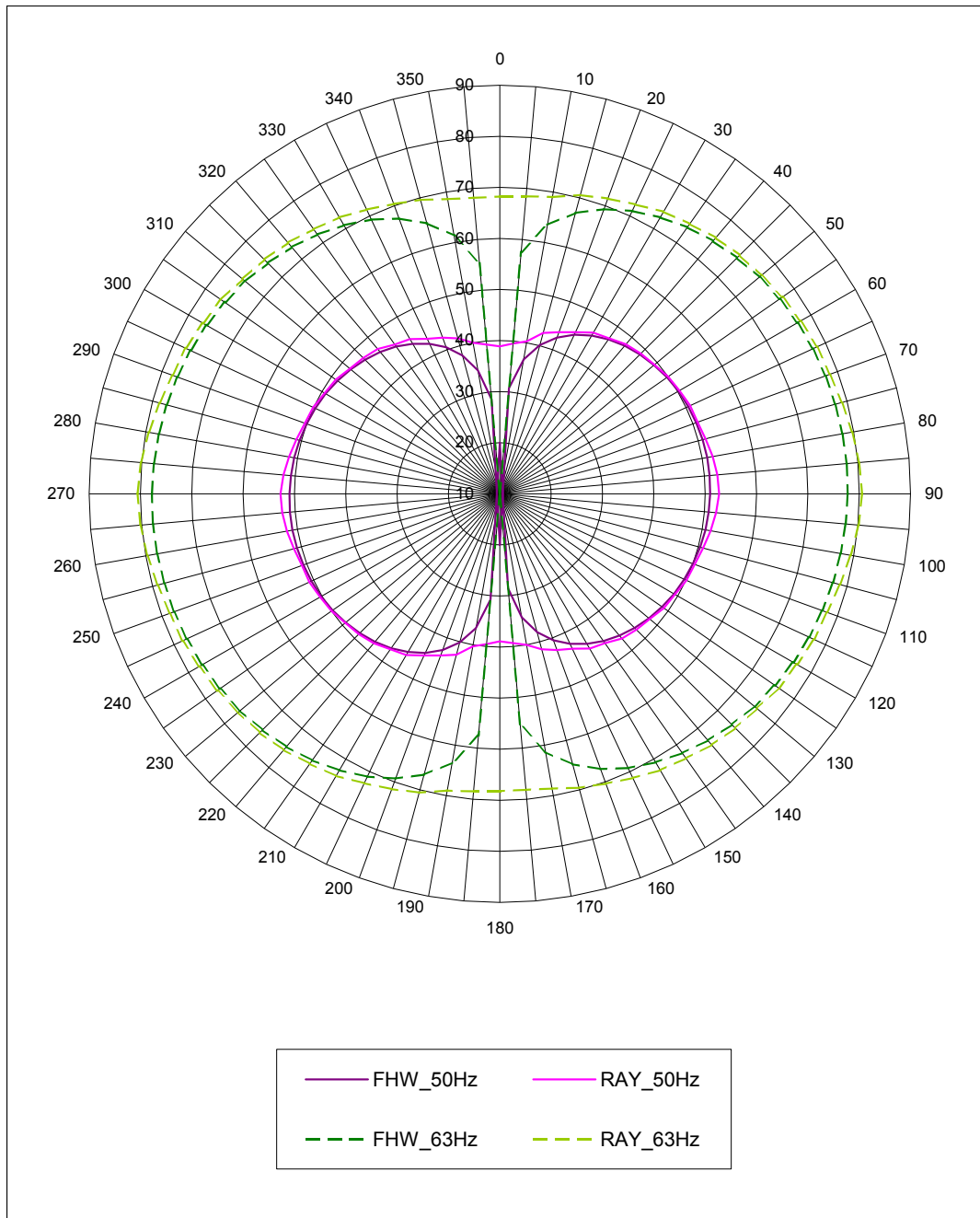


Figura 6.6 Direttività pendino F2, U = 25 m/s

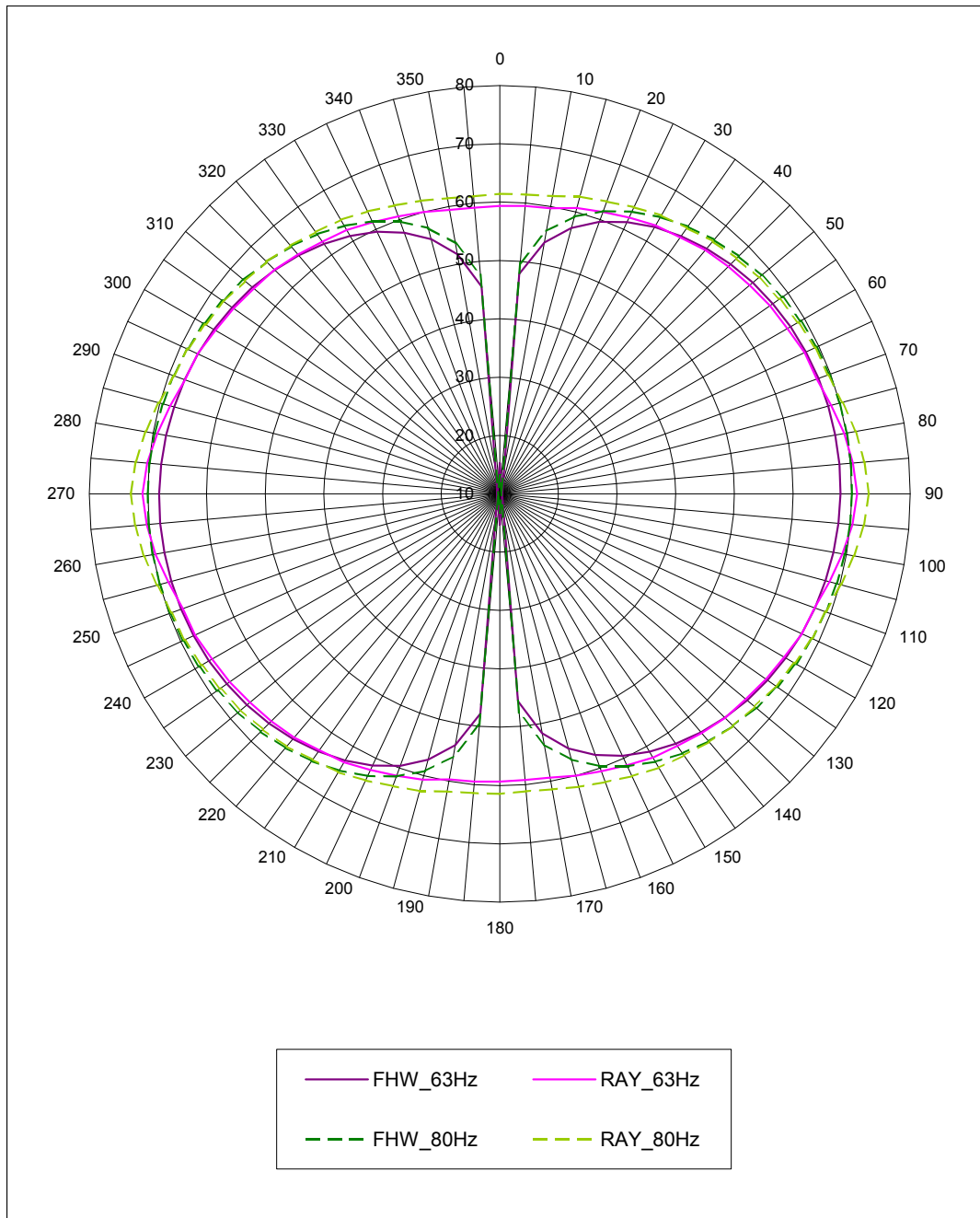


Figura 6.7 Direttività pendino F2, U = 30 m/s



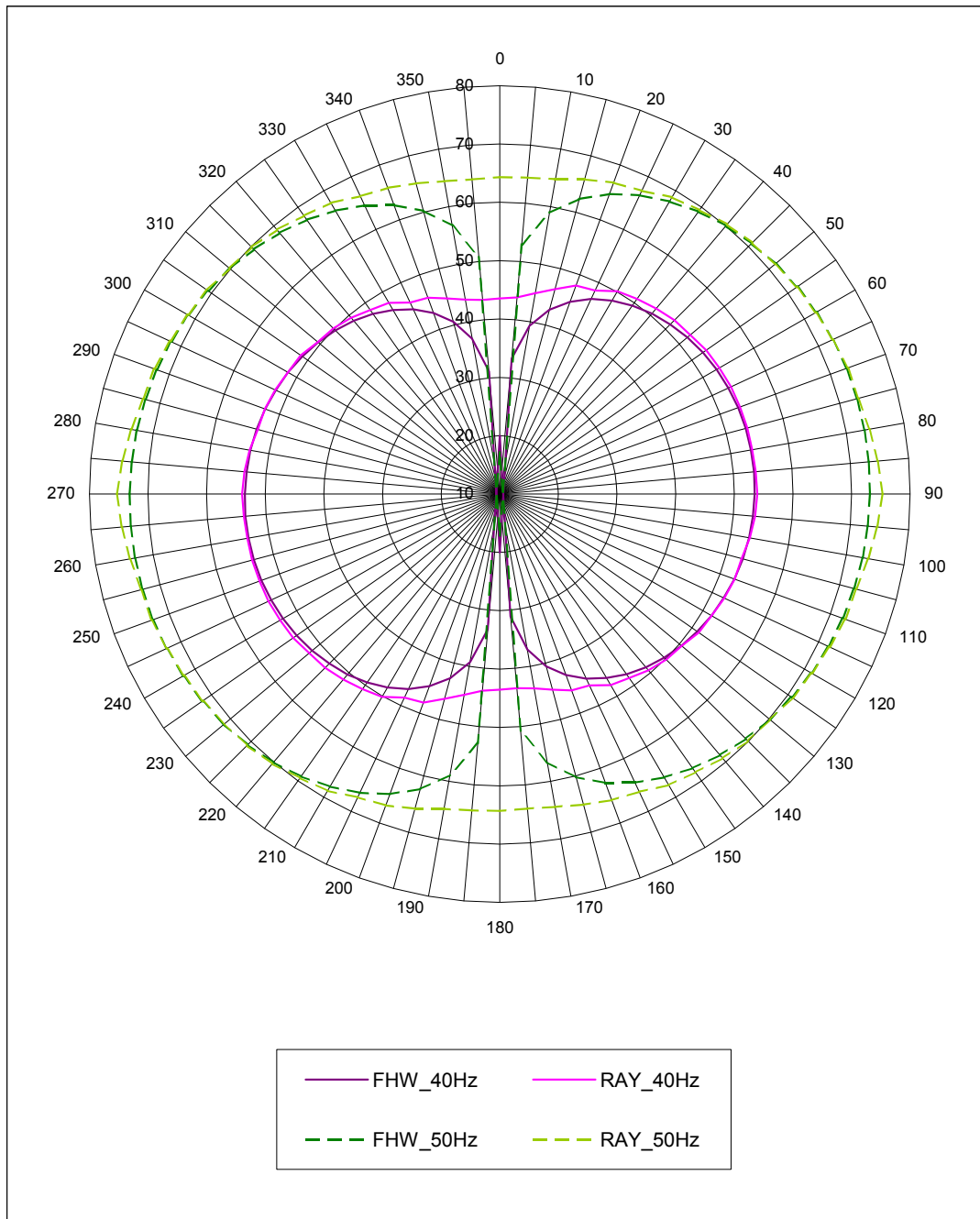


Figura 6.8 Direttività pendino F3, U = 25 m/s

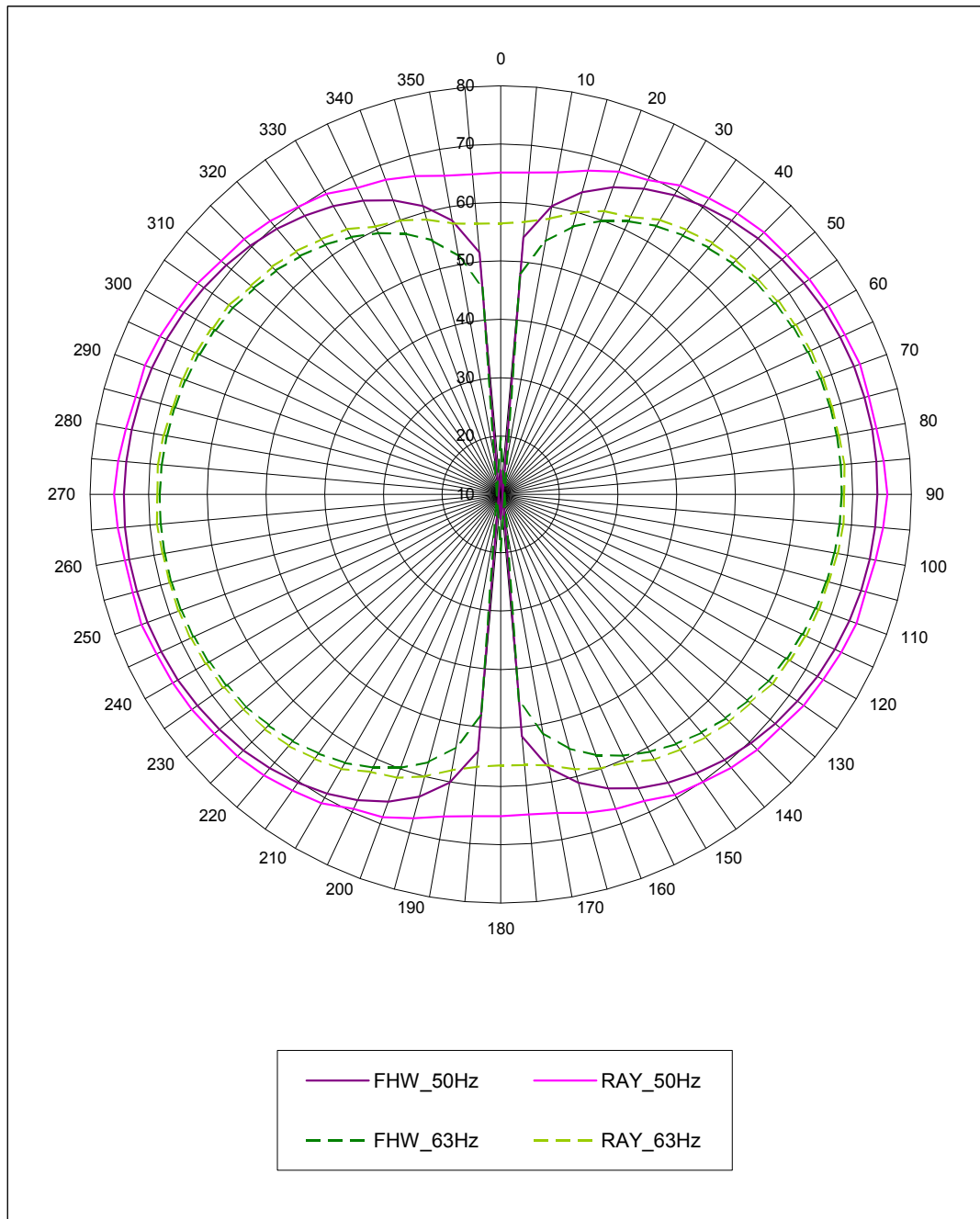


Figura 6.9 Direttività pendino F3, U = 30 m/s

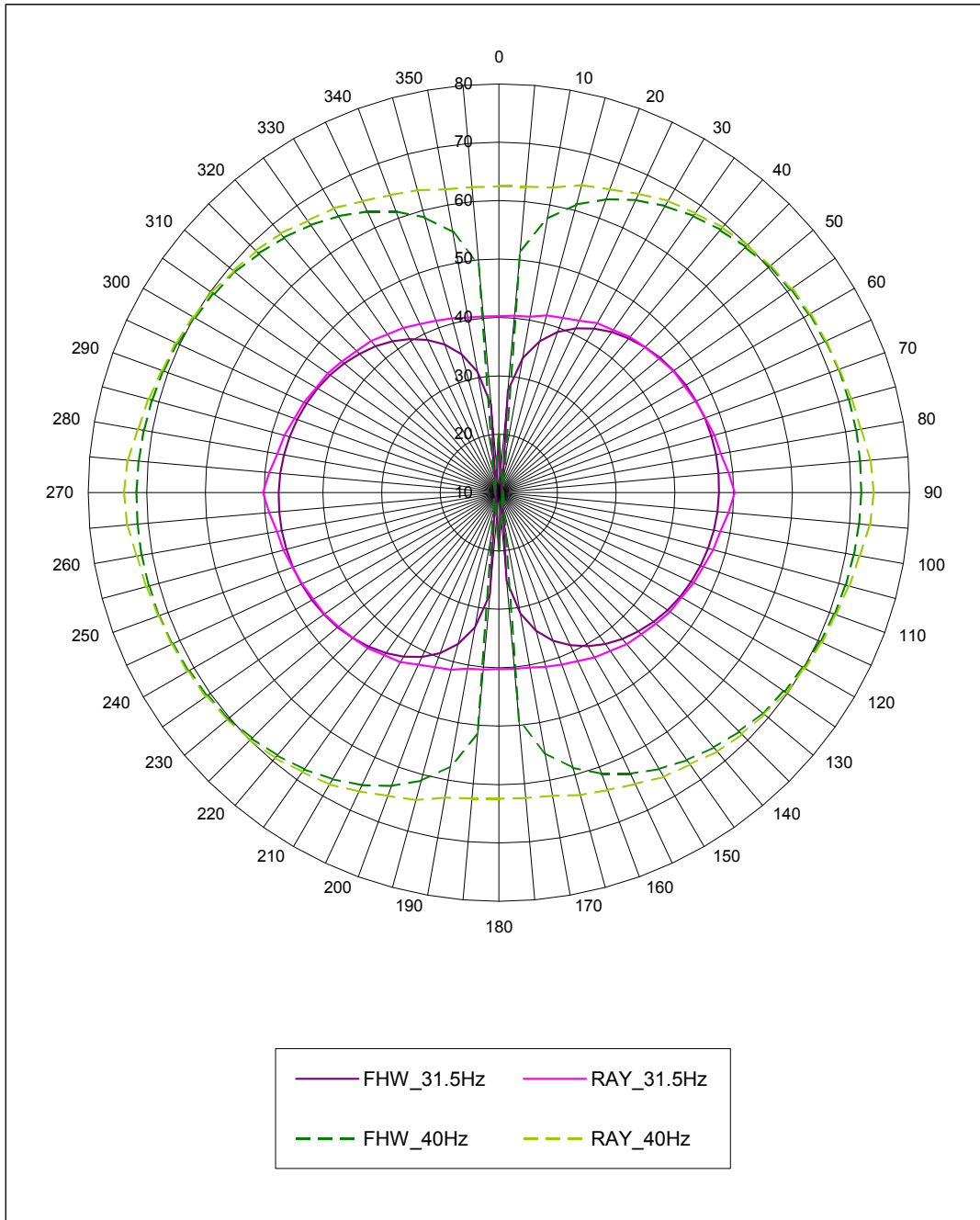


Figura 6.10 Direttività pendino F4, U = 25 m/s

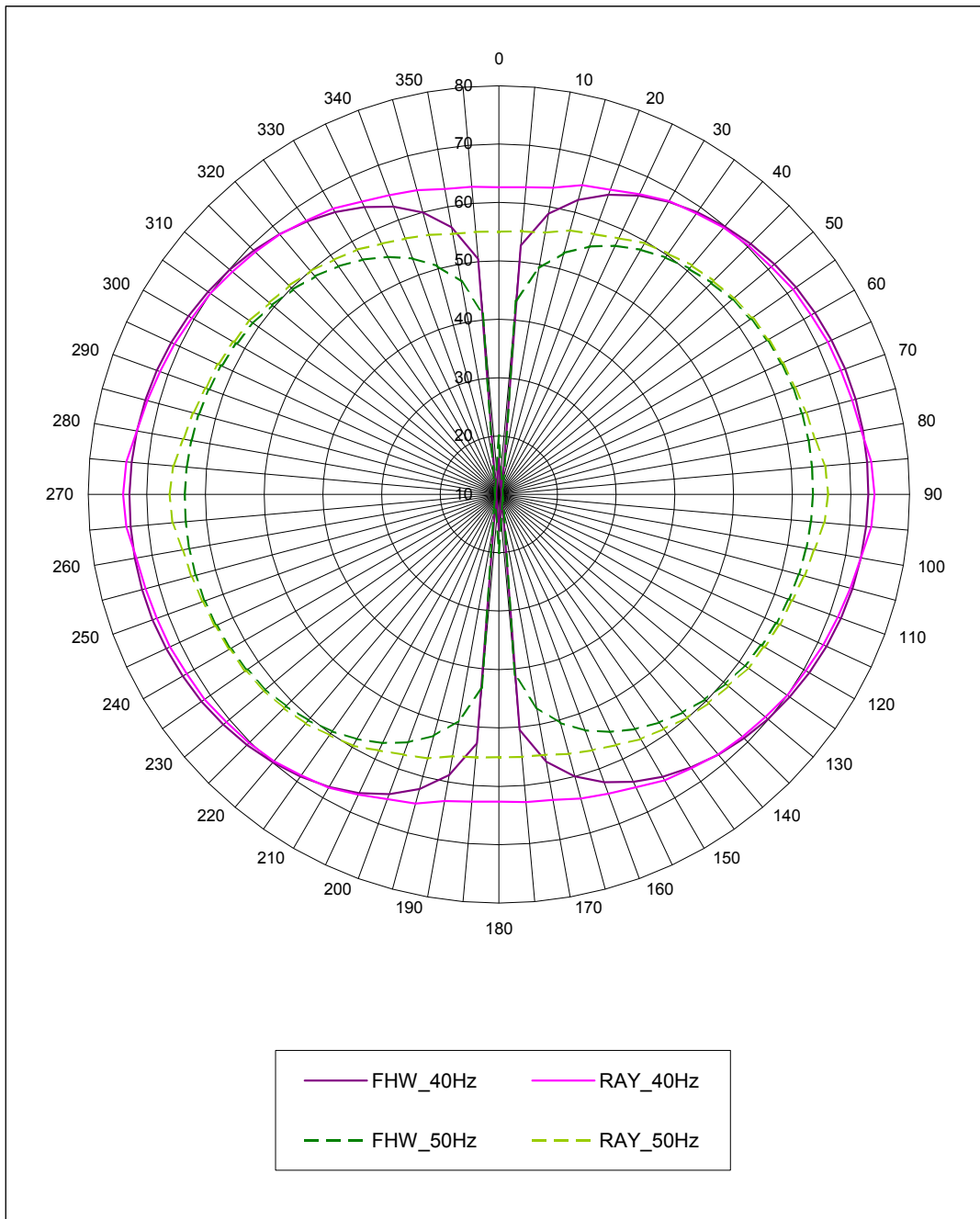


Figura 6.11 Direttività pendino F4, U = 30 m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 6.2.1.2 Taratura degli elementi orizzontali

Procedura analoga è stata utilizzata per gli elementi orizzontali, cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria, cavo di alimentazione ferroviaria e cavo di terra, definiti nei capitoli precedenti.

