

AEROACUSTICA DELLE STRUTTURE SOSPESE DEL PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA

Giuseppe Fiammenghi (1), Pietro Paolo Marcheselli (2), Francesca Baiocco (3), Dorina Spoglianti (4), Marco Salomone (5), Carlo Alessandro Bertetti (6), Marco Falossi (7)

- 1) Stretto di Messina S.p.A., Roma,
- 2) Eurolink S.C.p.A., Milano, pietropaolo.marcheselli@ponteurolink.it
- 3) Eurolink S.C.p.A., Milano, francesca.baiocco@ponteurolink.it
- 4) SINA S.p.A., Milano, dorina.spoglianti@sina.co.it
- 5) SINA S.p.A., Milano, marco.salomone@sina.co.it
- 6) Studio Progetto Ambiente s.r.l., Torino, ac.bertetti@progambiente.it
- 7) Studio Progetto Ambiente s.r.l., Torino, m.falossi@progambiente.it

1. Scopo del lavoro

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.

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

I fenomeni coinvolti si collocano su scale dimensionali molto ampie, ne consegue l'impossibilità di affrontare il lavoro con un approccio unico sull'intera struttura. Il problema è stato quindi scomposto in un'analisi di elevato dettaglio dei fenomeni di generazione aeroacustica (toni eolici) sui singoli elementi, che ha consentito di assegnare un'etichetta sonora propria ad ogni singolo pendino di sospensione, in termini di potenza acustica per banda di frequenza e direzionalità.

Le emissioni acustiche dei singoli elementi indagati sono state quindi inserite all'interno di un modello di simulazione di tipo ray tracing complessivo del ponte per calcolare i livelli in dBA in corrispondenza delle aree abitate presenti nelle zone di attestamento dell'opera. Il confronto tra le valutazioni previsionali presso i ricettori e i risultati ottenuti dalle indagini di soundscaping consente di esprimere un giudizio finale sull'importanza della problematica applicata al caso particolare del Ponte sullo Stretto di Messina.

2. Definizione del vento di riferimento per le analisi aeroacustiche

Il quesito di base ha evidenziato la necessità di studiare i fenomeni aeroacustici a velocità del vento superiori a 10 m/s, ma non ha fissato il valore obiettivo. E' stato pertanto necessario definire in primo luogo un criterio sulla base del quale individuare la velocità del vento di riferimento per il seguito del lavoro.

Considerando che lo studio è finalizzato a valutare il disturbo alle persone, nella scelta della velocità del vento da utilizzare per le valutazioni successive si è tenuto conto dei seguenti elementi:

1- 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.

2 - 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.

Le basi di dati utilizzate per le analisi statistiche sono costituite da dati misurati in corrispondenza di diversi sensori installati sull'ex pilone dell'ENEL di Torre Faro, fino a una quota di 128 m slm, e da ricostruzione dei campi di vento con modelli meteorologici. Considerando che i valori massimi delle medie orarie si collocano nel campo 20-35 m/s per quote fino a 178 m e sfiorano i 40 m/s per quote prossime ai 400 m (altezza delle torri del ponte), che le medie sulle 24 ore sono comprese tra 14 e 20 m/s e che il massimo della media sul periodo di riferimento notturno si attesta intorno ai 24 m/s, per le successive valutazioni è stato utilizzato il valore di 25 m/s per le strutture collocate fino a 150 m slm e 30 m/s per le strutture a quote superiori. Tali velocità si verificano per almeno un'ora all'anno, ma con una persistenza sicuramente inferiore alle otto ore del periodo notturno.

3. Analisi di sensibilità per l'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 $D=0.106$ m ed una lunghezza $L \gg D$. Su tale elemento è stata 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 e fino a 40 m/s.

L'analisi aeroacustica sull'elemento di riferimento è stata 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.

3.1 Fenomenologia e modello di calcolo fluidodinamico

Considerando le dimensioni dell'elemento geometrico e le velocità del vento indicate in precedenza, il numero di Reynolds caratteristico del fenomeno presenta valori dell'ordine di $10e+5$ e pertanto lo strato limite che si sviluppa intorno all'elemento cilindrico è di tipo turbolento, con separazione a circa 90° 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 quella di distacco dei vortici. Tali fluttuazioni delle forze aerodinamiche sono all'origine di una sorgente acustica di-

polare 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 minori dell'unità ed evitare, così, l'utilizzo di "wall functions". Tutte le simulazioni fluidodinamiche sono state eseguite utilizzando il codice di calcolo OpenFOAM®.

In figura 1 è riportato un esempio di risultati ottenuti per il pendino *FI* a 20 m/s, in termini di velocità istantanea del flusso (a sinistra) e di fluttuazioni del coefficiente di resistenza C_d su una griglia di 80.000 elementi quadrilateri.