Queste sorgenti, caratterizzate da una sezione tipica di dimensioni molto inferiori rispetto agli elementi verticali, hanno tuttavia richiesto una definizione della sorgente di taratura specifica: in particolare il cavo di terra è stato tarato attraverso una sorgente lineare di lunghezza pari a 0.6 m, mentre per il cavo di supporto e di alimentazione ferroviaria sono state introdotte sorgenti lineari di lunghezza pari a 2.5 m. In entrambi i casi le sorgenti sono state suddivise in 101 poli. I punti di calcolo sono stati posizionati su di una circonferenza posta sul piano trasversale alla sezione del cavo, di raggio pari a 0.38 m.

Anche per questi elementi sono state analizzate le frequenze maggiormente significative in termini di emissione sonora. La sola condizione del vento analizzata corrisponde ai 25 m/s.

Le Figura 6.12 - Figura 6.14 riportano il confronto tra i risultati della taratura e le curve di direttività.

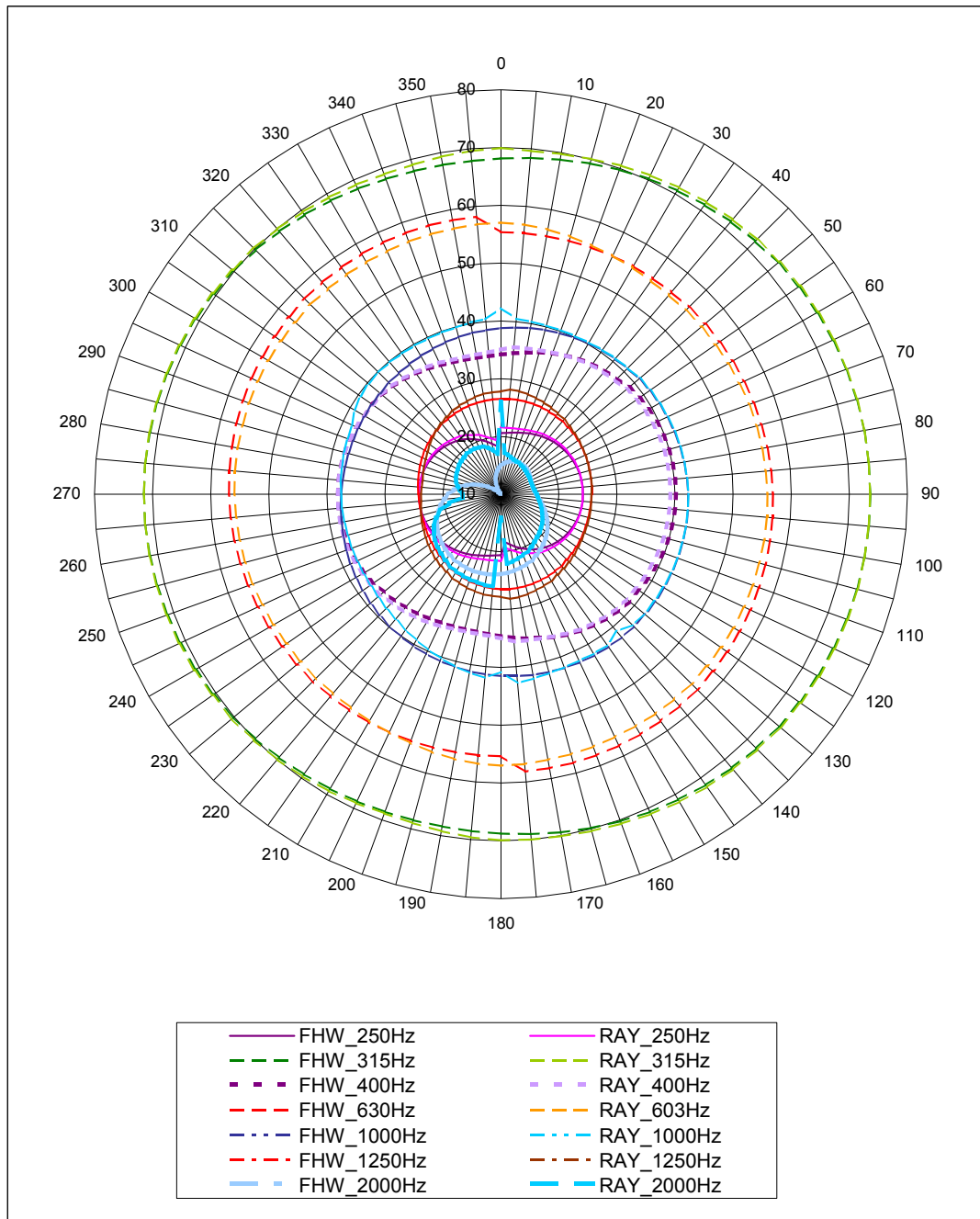


Figura 6.12 Direttività cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria, U = 25 m/s

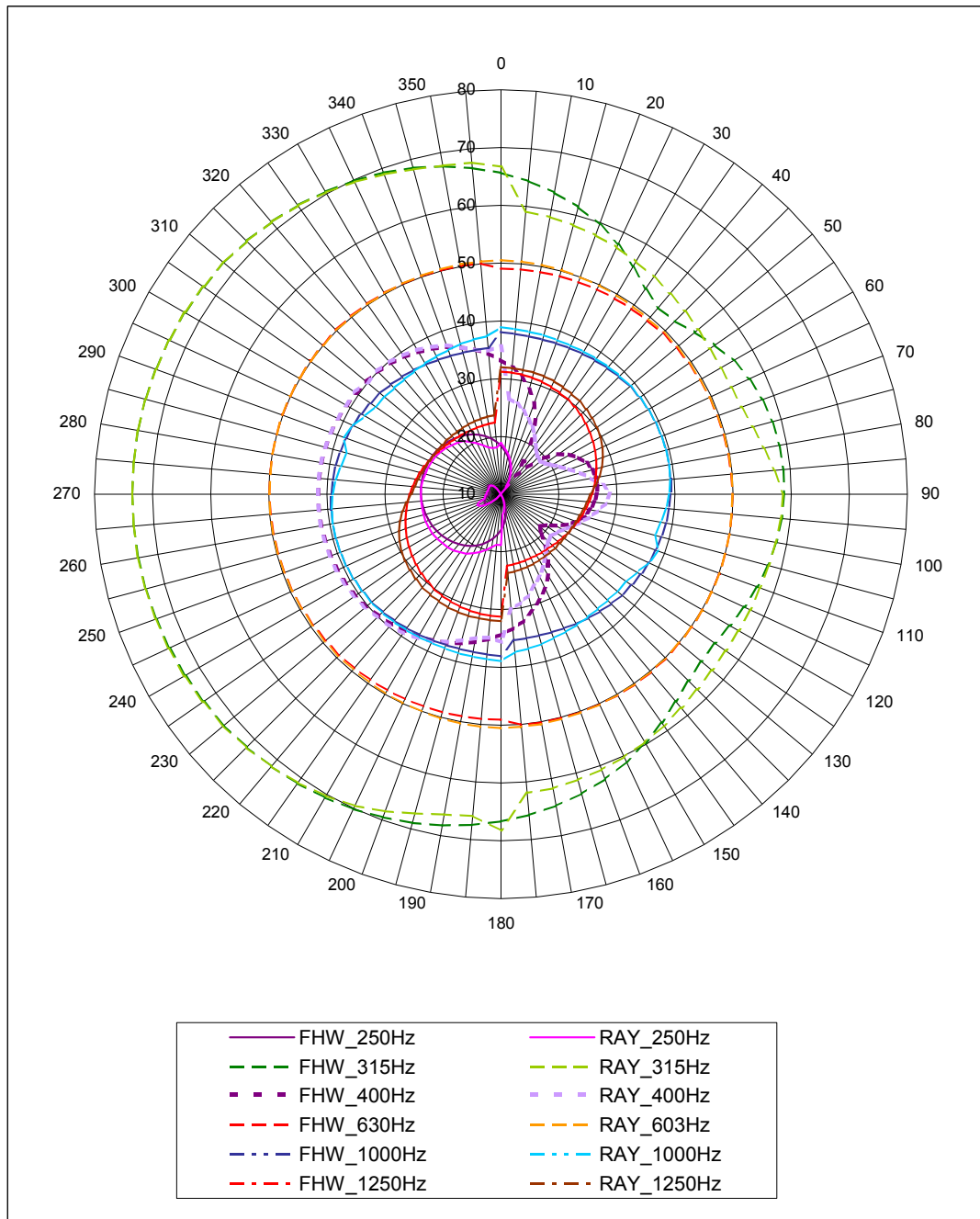


Figura 6.13 Direttività cavo di alimentazione ferroviaria, U = 25 m/s

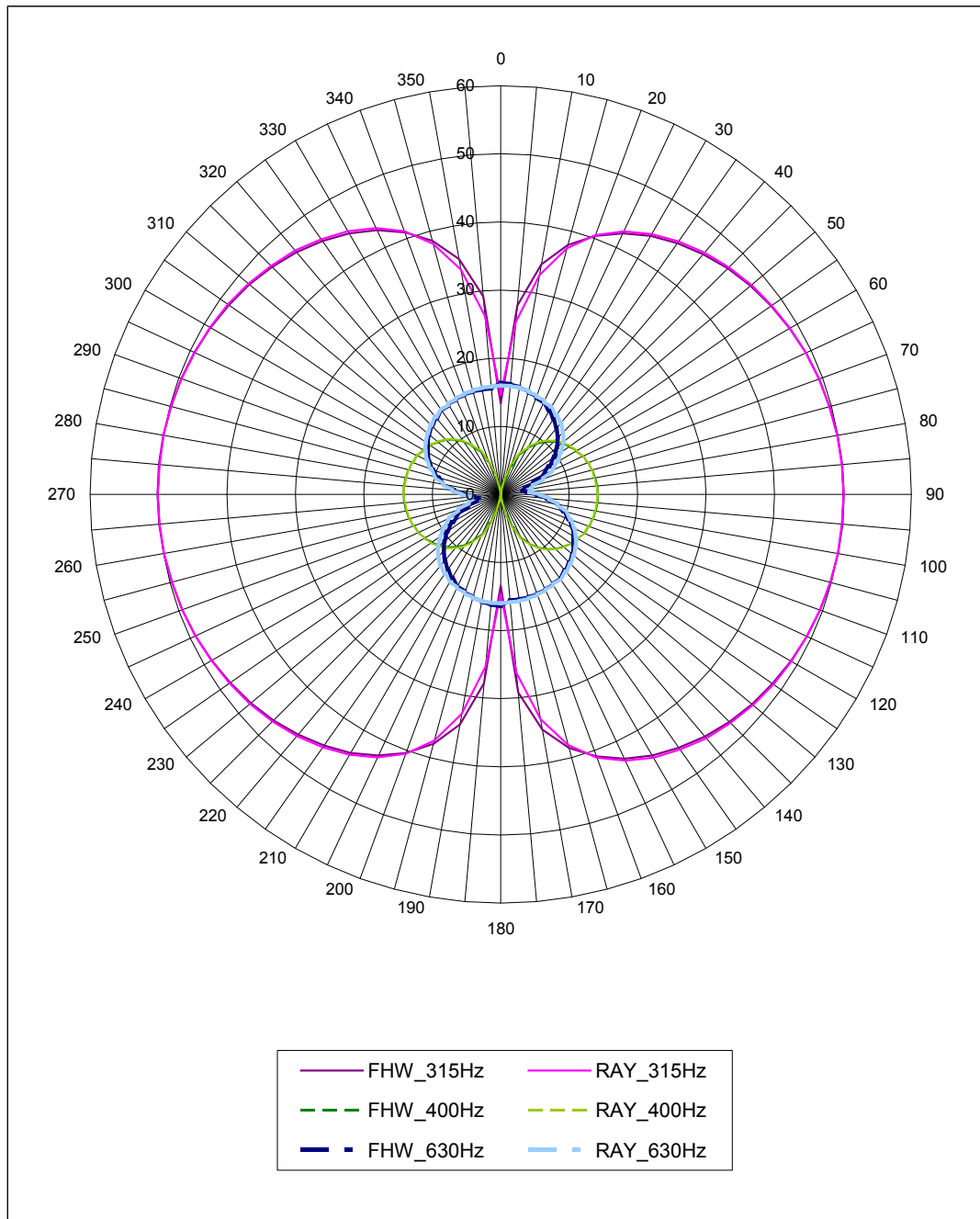


Figura 6.14 Direttività cavo di terra,  $U = 25$  m/s



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 6.2.2 Implementazione del modello di calcolo

Le operazioni di taratura hanno permesso di definire le caratteristiche di emissione dei singoli elementi nel modello ray-tracing. A ciascun elemento strutturale definito come sorgente sonora sono state pertanto associate le caratteristiche di emissione definite in precedenza. In particolare gli elementi verticali di maggiore estensione sono stati suddivisi in un tratto inferiore con valori di  $z$  compresi tra la quota iniziale del pendino e 150 m s.l.m. e un tratto superiore con la parte eventualmente rimanente. Alla parte inferiore sono state assegnate le corrispondenti emissioni determinate per velocità del vento di 25 m/s, mentre per le altezze maggiori la velocità del vento considerata è di 30 m/s.

Inoltre sono stati inseriti gli elementi orizzontali, costituiti dal cavo di supporto della rete di alimentazione ferroviaria, il cavo di terra e il cavo di alimentazione ferroviaria, per un totale di 8 sorgenti lineari.

Il modello geometrico si completa con l'inserimento dell'orografia del territorio mediante una mesh di elementi triangolari che poggiano sui vertici del modello digitale 3D del terreno con spaziatura pari a 100 m (Figura 6.15) e con la struttura del ponte, costituita, ai fini delle simulazioni acustiche, dai soli impalcati stradali e ferroviario (Figura 6.17). In Figura 6.16 è riportata una vista complessiva dell'intero modello geometrico.

I punti di calcolo per la mappatura dei risultati delle simulazioni sono stati infine introdotti utilizzando la mesh del modello del terreno con un offset verticale pari a 1.5 m.

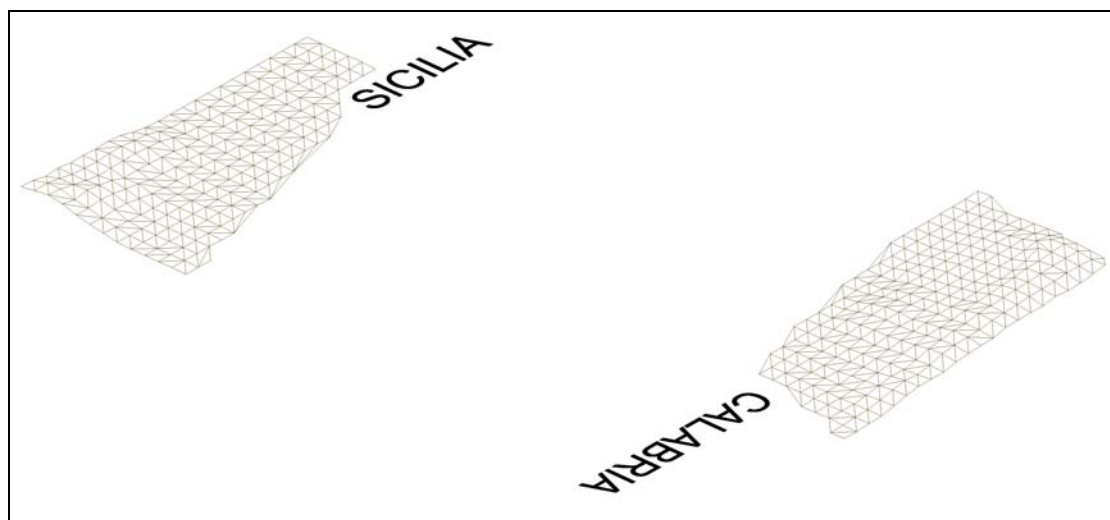


Figura 6.15 Modello geometrico 3D del terreno

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

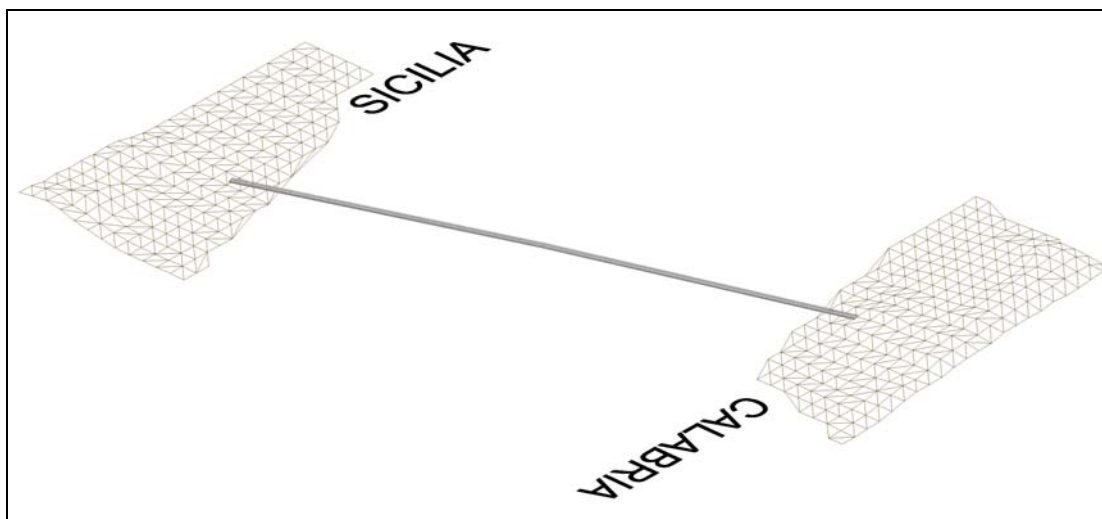


Figura 6.16 Modello geometrico 3D del terreno e della struttura del ponte

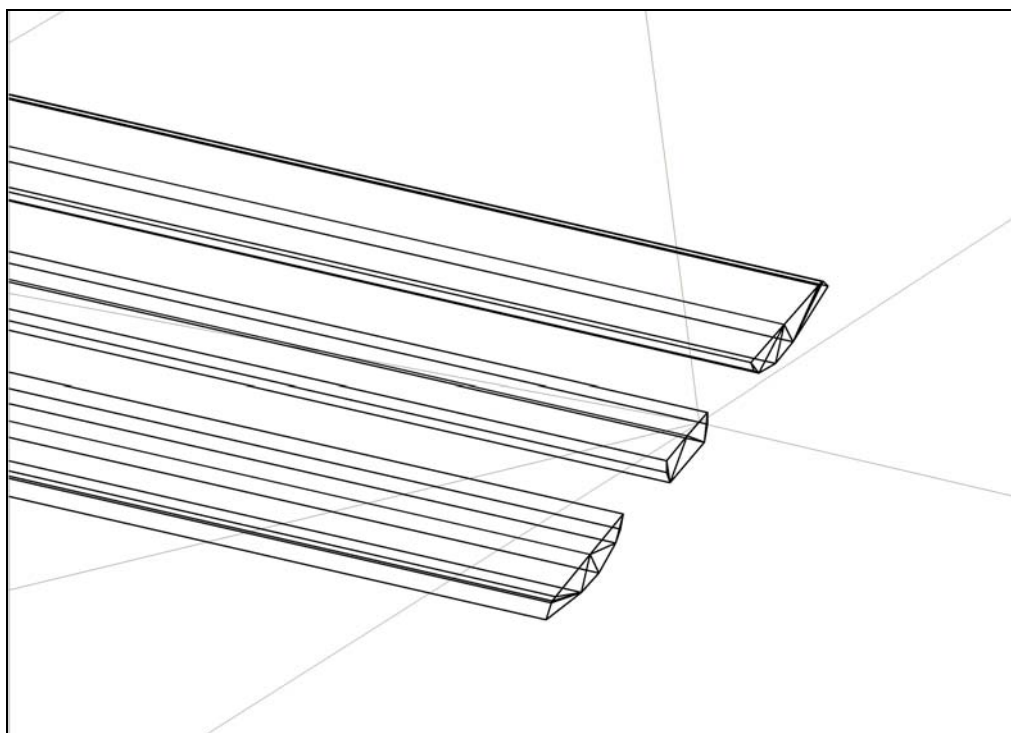


Figura 6.17 Dettaglio della struttura del ponte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

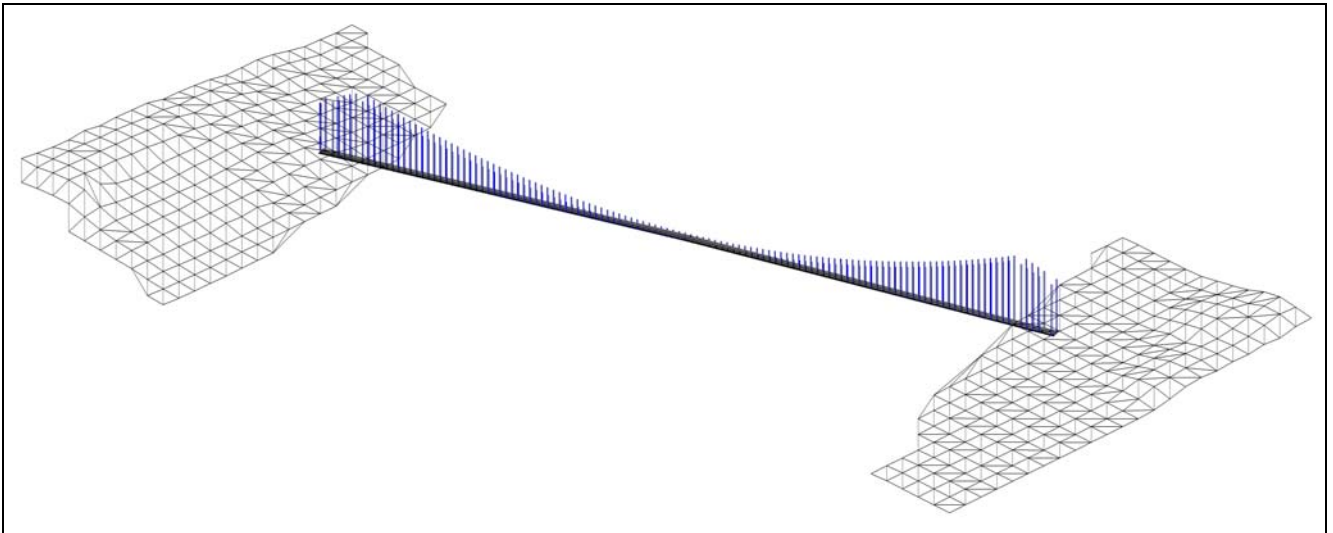


Figura 6.18 Introduzione delle sorgenti sonore

Le Figura 6.18 - Figura 6.19 riportano alcune viste complessive del modello utilizzato nelle simulazioni numeriche. Le linee blu rappresentano gli assi delle sorgenti sonore.

Nel complesso, per effetto della segmentazione delle sorgenti lineari in monopoli, il modello si compone di 63036 sorgenti che rappresentano le emissioni acustiche delle sorgenti verticali e 22104 per le sorgenti orizzontali. In considerazione dell'altissimo numero di sorgenti è stato necessario contenere al massimo il numero degli altri elementi presenti, sono stati pertanto inseriti 1419 ricettori per la mappatura dei risultati, mentre la geometria si compone nel complesso di 1920 superfici a tre o quattro lati.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

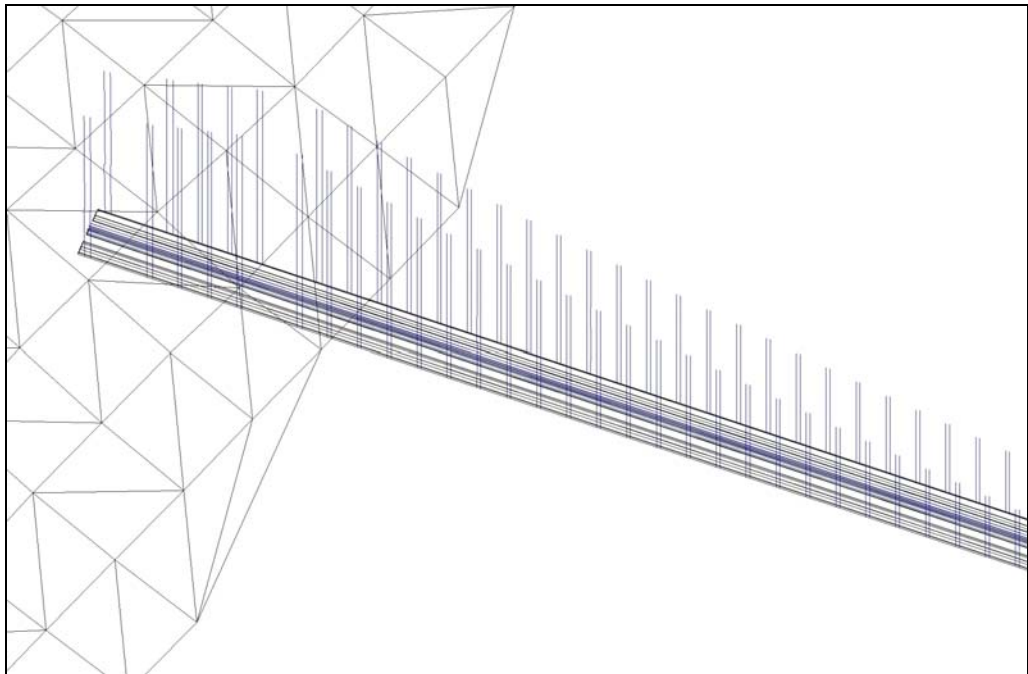
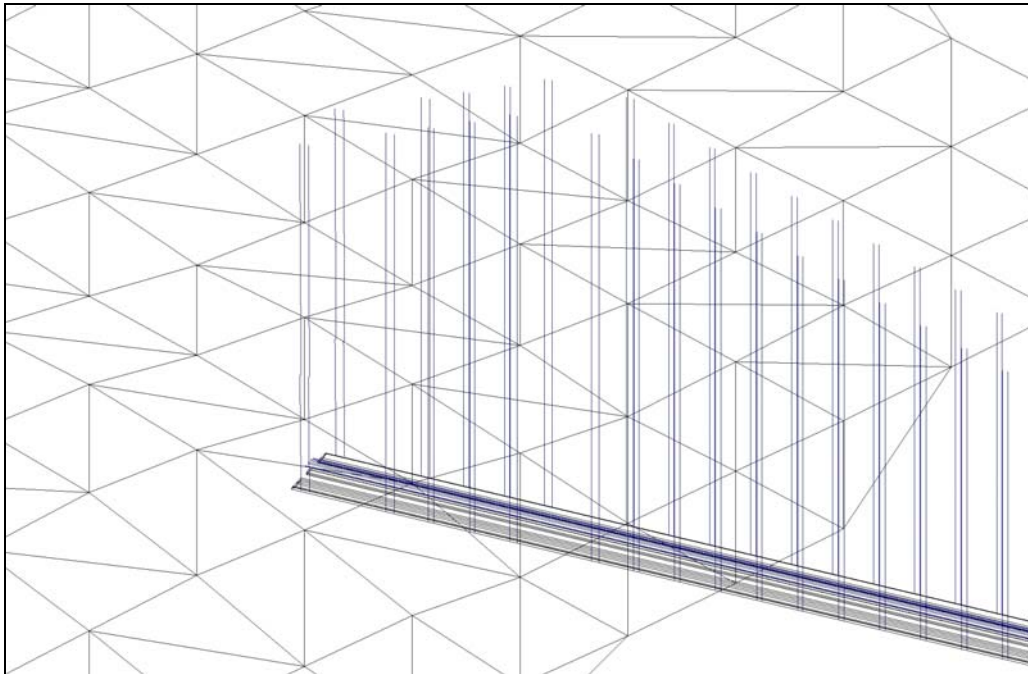


Figura 6.19 Dettagli delle sorgenti introdotte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011



Figura 6.20 Angolo di provenienza del vento più sfavorevole

### 6.2.3 Scenari di calcolo

La scelta degli scenari di calcolo riprende le considerazioni svolte sulle caratteristiche anemologiche dell'area e sulla direttività delle emissioni di natura aeroacustica. In particolare la connotazione dei due aspetti suggerisce, nell'ottica di massima cautela, di procedere con una configurazione tenga in debita considerazione gli effetti congiunti dei due fattori.

I valori massimi di emissione si collocano, infatti, in prossimità dell'angolo di 90° rispetto alla direzione di provenienza del vento ed è pertanto evidente che gli impatti massimi sul territorio si riscontrano in una condizione di provenienza del vento ortogonale all'asse del ponte. In queste condizioni, infatti, le componenti di massima emissione di ciascun elemento verticale si sommano tra loro e sono inoltre presenti anche le emissioni derivanti dagli elementi orizzontali. Questi ultimi, infatti, variando l'angolo di provenienza risulterebbero investiti da velocità via via inferiori fino ad annullare l'emissione acustica.

Per questo motivo lo scenario di riferimento prevede una rotazione della direttività degli elementi verticali corrispondente ad un vento ortogonale all'asse del ponte (71° N, Figura 6.20) e la presenza sinergica degli elementi orizzontali.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

E' stata inoltre eseguita una simulazione relativa alla configurazione con vento parallelo all'asse del ponte, rappresentativa dell'emissione minima riscontrabile per effetto del differente schema di composizione dei vari contributi emissivi (massima direttività dei pendini rivolta verso l'esterno del ponte, nessuna emissione dai cavi orizzontali), ma con maggiori probabilità di occorrenza.

### 6.3 Risultati delle simulazioni

I risultati delle simulazioni sono stati riportati nelle quattro tavole grafiche individuabili con i seguenti codici:

Mappatura impatto aeroacustico - Vento parallelo all'asse ponte - Tavola 1 di 2	CG0700	A	E5	D	C	17	00	RM	00	00	00	17
Mappatura impatto aeroacustico - Vento parallelo all'asse ponte - Tavola 2 di 2	CG0700	A	E5	D	C	17	00	RM	00	00	00	18
Mappatura impatto aeroacustico - Vento ortogonale all'asse ponte - Tavola 1 di 2	CG0700	A	E5	D	C	17	00	RM	00	00	00	43
Mappatura impatto aeroacustico - Vento ortogonale all'asse ponte - Tavola 2 di 2	CG0700	A	E5	D	C	17	00	RM	00	00	00	44

Le tavole riportano sulla planimetria di progetto i livelli di emissione sonora del ponte nelle due configurazioni indagate mediante una gradazione di colori al continuo. Le Figura 6.21 - Figura 6.24 documentano una vista assonometrica degli stessi risultati visualizzati all'interno del modello Raynoise.

I livelli più elevati risultano, come atteso dalle simulazioni, con vento ortogonale all'asse del ponte, con valori massimi che raggiungono i 45 dBA nelle aree di attestamento su entrambi i lati. La presenza delle sorgenti orizzontali con emissione continua sull'intero tracciato risulta in questo caso un elemento di continuità che si sovrappone al minimo di emissione degli elementi verticali, che nella mezzeria del ponte presentano lunghezze molto ridotte. Da sottolineare che i livelli sono calcolati dal software in corrispondenza dei nodi visualizzati nelle figure, le gradazioni di colore, molto utili nell'interpretazione dei risultati, sono pertanto rappresentative dell'interpolazione dei livelli all'interno di ciascun elemento di collegamento, ma non sempre tale interpolazione è rappresentativa del reale fenomeno acustico.

La configurazione con vento parallelo al ponte documenta una configurazione emissiva di maggior complessità e da evidenza della forte riduzione dei livelli nella parte centrale dell'infrastruttura di collegamento. In questo caso i valori massimo sono circa pari a 25 dBA, sempre localizzati in prossimità delle torri, dove gli elementi verticali assumono maggior lunghezza.

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</p>		<p><i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc</p>	<p><i>Rev</i> F0</p>	<p><i>Data</i> 20/06/2011</p>

In relazione alle caratteristiche spettrali delle emissioni, la composizione dei diversi contributi viene riportata nelle tavole di mappatura in alcuni punti caratteristici. L'emissione tonale dei singoli elementi definisce uno spettro finale con caratteristiche puntuali che si modificano nei rapporti di ampiezza in funzione della posizione relativa sorgente ricevitore.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		Codice documento AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Rev</th> <th>Data</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	Rev	Data	F0	20/06/2011
Rev	Data						
F0	20/06/2011						

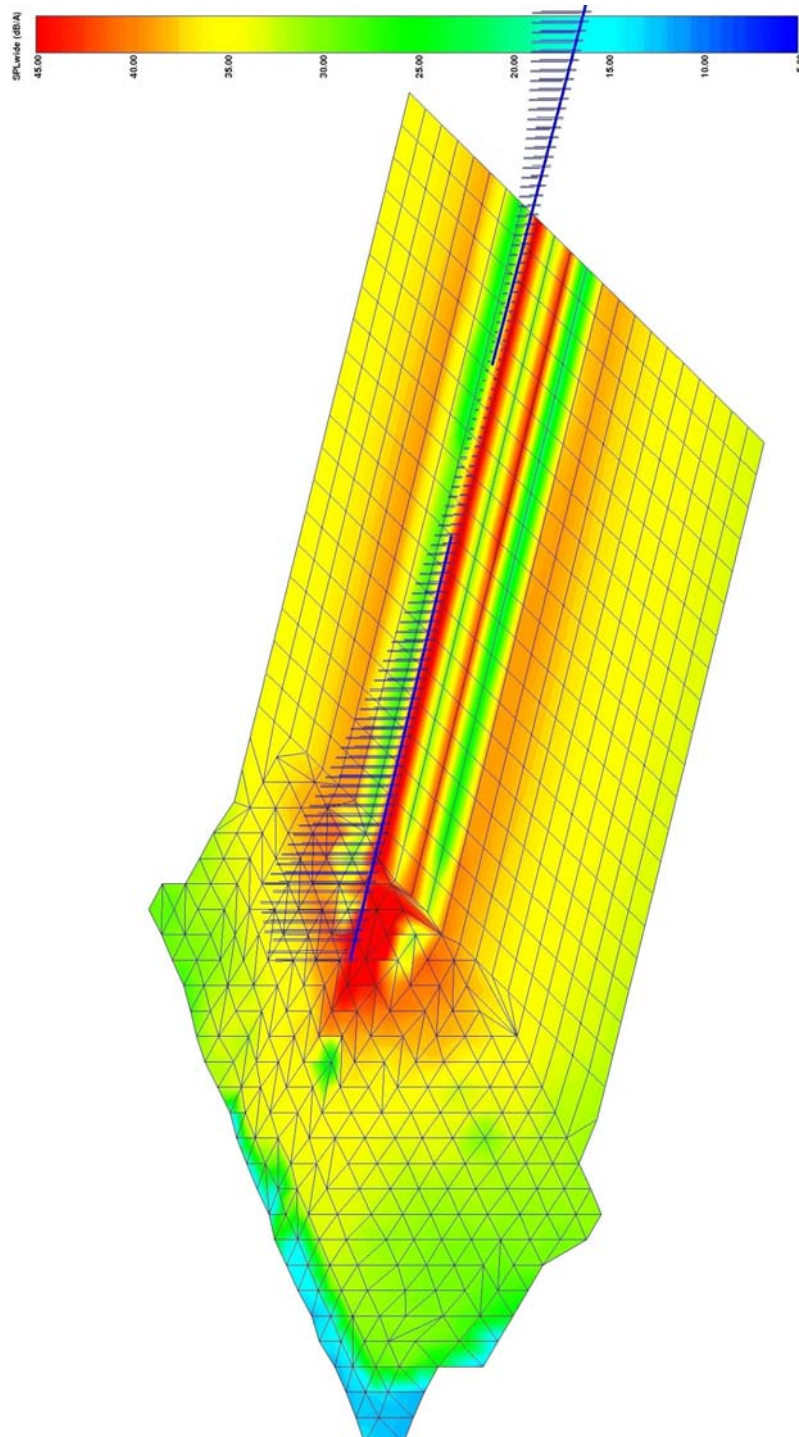


Figura 6.21 Risultati Calabria – vento ortogonale asse ponte



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

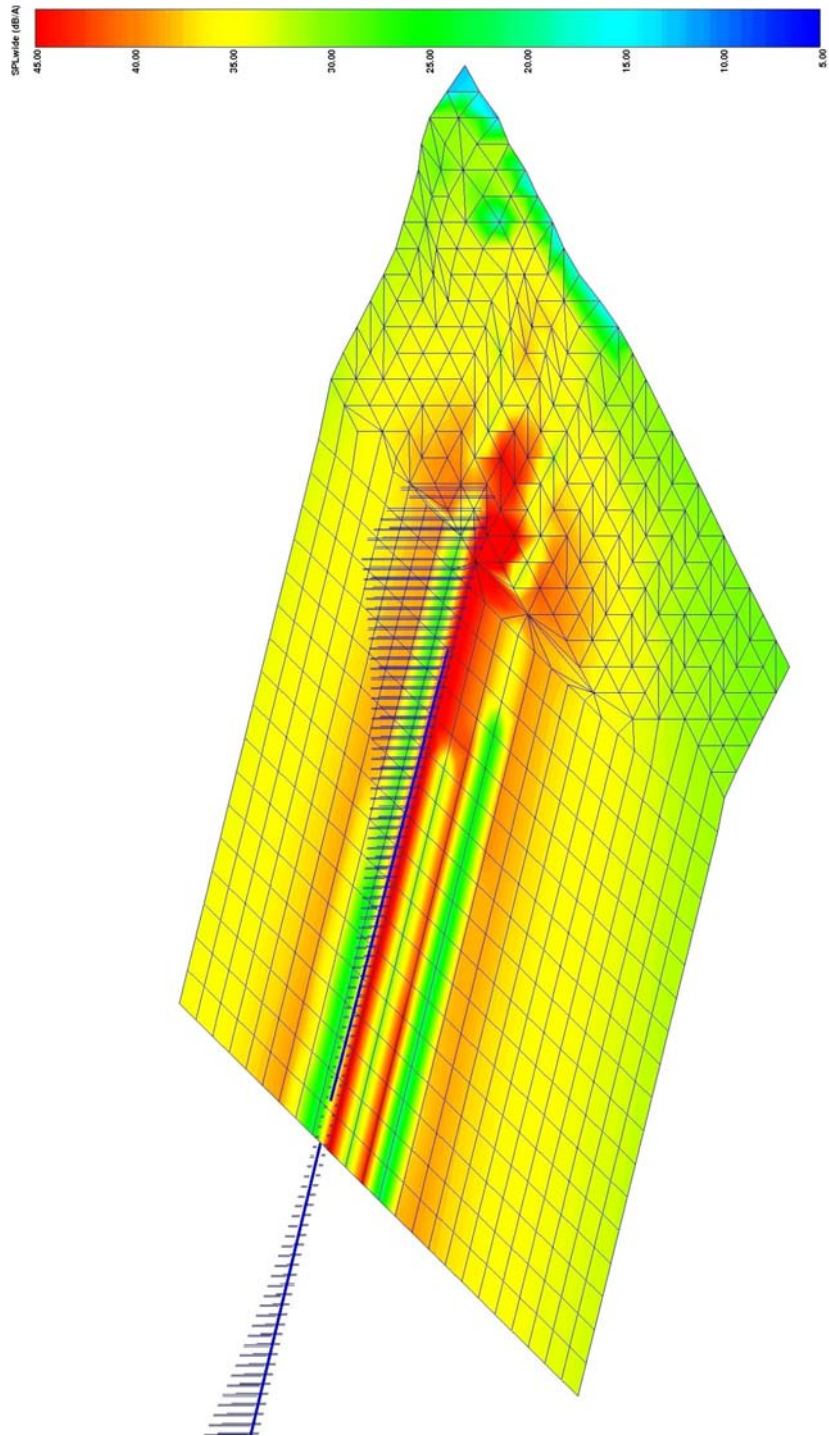


Figura 6.22 Risultati Sicilia – vento ortogonale asse ponte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

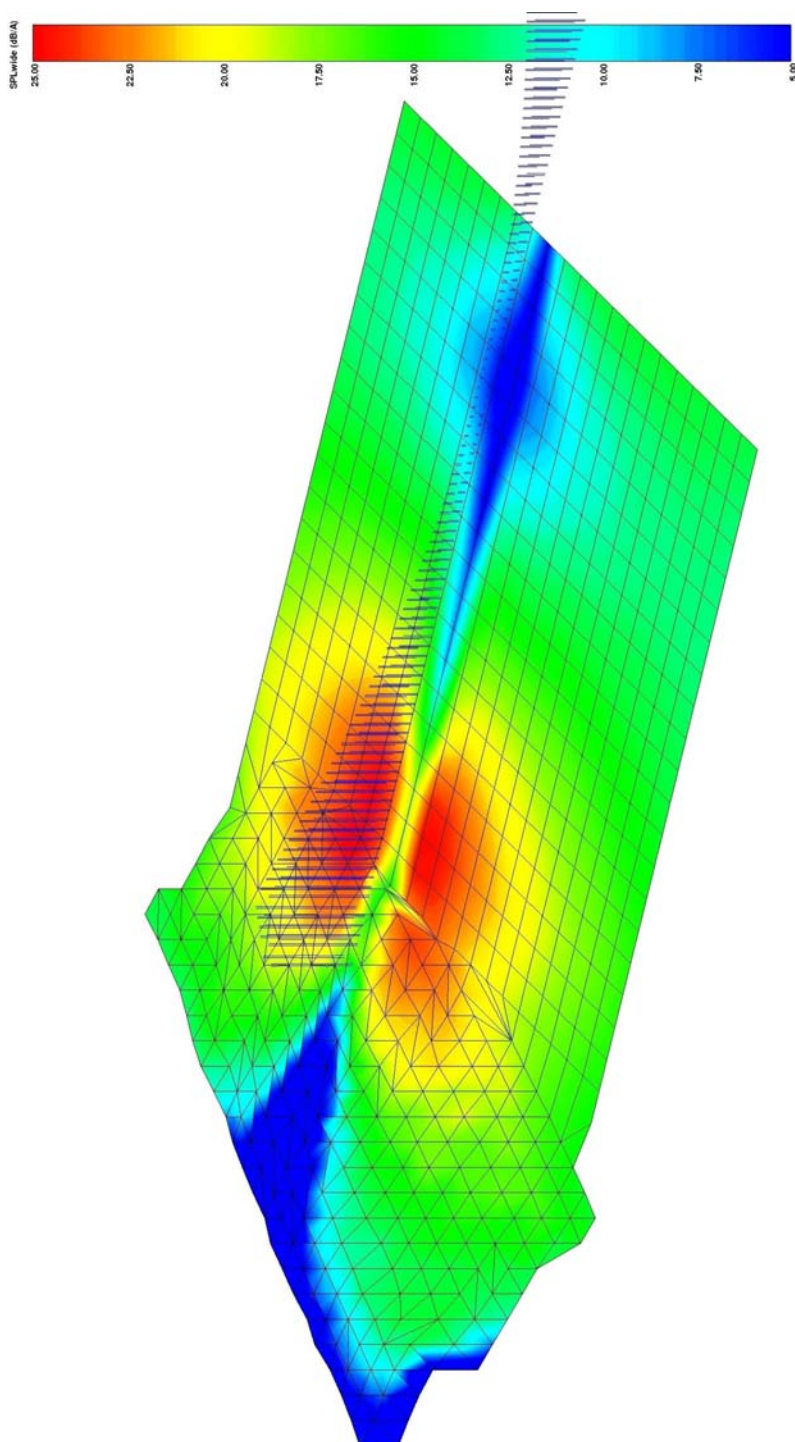


Figura 6.23 Risultati Calabria – vento parallelo asse ponte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

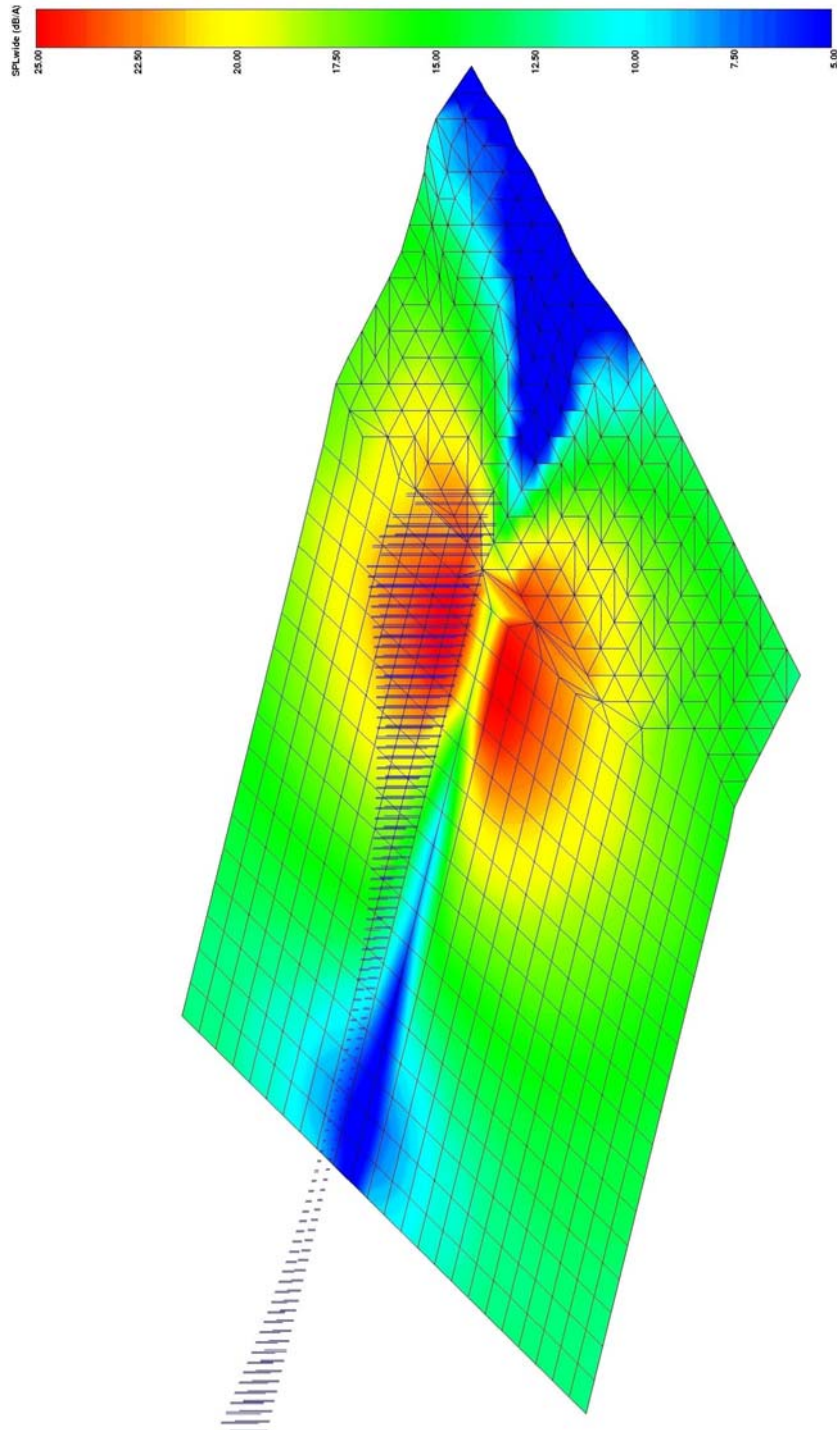


Figura 6.24 Risultati Sicilia – vento parallelo asse ponte



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 7 Soundscape

### 7.1 Introduzione

Questo capitolo ha lo scopo di correlare il visivo all’uditivo, al fine di ricondurre i risultati grafici ottenuti dalla matematizzazione del problema aeroacustico, livelli, spettri, mappe di rumore, ecc., alle sensazioni trasmesse dal sistema uditivo umano

I suoni generati dall’impatto del vento sugli elementi sottili strutturali e non strutturali del ponte, caratterizzati dal contenuto energetico e spettrale illustrato nel capitolo precedente, si inseriranno in un paesaggio sonoro o “soundscape” composto da suoni antropici e naturali distintivi del luogo e che verranno alterati dalla forza del vento. Mediante campionamenti audio in 8 punti significativi, localizzati nell’area di interazione aeroacustica del ponte, è stata acquisita e commentata la memoria sonora del luogo.

La descrizione delle “forme sonore” che potranno essere percepite nell’intorno del Ponte sullo Stretto di Messina ha come punto iniziale gli studi specialistici sul clima acustico ante operam e sull’impatto delle infrastrutture stradali e ferroviarie. Questi studi descrivono, in termini di indicatori sintetici in dBA, l’analisi di come la realtà ad oggi udibile verrà modificata dalle trasformazioni fisiche del territorio e dalle variazioni degli oggetti sonori primari da cui deriva la struttura del paesaggio sonoro dell’area, il traffico autoveicolare e il traffico ferroviario. La ricostruzione di questa prospettiva uditiva primaria in divenire, svolta per mezzo di calcoli acustici basati su modelli previsionali, permette di identificare spazi con differenti macro caratteristiche percettive.

La caratterizzazione del paesaggio sonoro attuale, focalizzata sulle aree che potranno essere interessate dai suoni determinati dall’interazione delle opere di attraversamento con il campo di vento, è importante per poter interpretare la riconoscibilità uditiva del segnale e gli effetti di sovrapposizione. I suoni presenti nel paesaggio sonoro si possono distinguere in:

- toniche;
- segnali,
- impronte sonore.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### 7.1.1 Tonica

In musica si intende la nota che identifica la chiave o la tonalità di una particolare composizione. E' in riferimento a questa nota che ogni altro momento della composizione acquista il proprio particolare significato. Le toniche non vengono necessariamente percepite in modo cosciente: esse sono sovrascoltate. Tali suoni, di origine naturale o antropica, diventano delle "abitudini" di ascolto.

Pur non venendo spesso percepita in modo cosciente, l'estensione e la persistenza delle toniche lasciano intravedere la possibilità d'una loro profonda e diffusa influenza sul nostro comportamento e sul nostro stato d'animo. Le toniche di una data località sono importanti perché ci aiutano a delineare il carattere degli uomini che vivono in essa.

La tonica di un paesaggio sonoro non urbanizzato è costituita dai suoni creati dalla sua geografia e dal suo clima: acqua, vento, foreste, pianure, uccelli, insetti, animali, ecc.

Molti di questi suoni possiedono un valore o un carattere archetipo che possono essersi impressi in modo così profondo nell'animo delle persone che li ascoltano, che una vita senza tali suoni potrebbe essere percepita come un evidente impoverimento.

### 7.1.2 Segnali

I segnali sono i suoni in primo piano, ascoltati consapevolmente. Qualunque suono può venire ascoltato consapevolmente e diventare, quindi, figura o segnale. All'interno di una dimensione collettiva o comunitaria, i "suoni segnale" che hanno funzione di avvertimento acustico e che devono essere ascoltati sono ad esempio campane, fischi, sirene, clacson, ecc. In prossimità di una linea ferroviaria i suoni segnali sono ad esempio rappresentati dal fischio del treno, la campana che avverte della imminente chiusura del passaggio a livello, ecc.

Un segnale è un suono carico di una significazione specifica e richiede spesso una risposta diretta (trillo telefonico, sirena, ecc.). Un simbolo, da parte sua, possiede delle connotazioni ancora più ricche. "Una parola o una immagine è simbolica quando sottintende qualcosa di più del suo significato ovvio e immediato" (C.G. Jung)

### 7.1.3 Impronta sonora

Il termine impronta sonora indica un suono comunitario che possiede caratteristiche di unicità oppure qualità tali da fargli attribuire da parte di una determinata comunità valore o considerazione particolare.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

#### 7.1.4 Suoni archetipi

Si definiscono suoni archetipi i suoni antichi e misteriosi, dotati spesso di un preciso simbolismo, che ci sono stati tramandati fin dalla antichità più remota o dalla preistoria. “Una parola o una immagine è simbolica quando sottintende qualcosa di più del suo significato ovvio e immediato” (C.G. Jung). Un fatto sonoro è simbolico quando suscita in noi emozioni o pensieri che vanno oltre la meccanicità delle sensazioni o la funzione di segnale che può esercitare, quando possiede un che di soprannaturale.

Un esempio tipico è rappresentato dal tuono, suono in grado di “toccare” gli uomini a causa delle vibrazioni prodotte dai suoni ad alto volume e bassa frequenza, in grado di aggirare gli ostacoli e di riempire uno spazio con una maggiore completezza. Altri esempi: il mare, il vento, i rintocchi delle campane...

## 7.2 Effetti sonori

I principali effetti sonori determinati dagli oggetti sonori contenuti nel bacino acustico di interesse sono classificabili in effetti di:

- effetti di ubiquità;
- effetti di delocalizzazione;
- effetti di anamnesi;
- effetti di anticipazione.

### 7.2.1 Ubiquità

L'effetto di ubiquità è una porta aperta verso la dimensione metafisica del sonoro, trattandosi di una condizioni spazio temporale di propagazione in cui si manifesta la difficoltà o l'impossibilità di localizzare una sorgente sonora. Nella variante più importante dell'effetto il suono sembra provenire da ogni luogo e da nessuno al tempo stesso. In altri casi sembra venire da una e da più sorgenti contemporaneamente.

Da dove viene il suono? L'etimologia risponde: ubique, ossia “dappertutto” o ancora “anche di là”, dunque non importa da dove e infine da nessuna parte. L'effetto di ubiquità è un effetto dipendente dallo spazio ed in ciò risiede senza dubbio il suo carattere fondamentale. La domanda e l'assenza di risposta possibile mettono perciò l'ascoltatore nella situazione di ricerca d'informazione.

Il contesto urbano e lo spazio architettonico offrono svariate occasioni all'emergere dell'effetto di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

ubiquità, che è legato a delle condizioni specifiche di propagazione che favoriscono la delocalizzazione delle emissioni sonore. La diversità formale dei volumi architettonici, la molteplicità degli schermi che mascherano o che riflettono i suoni, la trasmissione solida di numerosi rumori di impatto o delle vibrazioni, la mobilità differenziale di numerose fonti sonore, costituiscono altrettanti fattori favorevoli.

E' quindi necessario distinguere il ruolo della configurazione spaziale da quello della posizione dell'ascoltatore in questo spazio.

Dal punto di vista della configurazione l'effetto di ubiquità è legato alle condizioni di riverberazione del luogo: schematicamente si può ammettere che quanto più un luogo è riverberante, tanto più l'effetto ha la sua possibilità di apparire nella misura in cui è crescente l'importanza relativa dei suoni riflessi in rapporto a quelli diretti.

Dal punto di vista della posizione dell'ascoltatore si possono distinguere, sia in un contesto naturale che urbano, due situazioni principali: quando l'ascoltatore è immerso in un ambiente sonoro ubiquitario e l'effetto è legato alla molteplicità, reale o fittizia, delle sorgenti che lo circondano, egli non sa da che parte girarsi, l'effetto sarà tanto più forte quanto più l'uditore si trova prossimo a dei punti di convergenza tra suoni diretti e riflessi: fuochi o centri geometrici di tutte le forme di spazi concavi. Quando l'ascoltatore si trova in posizione esterna rispetto a tale ambiente sonoro, e l'effetto è allora legato alla distanza e alle modifiche che essa impone ai tempi di propagazione del suono nell'aria, l'aumento della durata di propagazione è accompagnato da uno spostamento verso le basse frequenze dello spettro a causa del maggior assorbimento delle frequenze acute, da cui deriva la localizzabilità di una sorgente sonora. I suoni bassi sono pertanto più obiquitanti di quelli acuti.

In termini psicologici e di fisiologia della percezione l'effetto di ubiquità appare quando le condizioni di percezione sono tali che il ricettore si trova nell'incapacità di rendersi conto esattamente dell'oggetto sonoro. Ciò può determinarsi a causa di alterazioni delle condizioni sinestetiche abituali, per esempio quando la possibilità di interpretazione polisensoriale sono sopresse, cosa che succede quando il rapporto tra la percezione sonora e gli altri sensi diventa ambigua o non abituale. Lo stesso avviene quando le condizioni spazio temporali dell'ascolto mettono l'uditore in una situazione paradossale: ad esempio più la sorgente è vicina e meno è localizzabile.

Sul piano psicomotorio l'effetto di ubiquità può avere diverse conseguenze. In generale implica il disagio o l'inquietudine di chi lo percepisce, senza il quale il soggetto non si interrogherebbe sulla provenienza del suono. Questa inquietudine può andare dal semplice malessere al panico più incontrollabile, passando attraverso il desiderio di fuga. Cercare in tutti i modi di sapere la



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

provenienza di un suono ed essere impotenti di fronte all'assenza di una possibile risposta induce ad attribuire al suono un'intenzionalità funesta e volontariamente diretta contro se' stessi. Possono emergere comportamenti diversi: la sottomissione, la paura o l'essere affascinato; al contrario può portare il soggetto a non cercare di sapere da dove venga il rumore che lo inquieta.

In certe situazioni il soggetto può essere indotto a godere dell'effetto di ubiquità e tale godimento può andare dal semplice senso di riposo o dal sentimento di appagamento che può suscitare l'ambiente circostante naturale o umano, alla liberazione da un'inibizione e alla catarsi in cui l'ubiquità sonora può essere considerata come una specie di droga.

Tra gli oggetti sonori presenti nell'ambiente sonora dello Stretto di Messina quelli che possono attivare fenomeni di ubiquità sono i suoni determinati dal traffico stradale, in particolare se le pavimentazioni stradali sono di tipo fonoassorbente.

### 7.2.2 Delocalizzazione

L'effetto di delocalizzazione implica il riconoscimento di un errore nella localizzazione della sorgente sonora: sappiamo con precisione da dove sembra provenire il suono, ben sapendo che si tratta di una illusione. Questo effetto sonoro sarà una delle caratteristiche tipiche delle emissioni aeroacustiche del ponte sullo Stretto di Messina.

### 7.2.3 Anamnesi

Con "anamnesi" si intende l'effetto di reminescenza che un segnale o un contesto sonoro può provocare in chi ascolta il ritorno alla coscienza di una situazione o di una atmosfera passata. In termini sensoriali l'effetto di anamnesi è caratterizzato da uno scatto, il più delle volte involontario, della memoria uditiva e del potere evocativo dei suoni.

L'effetto di anamnesi si manifesta in momenti assai diversi che non cambiano la sua natura profonda: si può ben individuare in un momento della vita, quando un motivo evoca improvvisamente un ricordo d'infanzia, quanto nel richiamo di un passato più recente ad esempio in una sequenza di un film che giocherà sull'evocazione sonora di una situazione precedentemente esposta. Tuttavia, più il riferimento è lontano e inatteso, più l'emozione può sopraffare l'uditore. Il suono stesso non interviene con la sua natura fisica, né in quanto sensazione: è l'uditore che gli conferisce un significato, un valore di anamnesi.

L'effetto di anamnesi coinvolge il suono, la percezione e la memoria. Mette in gioco il tempo, ricollegando delle immagini mentali passate alla coscienza presente, senz'altro scopo che il libero

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

gioco delle associazioni.

In termini acustici l'effetto di anamnesi è fortemente correlato al timbro del segnale, che può giocare un ruolo fortemente induttore in quanto il colore sonoro influisce sul campo delle emozioni. Tra gli oggetti sonori presenti nel paesaggio sonoro delle aree di attestamento del Ponte sullo Stretto di Messina quelli che possono attivare fenomeni di anamnesi sono relativi ai suoni dei treni e dei traghetti dal lato di Villa San Giovanni.

#### **7.2.4 Anticipazione**

Nell'attesa di una situazione sonora che deve arrivare, una persona può "pre-udire", vale a dire crede di sentire effettivamente il segnale atteso anche se non è ancora stato emesso alcun suono. Questo effetto si osserva tanto nelle situazioni di attesa di suoni conosciuti dove il più piccolo fruscio diventa indizio, quanto in circostanze familiari in cui l'uditore anticipa un contesto sonoro prevedibile (prendibile) nella memoria.

Come l'anamnesi è nella maggioranza dei casi un fenomeno involontario, così l'effetto di anticipazione può essere provocato da un eccesso di intenzionalità. Sia perché lo si teme, sia perché si è impazienti che si manifesti, l'avvenimento sonoro dà l'impressione di essere percepito senza che lo stimolo sia reale. Tipici fenomeni di anticipazione possono verificarsi nell'attesa dell'arrivo di un treno.

### **7.3 Caratteristiche abiotiche del paesaggio sonoro locale**

#### **7.3.1 Il mare**

La tonica di tutte le civiltà marinare è costituita dal mare, che è anche un fertile archetipo sonoro. Il rumore del mare è simile al rumore bianco del laboratorio. Non esistono due onde simili, e anche la stessa onda, riascoltata più volte di seguito con un registratore, continuerà a svelare nuovi segreti all'immaginazione di ogni ascoltatore.

Di tutti i suoni quello dell'acqua, l'elemento da cui ha avuto origine la vita, possiede la simbologia più splendida: pulizia, purificazione, riposo, rinnovamento ..... Il mare è sempre stato nella letteratura, nei miti, nell'arte, uno dei simboli originari dell'uomo. Per la sua presenza incessante è simbolo di eternità; per le sue maree, per il flusso e riflusso delle onde è il simbolo del cambiamento.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

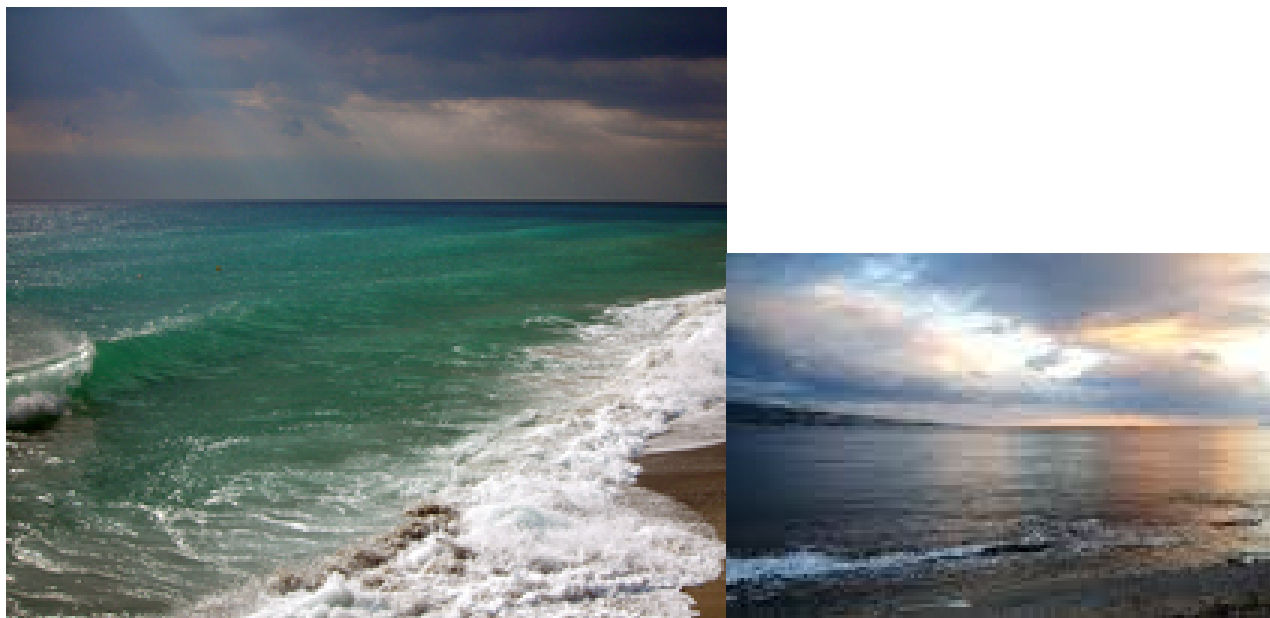


Figura 7.1

Quando il mare è in collera la sua energia si staglia in ugual modo lungo l'intero spettro dell'udibile, è il rumore bianco, è tutte le frequenze. Lo spettro sembra cambiare di continuo: in un momento predominano le vibrazioni gravi, in un altro acuti effetti sibilanti; nessun suono è però mai completamente assente e l'unico cambiamento consiste nel variare della loro intensità relativa.

### 7.3.2 Il vento

Il vento, come il mare, possiede un numero infinito di variazioni vocali. Entrambi producono un suono a banda larga e, nel vasto ventaglio delle loro frequenze, ci sembra di riuscire a percepire altri suoni ancora. I venti corrono, volano, piombano, cessano, ricominciano, si librano in alto, sibilano, muggiano, urlano, ridono. Il vento cattura con forza l'orecchio. La sua sensazione è insieme tattile e acustica.

Le aree rurali coltivate, le praterie prive di alberi, sono delle immense arpe eoliche che vibrano incessantemente in presenza di vento. Nelle aree in cui è presente vegetazione arborea, il vento fa vibrare le foglie secondo tonalità differenti: per gli abitanti del bosco quasi ogni specie di albero possiede, accanto al proprio aspetto, la propria voce.

L'emissione di suoni ad opera del vento riguarda tanto l'ambiente naturale quanto l'ambiente antropico. In entrambi i casi il fenomeno di generazione è determinato dal distacco di vortici ad una frequenza caratteristica, dipendente dalla velocità del vento incidente, dal diametro del corpo investito dal campo di vento e dalla eventuale generazione di vibrazioni.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Esempi di toni eolici naturali sono i suoni determinati dal vento sui rami degli alberi. TONI EOLICI DI ORIGINE ANTROPICA POSSONO VICEVERSA ESSERE SOGGETTIVAMENTE RILEVATI IN PROSSIMITÀ DI CAVI SOSPESI, IN AREE PORTUALI AD OPERA DEGLI ALBERI DELLE IMBARCAZIONI A VELA, DELLE IMBRAGATURE, DEI TIRANTI, ECC. QUESTI SUONI UDIBILI DIVENTANO DEGLI ELEMENTI DI NATURA STORICO-CULTURALE, CARATTERISTICI DEL PAESAGGIO SONORO DELL'AMBIENTE IN CUI SONO PRESENTI E TALVOLTA SEGNI EVOCATIVI DI MANIFESTAZIONI CLIMATICHE ESTREME.



Figura 7.2

I suoni determinati dal vento, sia in conseguenza della variabilità al variare della persistenza e dell'intensità del fenomeno anemologico, e quindi della non prevedibilità, sia del campo di frequenze interessate nello spettro dell'udibile, ricco di suoni a bassa frequenza, hanno un contenuto musicale e pertanto risultano più ascoltabili. Le reazioni di natura psicofisica sull'individuo non generano ciò che comunemente viene definito rumore e avvertito soggettivamente come fastidio o "annojanace".

#### 7.4 "Sound flag" aree di studio

La caratterizzazione uditiva del paesaggio sonoro è stata svolta in 4 punti lato Calabria e n. 4 lato

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

Sicilia, entro una distanza massima di 1 km dall'opera di attraversamento, selezionati in base ai risultati preliminari delle stime di impatto aeroacustico.

In corrispondenza di tali punti sono stati acquisiti dei campioni audio in qualità audio CD in periodo diurno, pomeridiano e notturno. La presenza di lavori destinati allo spostamento della linea ferroviaria in località Cannitello ha obbligato a svolgere questa attività in giorni prefestivi e festivi 23 e 24 ottobre 2010, A Ganzirri le misure sono state svolte il 25-26 ottobre.

La strumentazione impiegata consiste in un dat Sony modello PCM-D50 dotato di cuffia antivento, cavalletto, cavo di azionamento a distanza e treppiede. In alcuni casi le misure audio sono state affiancate da misure real time fonometriche con lo scopo di poter fornire gli indicatori di rumore a cui l'acustica ambientale tradizionalmente si riferisce e documentare il decorso temporale dello spettro in frequenza tra 20 Hz e 20 kHz, le statistiche dei short Leq e il livello equivalente sul periodo di 10'.



Figura 7.3

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

#### 7.4.1 Versante Calabria (Cannitello)

La Figura 7.4 riporta la localizzazione dei quattro punti di campionamento audio:

- Punto C-A: Lungomare Fata Morgana
- Punto C-B: Piazza Boccaccio/Lungomare Fata Morgana 15
- Punto C-C: Traversa Porto Salvo n. 28
- Punto C-D: Piazza Santa Filomena 6

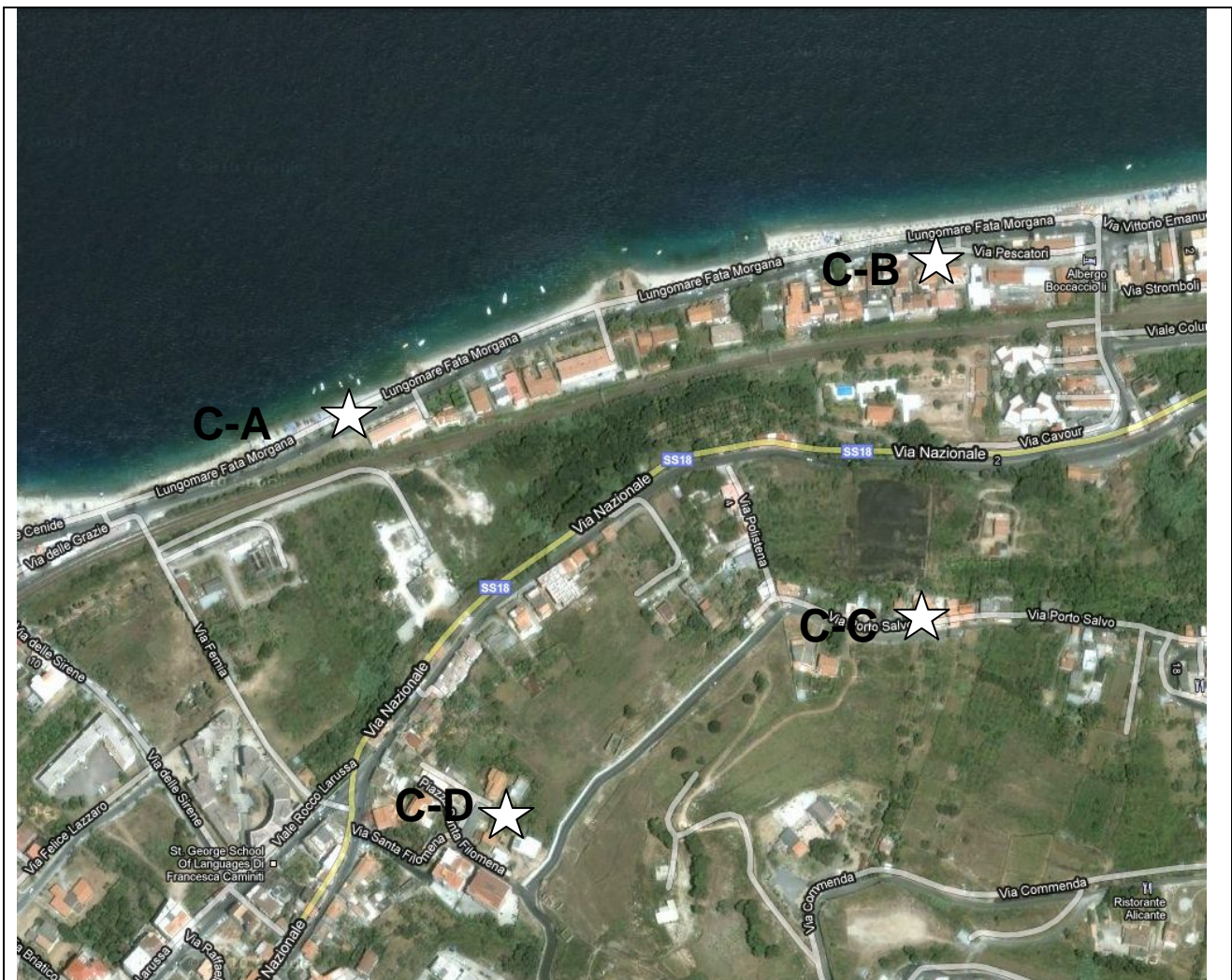


Figura 7.4

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## PUNTO C-A – Waterfront Fata Morgana

E' localizzato in Lungomare Fata Morgana tra la Chiesa di Madonna delle Grazie in Piazza Monsignor Ferro e le prime case della frazione Cannitello, un luogo di transito pedonale affacciato sul tratto di costa attrezzato per la pesca. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino, pomeridiano e pre-serale (7:30-8:00, 17:30-18:00, 20:30-21:00) in presenza di vento da sud, talvolta con velocità dell'ordine di 5-6 m/s. Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici (avifauna) localizzati lungo l'alberata della passeggiata pedonale e nelle aree verdi retrostanti, con rinforzi all'alba e al tramonto. Cani lontani dal punto di ascolto.
- Suoni abiotici delle foglie delle piante che costeggiano la passeggiata, in particolare in caso di rinforzo del vento.
- Sciabordio delle onde del mare, con direzione delle onda trasversale alla linea di costa e frequenza ritmica ravvicinata (frequenza 14-16 onde/minuto), mascherato al passaggio delle auto sulla sede stradale. Il passaggio delle grandi navi determina alterazioni del moto ondosso che si ripercuotono, sfasate nel tempo, sul litorale.
- Suoni delle campane delle chiese sul lungomare (Madonna delle Grazie e Maria SS di Portosalvo).
- Attività ludico sportiva (jogging, passeggiate, ciclismo...) sulla passeggiata pedonale del lungomare.
- Automobili e moto in transito sul Lungomare Fata Morgana: traffico discontinuo, con intensificazioni orarie nei periodo di massima affluenza turistica (circa 500 auto/ora), velocità di transito generalmente moderata. Rinforzi nelle ore di punta con abbassamento della velocità media. Presenza di tombini rumorosi sulla sede stradale con occasionali emissioni impulsive.
- Convogli ferroviari passeggeri e merci in transito sulla linea storica Salerno-Reggio Calabria, con tempi di esposizione lunghi e intensità percepita rilevante.
- Navi in attraversamento dello Stretto: non si avverte generalmente il rumore a bassa frequenza dei grandi motori diesel che, solo raramente, assume caratteristiche pulsanti.
- Barche sullo stretto in navigazione sotto costa: i motori delle barche più piccole sono rumorosi

Soundmark: montante dello stretto al plenilunio e novilunio (testimonianza uditiva locale),

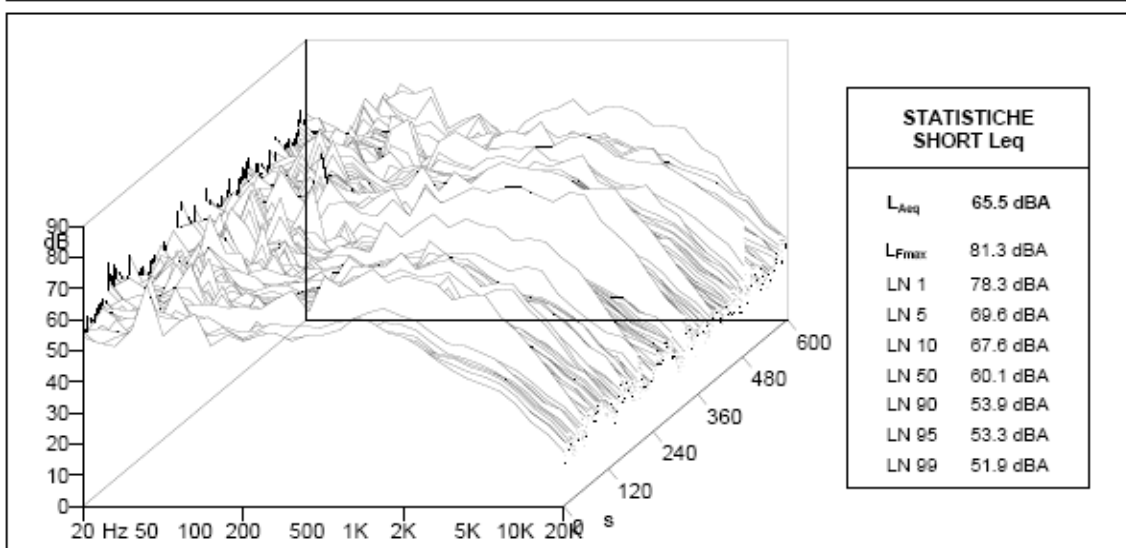
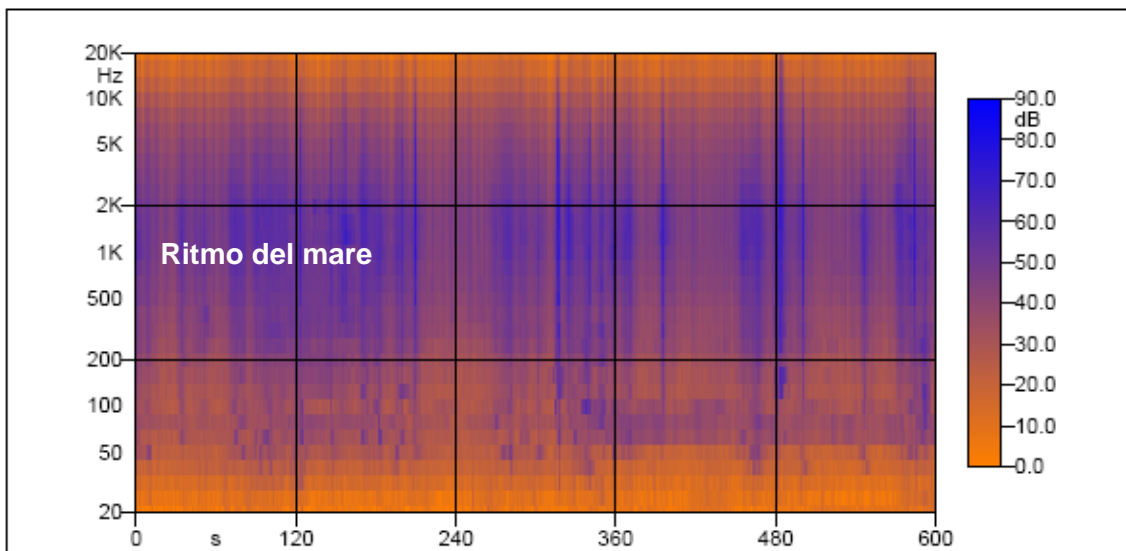


Figura 7.5



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## PUNTO C-B – Waterfront Fata Morgana 15

Piazza Boccaccio/Lungomare Fata Morgana 15, in corrispondenza delle panchine della piazzetta, sotto gli alberi, in prossimità della Chiesa Maria S.S. di Portosalvo. Un luogo di transito pedonale affacciato sul tratto di costa attrezzato per la balneazione. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino, pomeridiano e pre-serale (7:30-8:00, 17:30-18:00, 20:30-21:00). Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici intensi (cori) all'alba e al tramonto a causa dei comportamenti sociali dell'avifauna (passeri) che colonizza i tigli della piazzetta. Il saluto al sole mattutino e serale è molto intenso e sentito. Ciò determina una "onda sonora" biotica con centro tonale collocato tra 2-5 kHz.
- Suoni abiotici delle foglie delle piante che costeggiano la passeggiata, in particolare in caso di rinforzo del vento.
- Sciabordio delle onde del mare, udibile in particolare nelle prime ore del mattino e in condizioni di traffico rarefatto.
- Suoni registrati di campane diffusi dal campanile della Chiesa Maria SS di Portosalvo con tempi di attivazione prestabiliti e sempre gli stessi (ore 7:00, ore 12:00, ore 20:00)
- Automobili e moto in transito sul Lungomare Fata Morgana: traffico discontinuo, con intensificazioni orarie nei periodo di massima affluenza turistica.
- Convogli ferroviari passeggeri e merci in transito sulla linea storica Salerno-Reggio Calabria, con tempi di esposizione lunghi e intensità percepita rilevante.
- Navi in attraversamento dello Stretto: non si avverte generalmente il rumore dei grandi motori diesel.
- Barche sullo stretto in navigazione sotto costa: i motori delle barche più piccole sono rumorosi.
- Attività di pesca sulla spiaggia pubblica, intensa nelle prime ore della mattina e caratterizzata dal sibilo prodotto dal lancio delle sagole.
- Attività ludico sportiva (jogging, passeggiate, ciclismo...) sulla passeggiata pedonale del lungomare

Soundmark: onda sonora biotica, campane rituali (suoni del tempo)

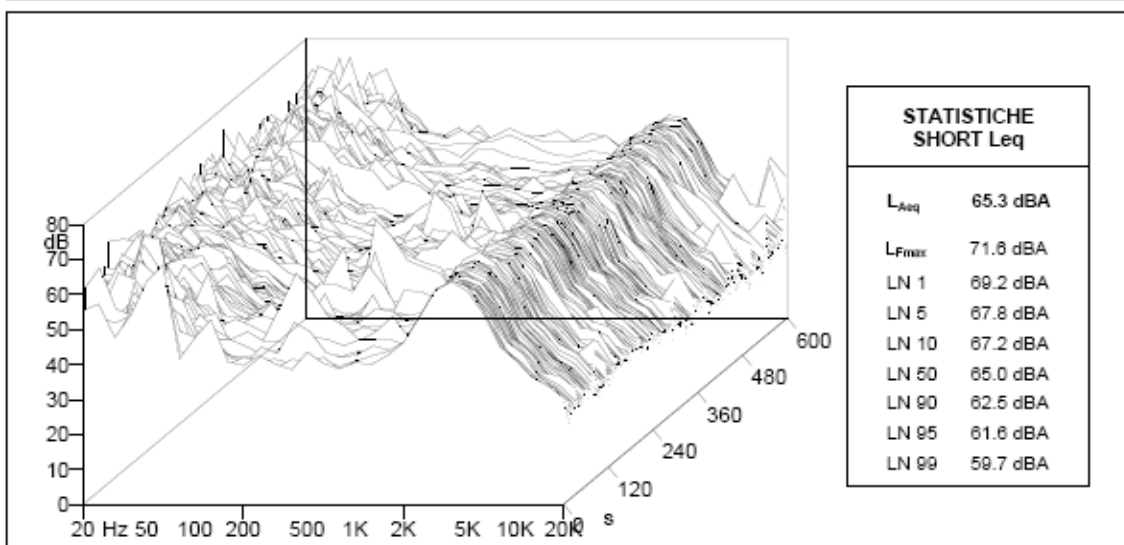
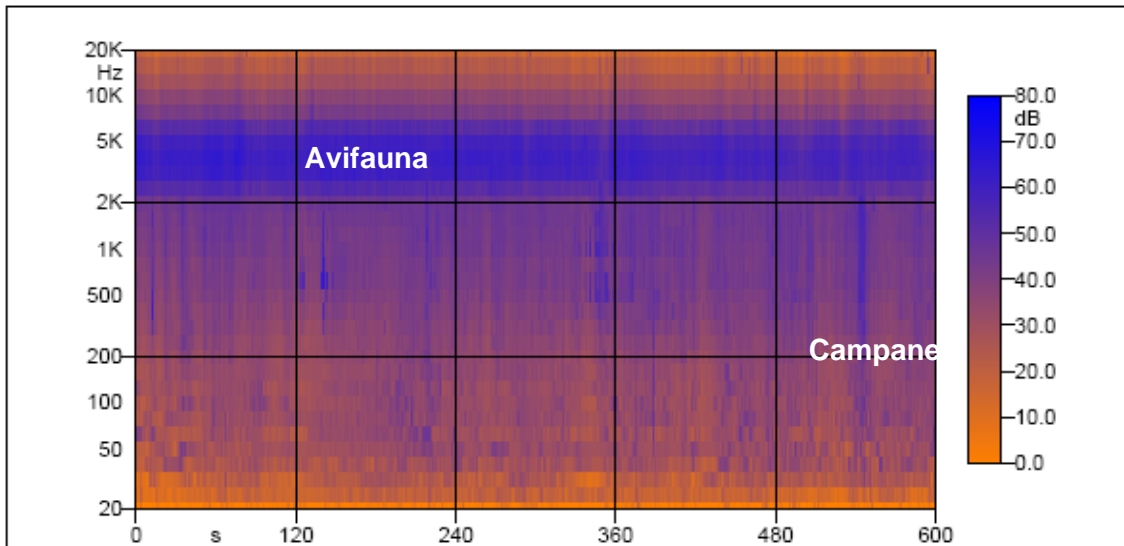


Figura 7.6

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### **PUNTO C-C – Via Portosalvo 20-30**

Area periurbana Villa San Giovanni, Traversa Porto Salvo in prossimità edifici residenziali prospicienti viabilità locale. Il punto di ascolto è in posizione dominante rispetto al lungomare di Cannitello e riceve i suoni/segnali provenienti da monte (Autostrada A3) e da valle (Ferrovia SR-RC, SS, ...).

Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Rumore di fondo Autostrada A3, ubiquo e persistente, con riconoscibilità dei singoli transiti (in particolare dei mezzi pesanti) nelle fasi in cui il traffico è più discontinuo e in periodo notturno,
- Automobili e motociclette in transito sulla viabilità locale a bassa velocità, flussi discontinui (50-60 veicoli/ora negli intervalli di massimo traffico), con tombini rumorosi se intercettati dagli pneumatici.
- Convogli ferroviari passeggeri e merci in transito sulla linea storica Salerno-Reggio Calabria, con tempi di esposizione lunghi e intensità percepita rilevante.
- Transito navi sulle acque dello Stretto, quasi impercettibili
- Suoni abiotici determinati dall’impatto del vento sul fogliame, in particolare in presenza di raffiche di vento
- Avifauna, dispersa nelle aree naturali prossime alla zona abitata
- Cani lontani

Non si rilevano soundmark caratterizzanti o suoni comunitari.

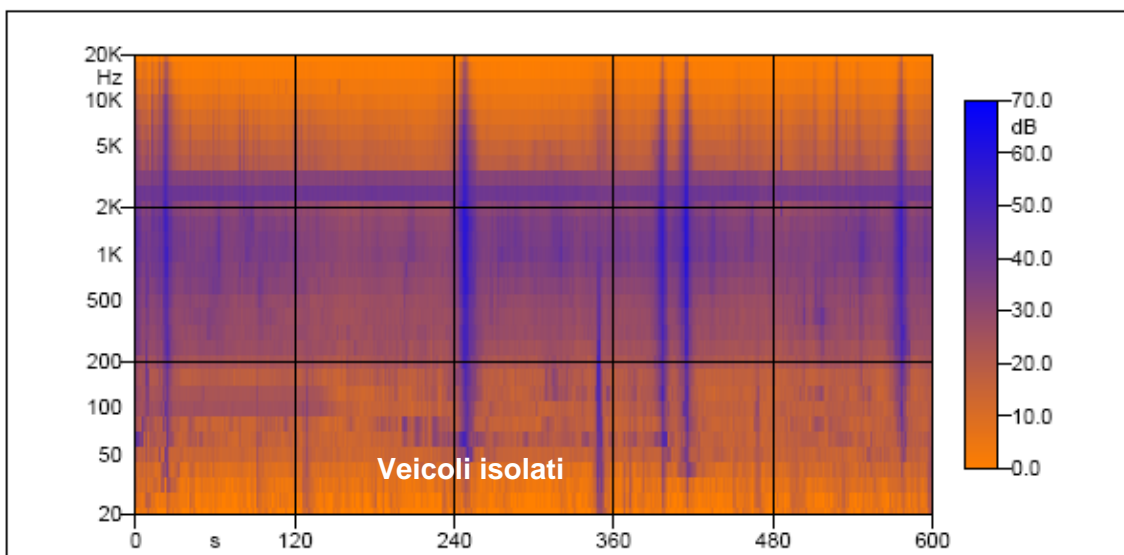
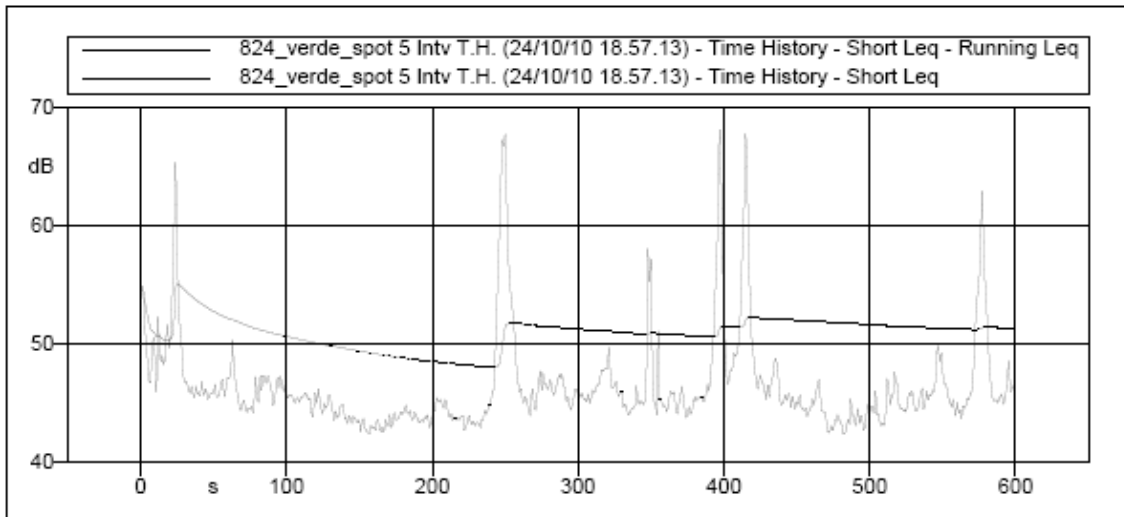


Figura 7.7

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
<b>RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI          ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO</b>		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## PUNTO C-D – Piazza Santa Filomena 6

Area periurbana residenziale in area collinare, in posizione dominante rispetto al lungomare di Cannitello e al tratto di costa che converge sugli imbarchi dei traghetti. Prevale un noise urbano disordinato e casuale in cui i segnali di origine ferroviaria si sovrappongono ai transiti di veicoli sulla viabilità che corre parallelamente alla costa e al fondo autostradale proveniente da monte.

Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Rumore di fondo Autostrada A3, ubiquo e persistente, con riconoscibilità dei singoli transiti (in particolare dei mezzi pesanti) nelle fasi in cui il traffico è più discontinuo e in periodo notturno,
- Rumore stradale della SS18 Via Nazionale di cui sono riconoscibili i singoli transiti e gli avvisatori acustici.
- Automobili e motociclette in transito sulla viabilità locale a bassa velocità, flussi discontinui (50-60 veicoli/ora negli intervalli di massimo traffico), con griglie rumorose al passaggio degli pneumatici.
- Convogli ferroviari passeggeri e merci in transito sulla linea storica Salerno-Reggio Calabria, con tempi di esposizione lunghi e basse intensità.
- Rumore di fondo portuale (navi e traghetti) per venti da sud (scirocco)
- Avifauna, dispersa nelle aree naturali prossime alla zona abitata.
- Suoni abiotici determinati dall'impatto del vento sul canneto e sulla vegetazione, in particolare in presenza di raffiche di vento.
- Cani lontani dal punto di misura, a sottolineare il controllo del territorio e della proprietà.

Non si rilevano soundmark caratterizzanti o suoni comunitari.

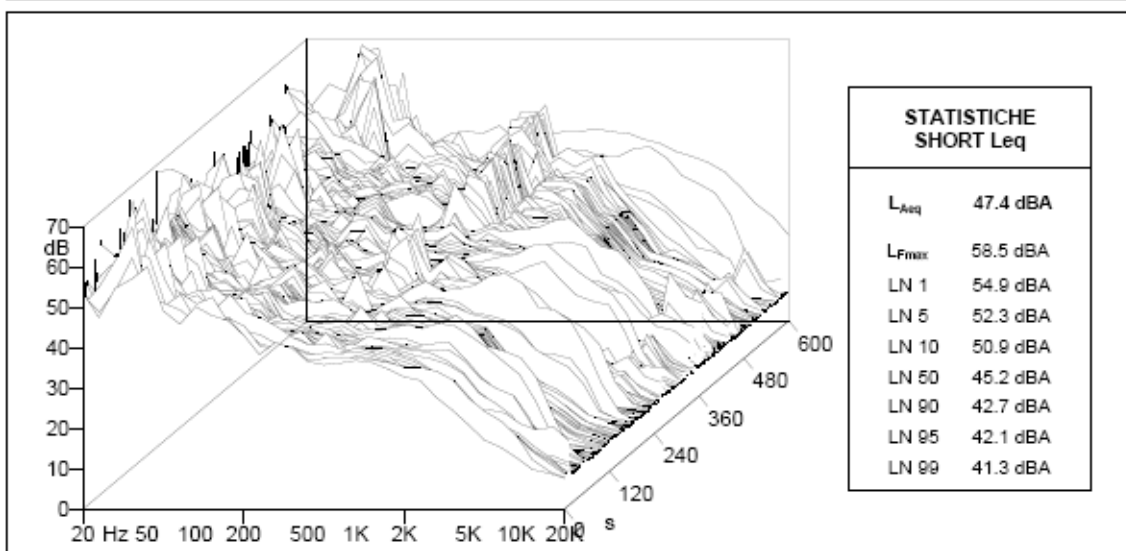
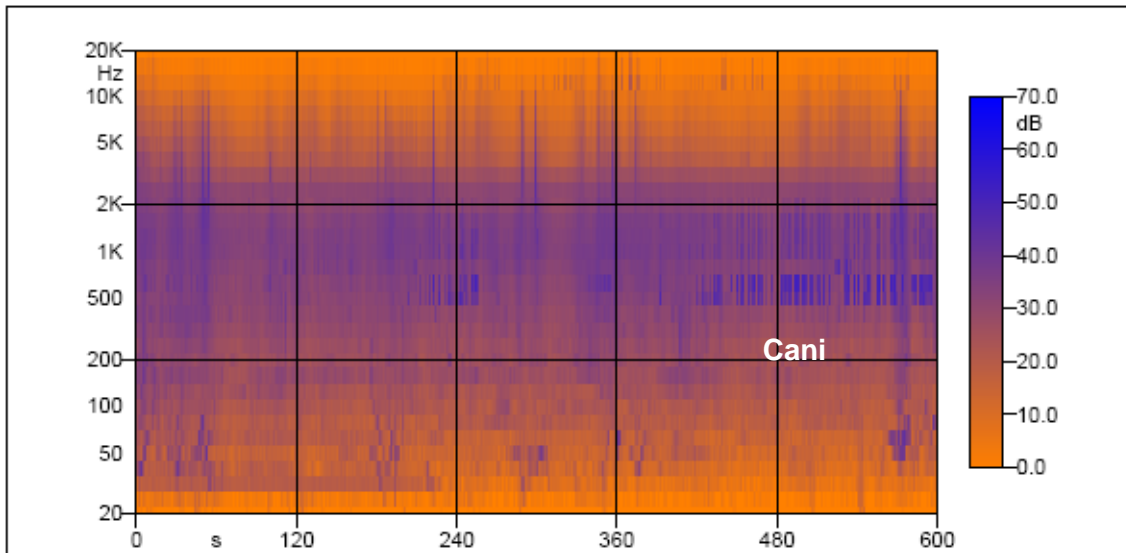


Figura 7.8

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

#### 7.4.2 Versante Sicilia (Ganzirri)

La Figura 7.9 riporta la localizzazione dei quattro punti di campionamento audio:

- Punto S-A - Waterfront Ganzirri, Via Palazzo 22-24
- Punto S-B: Waterfront Ganzirri - Via Lungomare n. 125
- Punto S-C: Ponticello canale Pantano Grande
- Punto S-D: Hotel Capo Peloro Via Circuito Torre Faro

I punti S-A e S-B sono sul fronte mare, a Est e a Ovest rispetto all'opera di attraversamento. I punti S-C e S-D sono inseriti nell'urbanizzazione di Ganzirri in posizione retrostante in direzione di Pantano Grande e Pantano Piccolo.

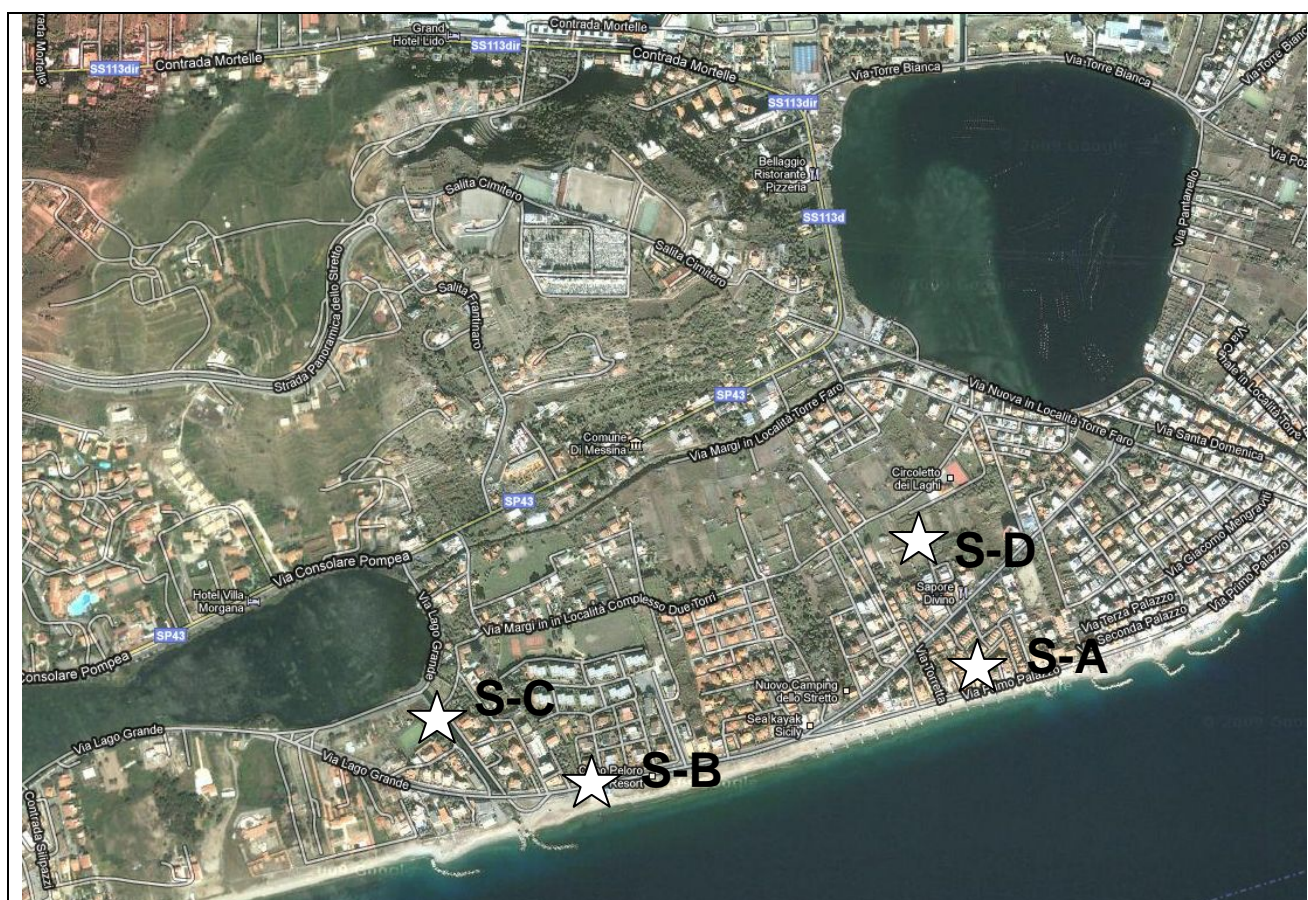


Figura 7.9

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### **Punto S-A Waterfront Ganzirri, Via Palazzo 22-24**

E' localizzato sul fronte mare di Ganzirri davanti all'edificazione residenziale che si affaccia sulla spiaggia, non balneabile, sulla quale sono collocati dei blocchi frangiflutti. E' un tratto di mare utilizzato dai pescatori, non di sosta ma di transito da parte dei pedoni. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino, pomeridiano e notturno (8:00-9:00, 17:00-17:30, 23:00-24:00) in presenza di vento da sud, talvolta con raffiche. Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici (avifauna) episodici localizzati nei giardini delle case affacciate sul lungomare.
- Sciabordio delle onde del mare, con direzione dell'onda trasversale alla linea di costa e frequenza ritmica di 7-9/10 onde/minuto con vento da est-sud/est), solo parzialmente mascherato al passaggio delle auto sulla sede stradale. Il passaggio delle grandi navi determina alterazioni del moto ondoso che si ripercuotono, sfasate nel tempo, sul litorale. In periodo notturno rappresenta l'unica emissione sonora.
- Attività ludico sportiva (jogging, ciclismo, passeggiate, ..) sul bordo strada, voci e calpestio delle persone in transito.
- Automobili e moto in transito sul Lungomare: traffico discontinuo dell'ordine di 80-90 transiti all'ora, con intensificazioni negli intervalli orari correlati ai ritmi lavorativi, velocità di transito generalmente moderata. Pavimentazione in asfalto liscio priva di discontinuità rilevanti per le emissioni di rumore.
- Navi in attraversamento dello Stretto: non si avverte generalmente il rumore a bassa frequenza dei grandi motori diesel che, solo raramente, assume caratteristiche pulsanti. Poche le imbarcazioni di pescatori in navigazione sotto costa.

Non si rilevano soundmark caratterizzanti o suoni comunitari.



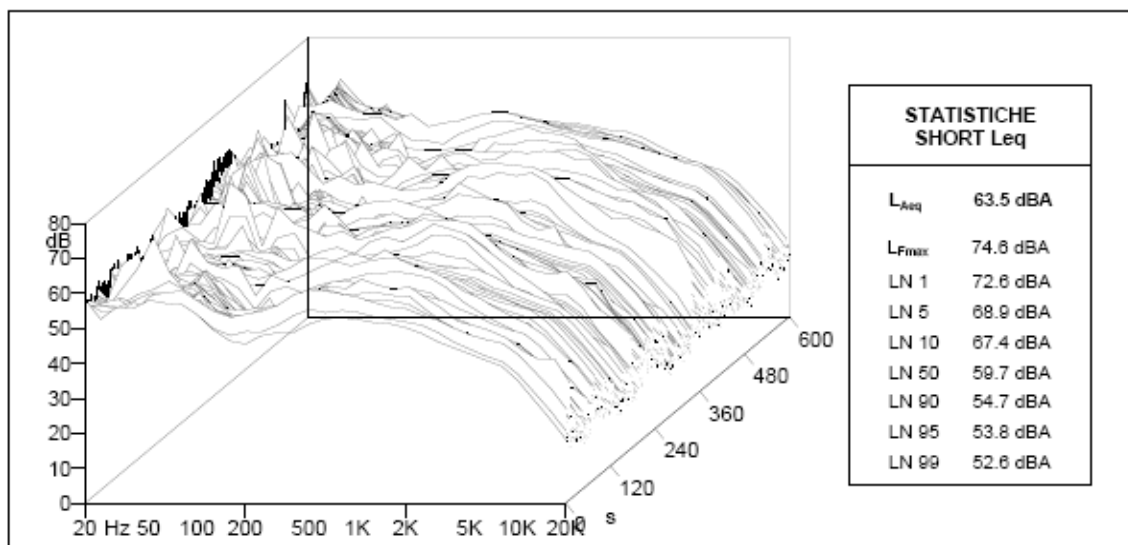
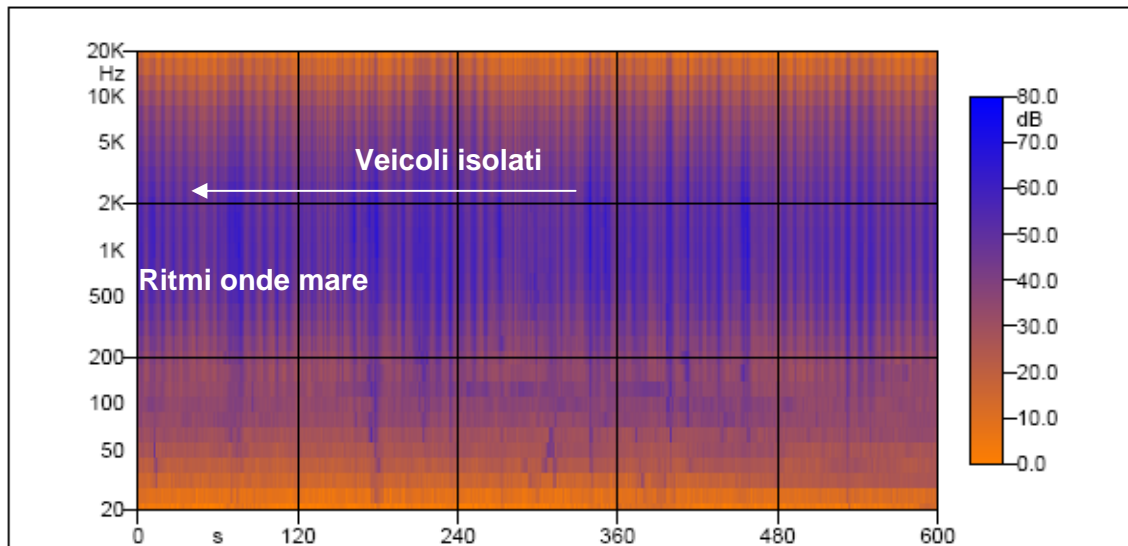
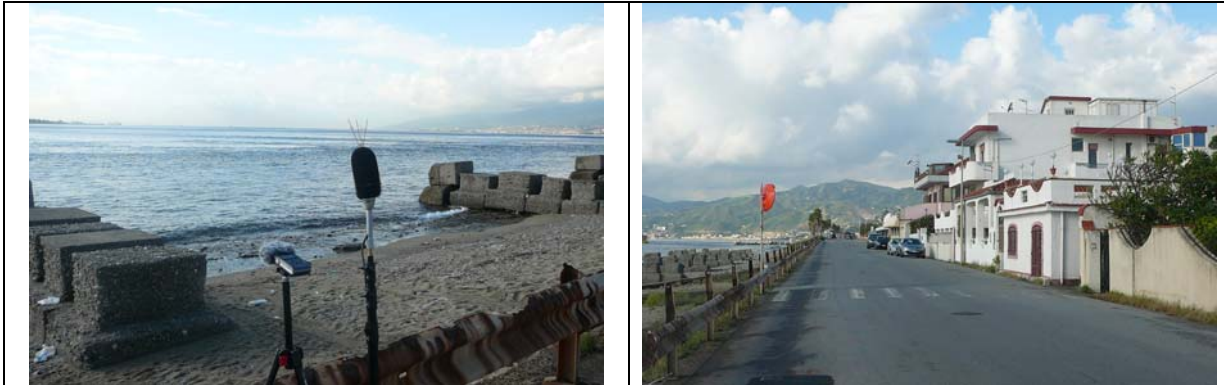


Figura 7.10

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### **Punto S-B – Waterfront Ganzirri - Via Lungomare n. 125**

E' localizzato sul fronte mare di Ganzirri davanti all'area residenziale turistica che si affaccia su un piazzale adiacente al ristorante Bellavista. Davanti alla spiaggia è stata creata una piccola insenatura con scogli e blocchi frangiflutti per il riparo a costa delle imbarcazioni dei pescatori.

La passeggiata sul lungomare permette il transito e la sosta attrezzata dei pedoni. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino, pomeridiano e notturno (8:00-9:00, 17:00-17:30, 23:00-24:00) in presenza di vento debole di direzione variabile. Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici (avifauna) episodici localizzati nei giardini delle case affacciate sul lungomare e sulle palme della passeggiata.
- Sciabordio delle onde del mare, con direzione dell'onda trasversale alla linea di costa e frequenza ritmica di 8-9 onde/minuto, con sovrapposta risacca determinata dai frangionda che proteggono l'insenatura. Il passaggio delle grandi navi determina alterazioni del moto ondoso che si ripercuotono, sfasate nel tempo, sul litorale. In periodo notturno il ritmo delle onde rappresenta l'unica sorgente sonora.
- Attività ludico sportiva (jogging, ciclismo, passeggiate, ..) sulla passeggiata, deboli voci e calpestio delle persone in transito.
- Automobili e moto in transito su Via Lungomare traffico discontinuo dell'ordine di 300 veicoli/ora, con intensificazioni negli intervalli orari di punta correlati ai ritmi lavorativi, velocità di transito generalmente di 50-60 km/h. Pavimentazione in asfalto liscio priva di discontinuità rilevanti per le emissioni di rumore.
- Navi in attraversamento dello Stretto: non si avverte generalmente il rumore a bassa frequenza dei grandi motori diesel che, solo raramente, assume caratteristiche pulsanti. Più rumorose le piccole imbarcazioni di pescatori in navigazione sotto costa.

Non si rilevano soundmark caratterizzanti o suoni comunitari.

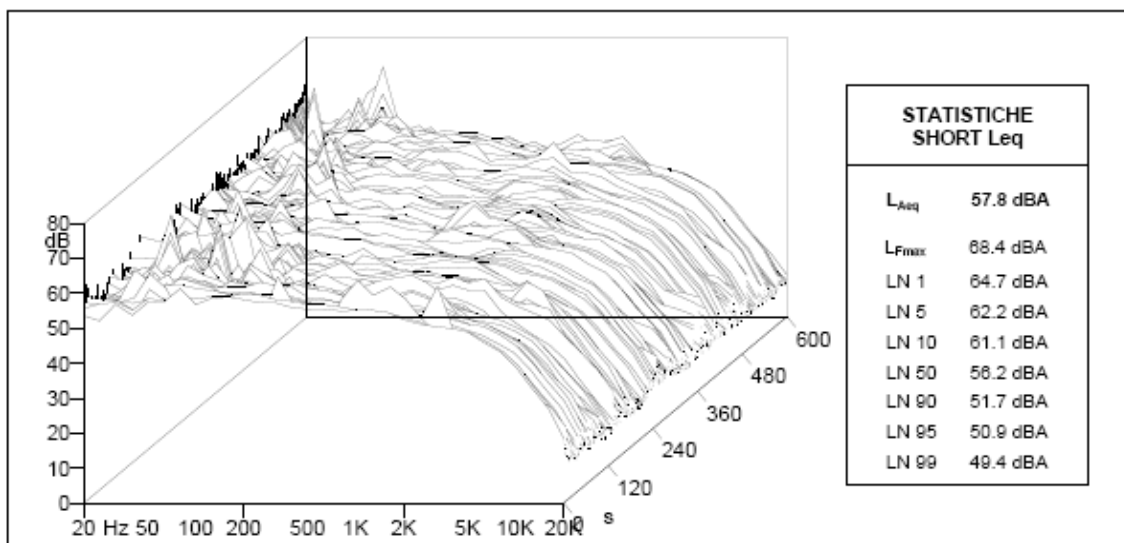
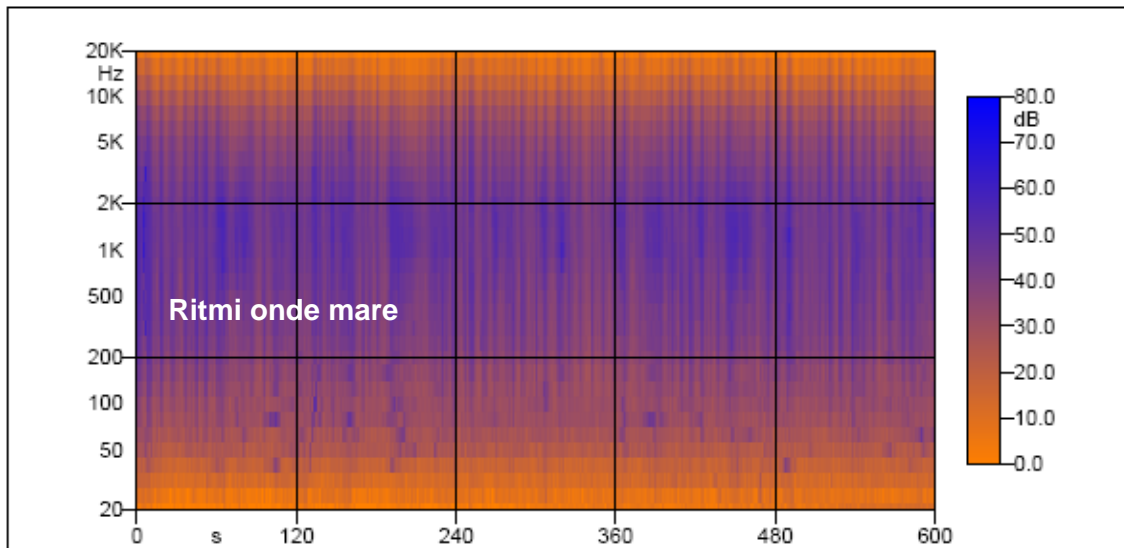


Figura 7.11

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

### **Punto S-C – Ponticello canale Pantano Grande**

E' localizzato sul ponticello della viabilità locale che scavalca il canale di collegamento tra Pantano Grande e il mare, a circa 50 m dalla viabilità che perimetra Pantano Grande, ai margini dell'area residenziale compresa tra il lungomare e la Strada Provinciale n. 43. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino e notturno (9:00-10:00, 24:00-01:00) e non in periodo pomeridiano a causa di lavori edili.

Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici (avifauna) diffusi e provenienti dai giardini e dalla cintura verde che perimetra il Pantano Grande. La diffusa presenza di cani da guardia segnala i confini fisici delle proprietà.
- Automobili e moto in transito su Via Lago Grande, con traffico discontinuo dell'ordine di 300 veicoli/ora, con intensificazioni negli intervalli orari di punta correlati ai ritmi lavorativi, velocità di transito generalmente di 50-60 km/h. Pavimentazione in asfalto liscio priva di discontinuità rilevanti per le emissioni di rumore. Il rumore di fondo è determinato dal traffico veicolare presente all'interno del bacino acustico della postazione (Via Consolare Pompea SP43, Strada Panoramica dello Stretto, ecc.). L'elevato rapporto segnale/rumore rende localizzabile la sorgente, in particolare in periodo notturno. Accensione, spegnimento, chiusura porte, ecc. nel parcheggio vicino alla postazione.
- Venditore ambulante frutta e verdura con Ape Piaggio equipaggiato con megafono in transito nelle vie all'interno del nucleo residenziale.

Il paesaggio sonoro periurbano riceve, come segnali sonori energici, gli eventi determinati dal transito di auto e moto sulla viabilità locale, numericamente esigui, e in misura attenuata il rumore del traffico sul circuito di Pantano Grande.

Il soundmark caratterizzante è determinato dai venditori ambulanti che si muovono nelle strette vie all'interno dell'urbanizzazione.

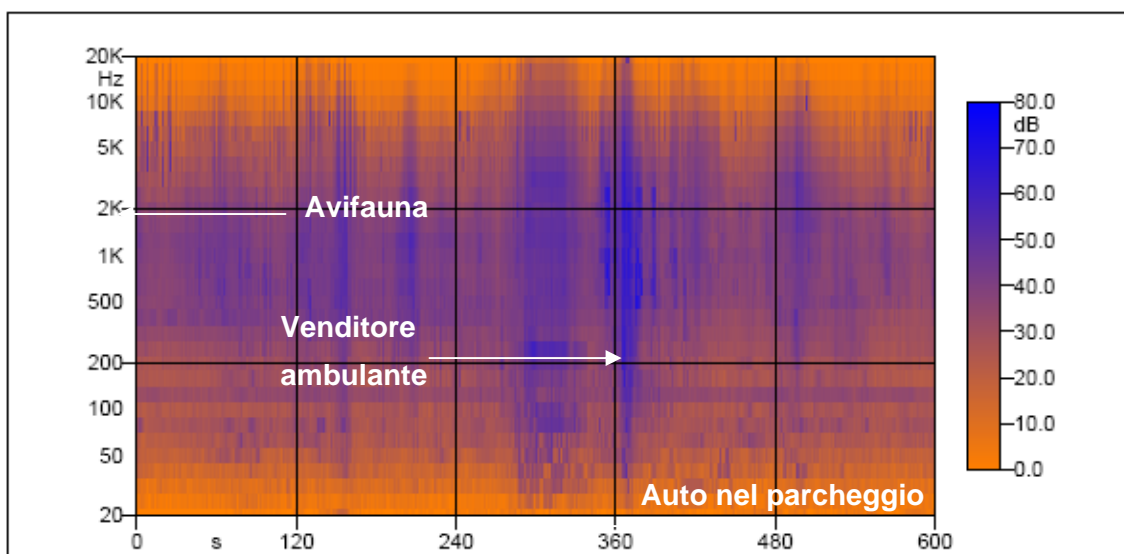
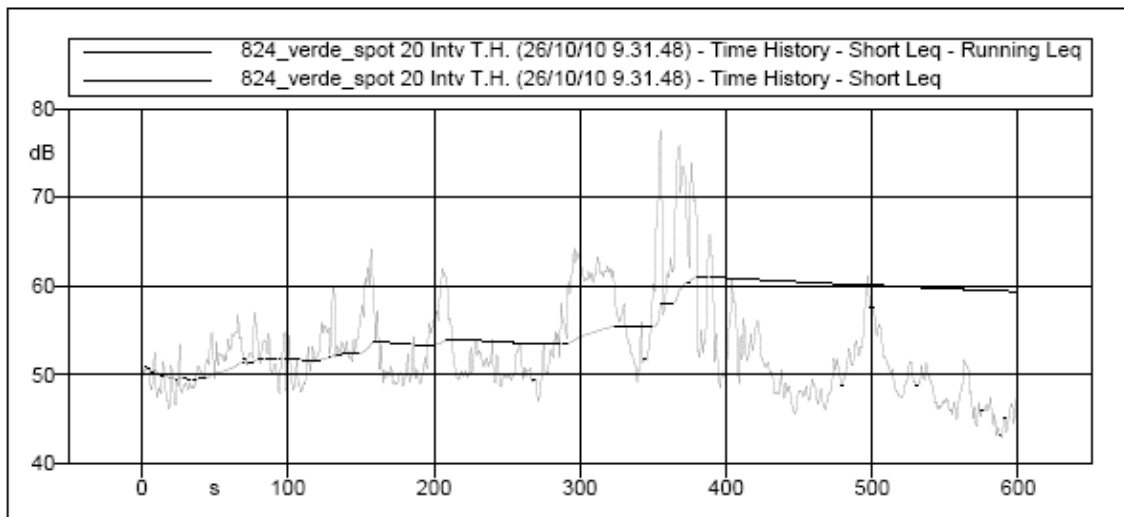


Figura 7.12

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>Rev</i></th> <th><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F0</td> <td>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						

### Punto S-D - Hotel Capo Peloro Via Circuito Torre Faro

Il punto di registrazione è localizzato davanti all'Hotel Capo Peloro a Nord di via Circuito in località Torre Faro, in posizione protetta rispetto ai transiti sulla viabilità locale, a circa 250 m dalla costa. La posizione è significativa del paesaggio sonoro fruito dagli abitanti del comparto residenziale non direttamente esposto al rumore da traffico. I campionamenti sono stati svolti in orario mattutino e notturno (7:00-8:00, 17:00-17:30, 01:00-02:00).

Le componenti del soundscape sono rappresentate da:

- Suoni biotici: grilli in periodo notturno, avifauna in periodo mattutino diffusa nelle aree incolte e nei giardini delle abitazioni. La diffusa presenza di cani da guardia segnala al passaggio i confini fisici delle proprietà.
- Rumore di fondo determinato dal traffico: automobili e moto in transito sulla viabilità principale e secondaria lontana dalla postazione (Via Consolare Pompea SP43, Via Circuito, Via Margi, ecc.). Le tracce sonore sono perfettamente udibili e localizzabili, in particolare in periodo notturno e mattutino in cui il rumore di fondo è minimo. Il rapporto segnale/rumore decresce in periodo diurno all'aumentare della frequenza dei transiti e del carico emissivo.

Il paesaggio sonoro è poco caratterizzato, privo di emergenze o di qualità timbriche fatta eccezione per la componente biotica e, in particolare, dell'avifauna.

Non sono presenti soundmark distintivi o suoni comunitari.

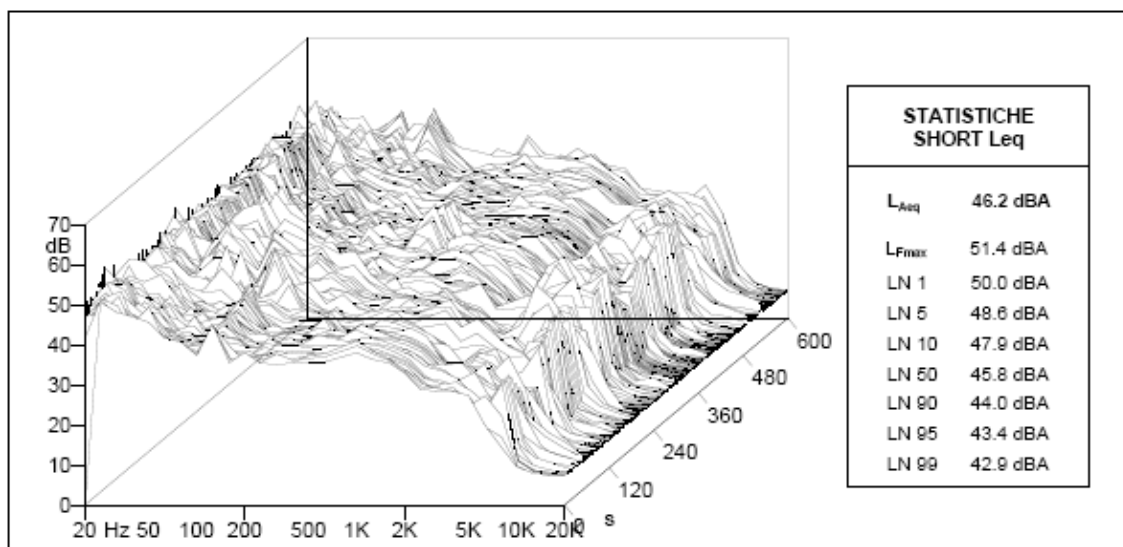
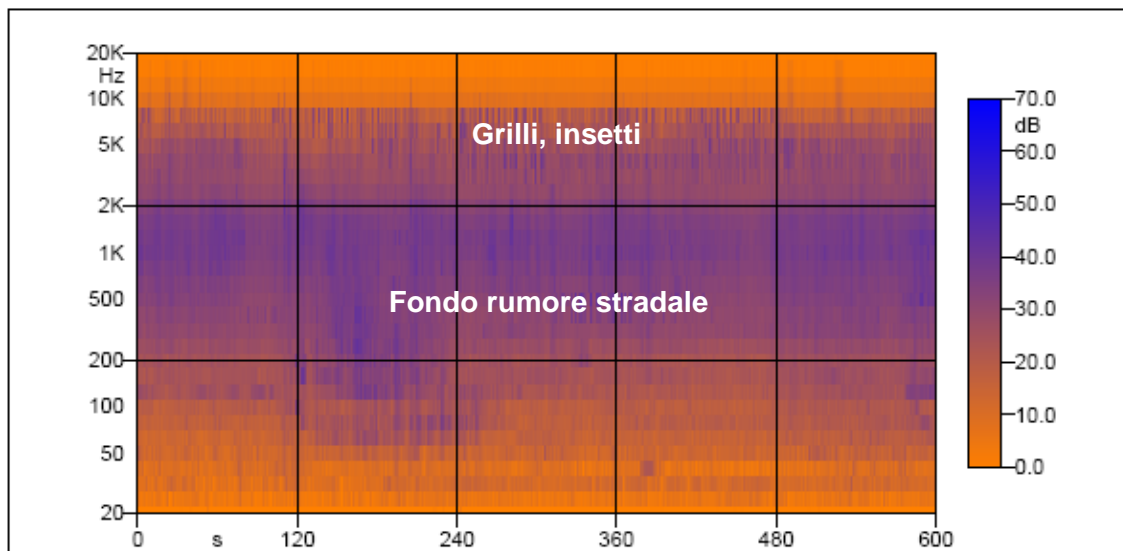


Figura 7.13

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">F0</td> <td style="text-align: left;">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						

## 7.5 I suoni dell'opera di attraversamento



E' in fase di produzione la restituzioni audio dei suoni caratterizzanti i singoli elementi strutturali identificati come significativi dall'analisi aeroacustica: i pendini F1, F2, F3, F4, il cavo di terra, il tandem di alimentazione e il tandem di supporto. Vengono considerate le frequenze dominanti e gli ipertoni.

E' in fase di produzione la restituzioni audio di due timpani virtuali in transito alla velocità di 50 km/h sull'opera di attraversamento, in presenza di vento a 25 m/s. I livelli sono stati derivati dall'analisi modellistica svolta in punti riceventi localizzati in asse ai pendini e in posizione intermedia tra due pendini consecutivi.

E' in fase di produzione la restituzioni audio dei suoni originati dall'opera di attraversamento in corrispondenza degli 8 punti in cui sono state svolte le registrazioni audio ante operam.

## 7.6 L'effetto del vento sul livello di rumore di fondo

I livelli di rumore di fondo ambientale, identificati dagli indici statistici L90 o L95, sono una tipica manifestazione della sovrapposizione degli effetti tra rumori di origine antropica e di origine naturale, abiotica e biotica. Gli indici L90 o L95 rappresentano il livello sonoro superato nel 90-95% del tempoe sono pertanto in grado di "filtrare" gli eventi sporadici ad alto contenuto energetico.

La componente del rumore di fondo L95 dovuta all'azione di vibrazione indotta dal vento sugli elementi fisici naturali o antropici che compongono la copertura del terreno (alberi, prati, foglie, tettoie,...), o dovuta al risollevarmento, spostamento di oggetti, collisioni, ecc., varia localmente in funzione della velocità del vento e del tipo, densità, tessitura e altezza della copertura del terreno.

La correlazione tra i livelli statistici L95-L90 e la velocità del vento può essere più o meno pronunciata in relazione al tipo di copertura superficiale del terreno ed alla sua omogeneità. La correlazione rispetto ai livelli equivalenti Leq è generalmente meno pronunciata in conseguenza del fatto che questo indicatore tende a catturare e sovrappesare gli eventi di rumore di breve periodo. In Figura 7.14 - Figura 7.15 è riportato un esempio di misure L95-VV e di analisi di correlazione L90-VV.



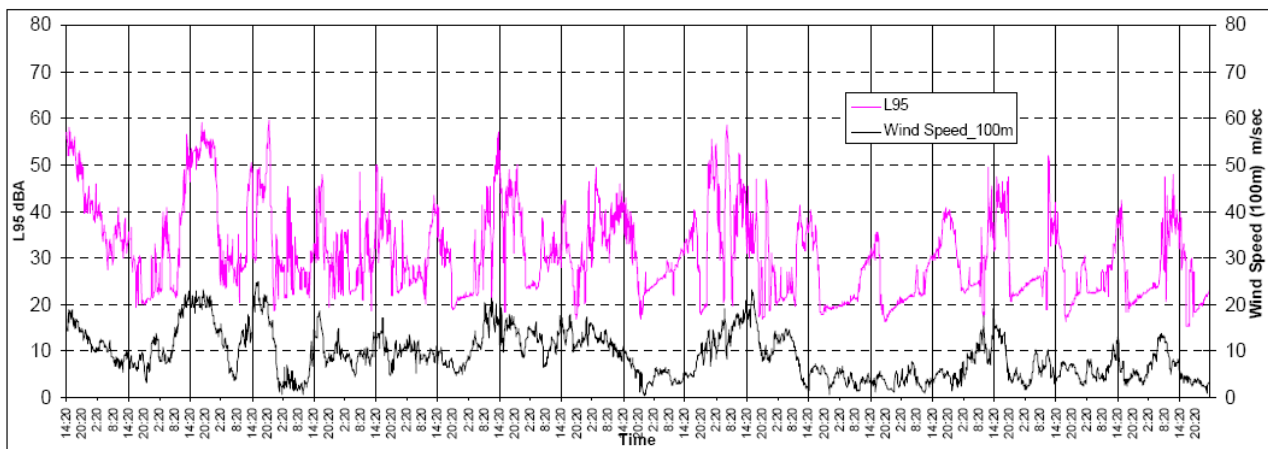
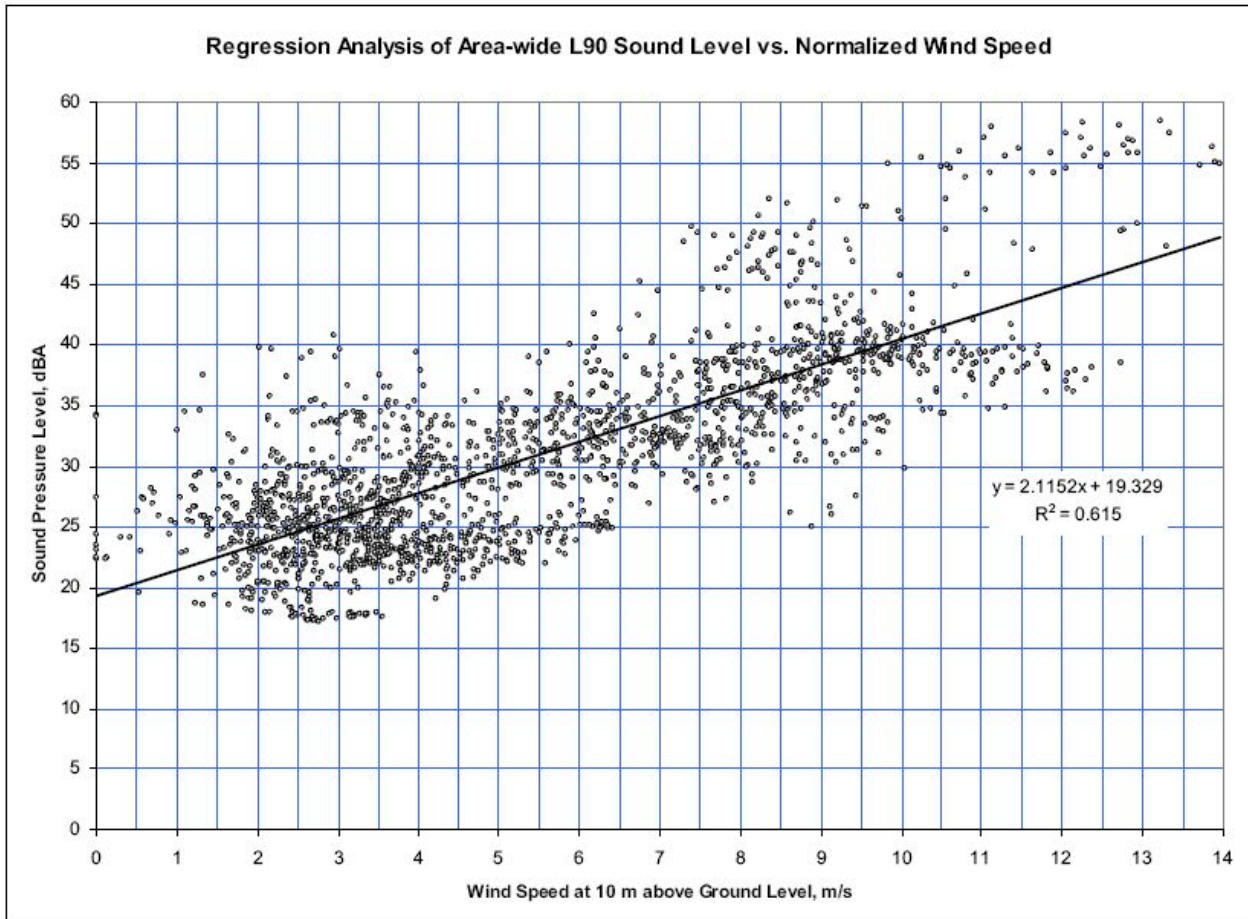


Figura 7.14 Esempio di decorso temporale VV- L95 e di analisi di regressione VV 0-14 m/s

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	Codice documento AC0081_F0.doc	Rev F0	Data 20/06/2011

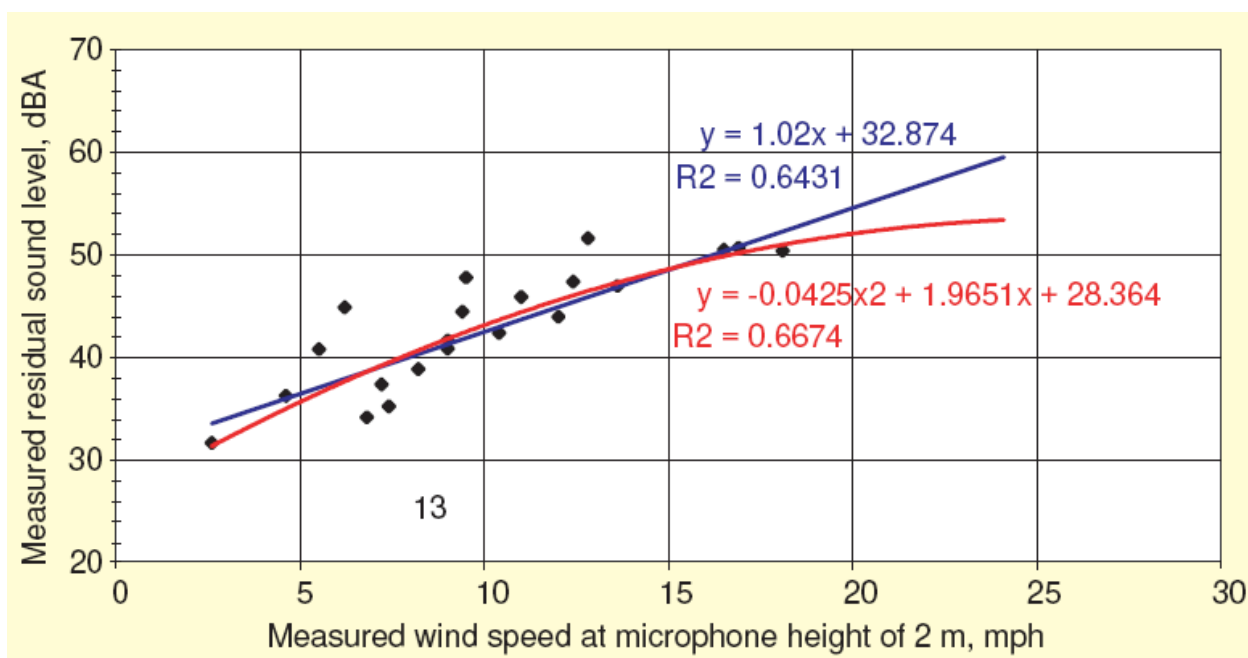


Figura 7.15 Analisi i regressione L90-VV tra 5-25 m/s di velocità del vento - Fonte: F.Hessler, D. Hessler, "Baseline Environmental Sound Levels for wind turbine Projects", 2002"

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 8 Risultati

Il lavoro svolto ha consentito di definire nel dettaglio le caratteristiche di emissione di origine aeroacustica dei diversi elementi strutturali del ponte. La conoscenza acquisita sul soundscape delle aree interessate dall'opera, e le informazioni disponibili nei documenti di valutazione dell'impatto determinato dall'esercizio delle infrastrutture di trasporto stradale e ferroviario ad esso associate, consente di rispondere alle domande poste alla base del presente studio.

### 8.1 Le emissioni aeroacustiche saranno udibili?

L'udibilità di un fenomeno sonoro dipende dal complesso delle grandezze fisiche che lo caratterizzano: ampiezza e connotazione spettrale. Se è intuitivo comprendere che un suono può essere avvertito o meno in funzione dell'ampiezza che giunge all'orecchio, meno intuitivo è il fatto che suoni di pari ampiezza possono essere udibili o meno in ragione di una differente frequenza caratteristica. Ampi studi fondamentali esistono in merito, che hanno portato alla definizione del cosiddetto audiogramma normale. Tale grafico localizza sul piano frequenza-ampiezza lo spazio uditivo dell'orecchio "normale" ed è codificato nella normativa tecnica UNI ISO 226. I suoni che non rientrano all'interno dell'audiogramma non sono dunque udibili.

In Figura 8.1 - Figura 8.4 viene riportata una visualizzazione che sovrappone, in corrispondenza dei punti di indagine soundscape, le componenti emmissive del ponte, graficizzate con punti verdi, sull'audiogramma normale. Il campo compreso tra il limite inferiore di udibilità (threshold of hearing) e il limite superiore del danno uditivo (threshold of feeling) costituisce lo spazio uditivo. Il grafico evidenzia anche le aree caratteristiche di pertinenza del parlato e della musica.

L'analisi delle immagini riportate sottolinea la forte differenza riscontrabile tra la condizione di vento ortogonale al ponte e parallela al ponte. Quest'ultima infatti presenta in tutti i punti di verifica contributi sonori del ponte localizzati ai margini inferiori dell'audiogramma e si può pertanto affermare che le condizioni di vento parallelo e sub-parallelo al ponte sono scarsamente percettibili in tutto l'ambito di interferenza.

Nei casi caratterizzati da condizioni di vento ortogonale al ponte spiccano invece le componenti di emissione dei cavi ferroviari (linea di alimentazione, cavi di sospensione e di terra), localizzate tra 300 e 1300 Hz. La frequenza di 315 Hz, in particolare, interferisce in alcuni casi con le aree caratteristiche del parlato ed è in tutte le situazioni chiaramente udibile, con intensità più o meno rilevanti in funzione della distanza dall'asse dell'infrastruttura.

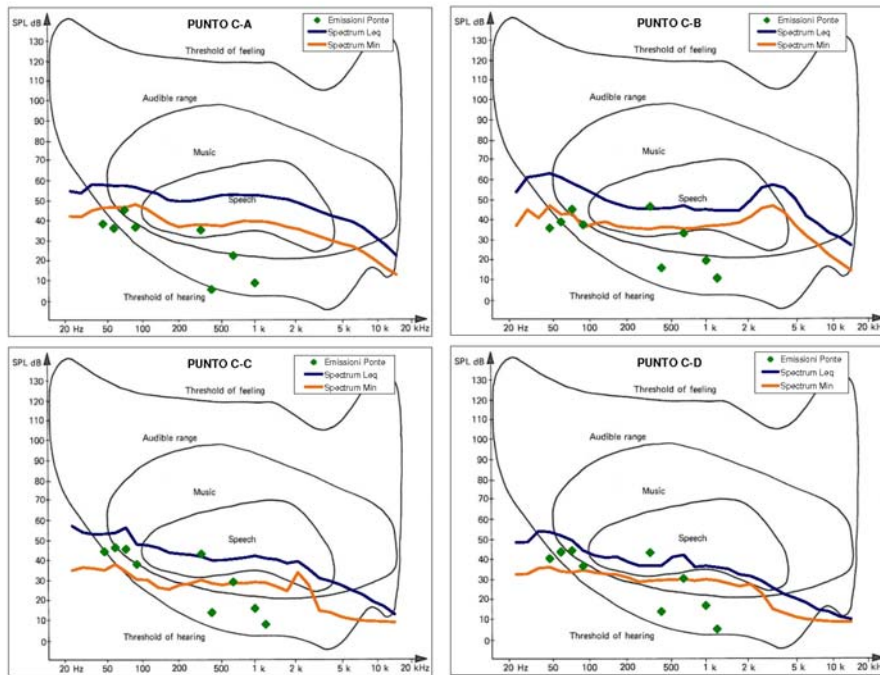


Figura 8.1 Calabria – Vento ortogonale asse ponte

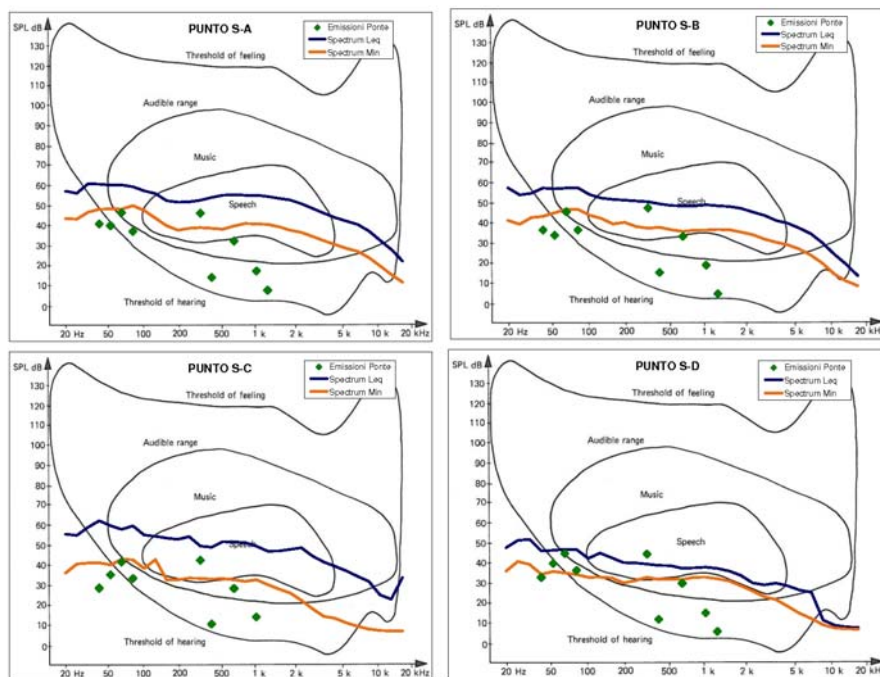


Figura 8.2 Sicilia – Vento ortogonale asse ponte

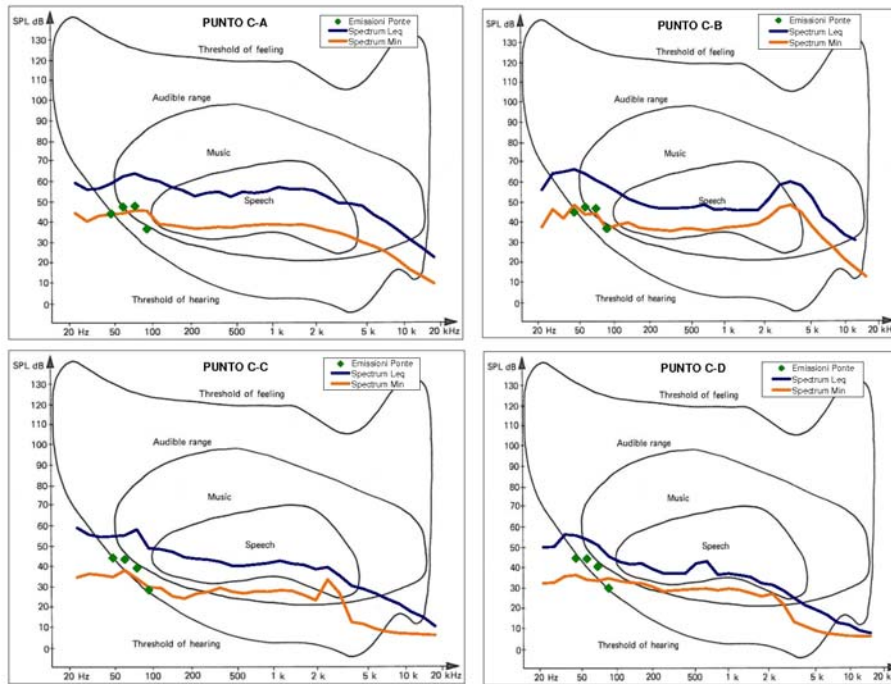


Figura 8.3 Calabria – Vento parallelo asse ponte

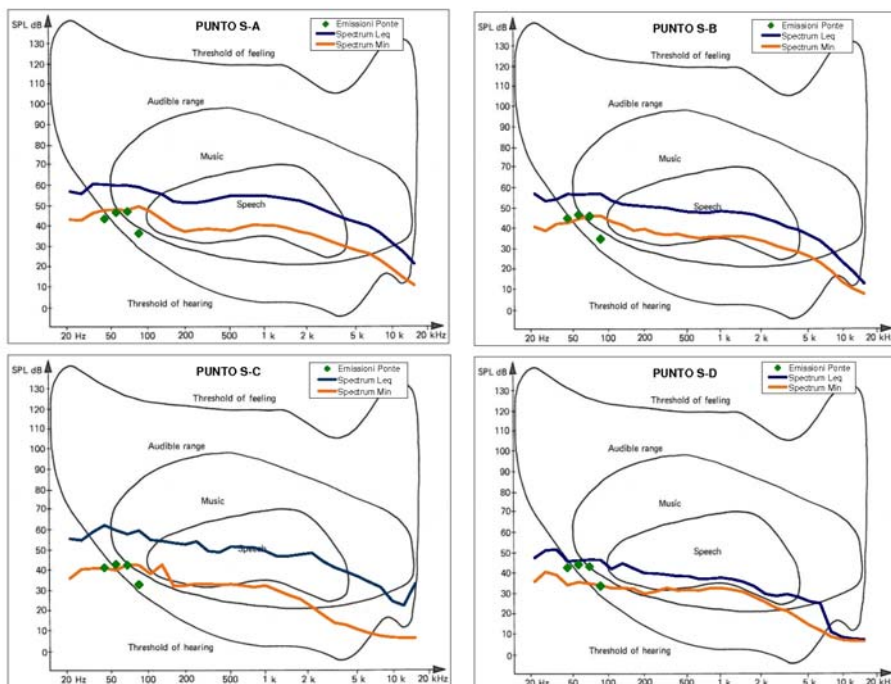


Figura 8.4 Sicilia – Vento parallelo asse ponte

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO		<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F0</td> <td style="text-align: center;">20/06/2011</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F0	20/06/2011
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F0	20/06/2011						

## 8.2 Quali saranno gli effetti uditivi?

Il campo sonoro, per effetto della sovrapposizione delle caratteristiche emmissive dei singoli elementi, ha direttività ortogonale alla direzione del vento. In termini di effetti uditivi e sinestetici il riconoscimento di un errore nella localizzazione della sorgente sonora rapportata alla provenienza del vento determina un effetto di delocalizzazione: sappiamo con precisione da dove sembra provenire il suono, ben sapendo che si tratta di una illusione. L'effetto si compone con l'estensione spaziale del fenomeno e assume connotazioni ubiquitarie per effetto dell'omogenea presenza dei fenomeni su porzioni di territorio molto ampie.

## 8.3 I suoni emessi in che rapporto saranno rispetto al paesaggio sonoro locale?

I livelli di fondo L95 rilevati nei punti di campionamento audio, con velocità del vento minori di 5 m/s, sono dell'ordine di 50-54 dBA nei punti fronte mare e 42-46 dBA nei punti sulla costa più interni in periodo diurno. In periodo notturno i valori L95 minimi si posizionano tra 30-33 dBA.

In uno scenario di esercizio in cui si ipotizza un rumore di fondo costante, simile a quello attuale, le emissioni aeroacustiche potranno risultare udibili nei periodi diurno e notturno nelle aree urbanizzate retrostanti al fronte mare. La frequenza che emerge chiaramente è la 315 Hz.

In Figura 8.1 - Figura 8.4 sono riportati gli spettri sonori rilevati nei punti di acquisizione soundscape in termini di livello medio sul campione da 10' (Spectrum Leq, linea blu) e di spettro minimo (Spectrum Min, linea arancione). Nella maggioranza delle condizioni evidenziate le componenti udibili delle emissioni sonore del ponte sono tali da confondersi con i livelli minimi rilevati nelle condizioni attuali. Nei punti C-B, C-C e S-B in condizioni di vento ortogonale al ponte l'emissione tonale dei cavi ferroviari assume valori confrontabili con il livello medio ambientale. Ne consegue che in assenza di eventi acustici concorsuali l'emissione sonora diventa udibile, per poi essere nuovamente mascherata in corrispondenza del fenomeno locale successivo (ad es. transiti veicolari, ecc.).

Sussistono infine alcune situazioni caratterizzate da livelli ambientali particolarmente bassi (ad es. i punti C-D e S-D) e con valori medi e minimi molto vicini, in cui la singola componente tonale a 315 Hz nello scenario con vento ortogonale supera i livelli medi rilevati nei punti di indagine. In queste condizioni il tono sovrasta la componente ambientale ed è udibile.

Le valutazioni esposte devono tuttavia considerare che i livelli ambientali documentati

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

corrispondono ad una condizione anemologica di prevalente calma di vento. Considerando viceversa l'effetto del vento sull'innalzamento dei livelli di rumore di fondo ambientale, e i dati bibliografici che correlano L95 alla velocità del vento, si può stimare che in condizioni di vento a 25 m/s il livello di fondo subisca un innalzamento dell'ordine di 20-25 dBA, rendendo in termini pratici non udibile l'effetto aeroacustico.

#### **8.4 I suoni dovuti al vento (impatto acustico diretto) saranno significativi rispetto al campo sonoro generato dall'esercizio autostradale (impatto indotto)?**

Le condizioni di vento considerate nelle analisi aeroacustiche sono compatibili con l'esercizio stradale e ferroviario del ponte. Il confronto con i livelli ambientali non può pertanto prescindere dalla composizione con i livelli di impatto mitigato previsti per effetto dell'esercizio dell'infrastruttura (impatto indotto).

La situazione risulta differenziata sui due versanti del ponte. In Sicilia i livelli di rumore determinati dal nuovo tracciato autostradale si collocano prevalentemente nel campo 45-50 dBA in periodo diurno e circa 5 dBA in meno nel periodo notturno, a fronte di emissioni di origine aeroacustica in condizioni di vento ortogonale pari a 37-41 dBA. Ne consegue che l'impatto acustico diretto può determinare al massimo un aumento di 3 dBA dell'impatto indotto in periodo notturno.

Sul versante opposto l'emissione autostradale scompare in prossimità della spalla del ponte per effetto dell'inserimento del tracciato in galleria naturale. I livelli di impatto significativi sono di fatto localizzati solo in prossimità degli imbocchi e comunque con valori di circa 50 dBA diurni e 45 dBA notturni, da confrontare con un'emissione aeroacustica che risulta anche in questo caso di circa 38 dBA, valgono pertanto considerazioni analoghe a quelle fatte per la Sicilia. L'emissione veicolare si attenua poi rapidamente con la distanza fino a valori di 45 dBA diurni e 40 dBA notturni mentre la componente aeroacustica presenta un decadimento più lento e assume in queste situazioni un ruolo paritario e talvolta prevalente.





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 9 Conclusioni

Nell'ambito delle "Specifiche tecniche per il progetto definitivo e il progetto esecutivo delle opere ambientali – Studi e approfondimenti di settore" la Società Stretto di Messina ha richiesto al Contraente Generale la verifica dell'effetto acustico prodotto dal vento sulle strutture minori anche a velocità del vento maggiori di quella considerata (10 m/s) nelle precedenti fasi progettuali.

Il presente studio affronta l'argomento mediante un approccio scientifico basato su metodi analitici e modellizzazione numerica dei fenomeni di emissione aeroacustica derivanti dall'interazione del vento sulle strutture minori del ponte.

Sono state svolte specifiche elaborazioni del campo di moto che si determina in conseguenza delle interazioni del vento con le strutture del ponte, considerando velocità fino a 40 m/s. Sono state quindi calcolate le emissioni acustiche determinate da tali effetti nelle condizioni di direzione del vento di massima cautela e ne è stata calcolata la propagazione fino alle quote di ascolto ordinario.

I risultati delle simulazioni numeriche sono stati quindi confrontati con le condizioni di udibilità del fenomeno, in termini assoluti e in riferimento alla situazione attuale e futura nello scenario progettuale.

L'emissione aeroacustica è significativa e raggiunge sulla costa livelli massimi sempre inferiori a 45 dBA, con distribuzione spettrale caratterizzata da componenti udibili nel campo di frequenze 40-1250 Hz. Considerando le caratteristiche del paesaggio sonoro locale non alterate dal vento, lo studio evidenzia che le emissioni aeroacustiche possono risultare udibili nelle aree urbanizzate retrostanti al fronte mare, con componente dominante a 315 Hz.

L'innalzamento del livello di rumore di fondo determinato dal vento attua una azione di totale mascheramento delle emissioni aeroacustiche.

Ne consegue che non sussiste la necessità di prevedere sagome o profili aerodinamici per gli elementi strutturali considerati ai fini del contenimento dell'emissione sonora di natura aerodinamica.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

## 10 Bibliografia

- [1] F.R. Menter, *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA Journal vol. 32, n8, (1994)
- [2] M.S. Howe, *Theory of vortex sound*, Cambridge University press (2003).
- [3] H. Fujita, *The characteristics of the Aeolian tone radiated from two-dimensional cylinders*, Fluid Dyn. Res. vol.42 (2010)
- [4] R. B. Blackman, and J. W. Tukey, *Particular Pairs of Windows*. In *The Measurement of Power Spectra, From the Point of View of Communications Engineering*. New York: Dover, 1959.
- [5] M. König, H. Heisenlohr, H. Eckelmann, *Visualisation of the spanwise cellular structure of the laminar wake of wall-bounded circular cylinders*, Physics of Fluids A 4, vol. 869, (1992)
- [6] D. Casalino, M. Jacob, *Prediction of aerodynamic sound from circular rods via spanwise statistical modelling*, Journal of Sound and Vibration, vol. 262, pp.815-844, (2003)
- [7] C.J. Doolan, *Computational bluff body aerodynamic noise prediction using a statistical approach* Applied Acoustics vol. 71, pp.1194-1203, (2010)
- [8] G.M. Corcos *The structure of turbulent pressure field in boundary-layer flows*, Journal of Fluid Mechanics, 18, pp. 353-378, (1964)
- [9] K.D. Sakaliyski *Aeroacoustics of perforated drag plates for Quiet Transport Aircraft*, PhD Thesis, MIT, September (2005)
- [10] I.P. Castro, *Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an air-stream*, J. Fluid Mech. vol. 64, part 3, pp. 599-609, (1971)
- [11] T. Brooks, D.S. Pope, M. A. Marcolini *Airfoil self-noise and prediction*, NASA Ref. 1218, (1989)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>	
RELAZIONE IMPATTO AEROACUSTICO OPERA DI ATTRAVERSAMENTO IN FASE DI ESERCIZIO	<i>Codice documento</i> AC0081_F0.doc	<i>Rev</i> F0	<i>Data</i> 20/06/2011

[12] R.K. Amiet *Noise due to turbulent flow past a trailing edge*, Journal of Sound and Vibration, vol. 47, pp.387-393, (1976)

[13] R.K. Amiet *Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream*, Journal of Sound and Vibration, vol. 41, pp.407-420, (1975)

[14] M. Roger, S. Moreau *Back-scattering correction and further extensions of Amiet's trailing edge noise model. Part I : theory*, Journal of Sound and Vibration, vol. 286, pp.477-506, (2005)

[15] Y. Rozemberg *Modélisation analytique du bruit aérodynamique alarge bande des machines tournantes: utilisation de calculs moyennés de mécanique des fluids*, PhD dissertation, Ecole Centrale de Lyon, (2007)

[16] F.H. Clauser *Turbulent Boundary Layers in Adverse Pressure Gradients*, Journal of the Aeronautical Sciences, vol. 21, 91-108, (1954)

[17] D. Coles, *The law of the wake in the turbulent boundary layer*, J. Fluid Mech., vol. 1, 191-226, (1956)

[18] S.J. Zan, K. Matsuda, *Steady and unsteady loading on a roughened circular cylinder at Reynolds number up to 900,000*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90 (2002), 567-581

[19] A. Iob, R.Arina, C. Schipani, *Frequency-domain linearized Euler model for turbomachinery noise radiation through engine exhaust*, AIAA Journal, v. 48, n4, (2010)

[20] OpenFOAM®. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam>, 2009.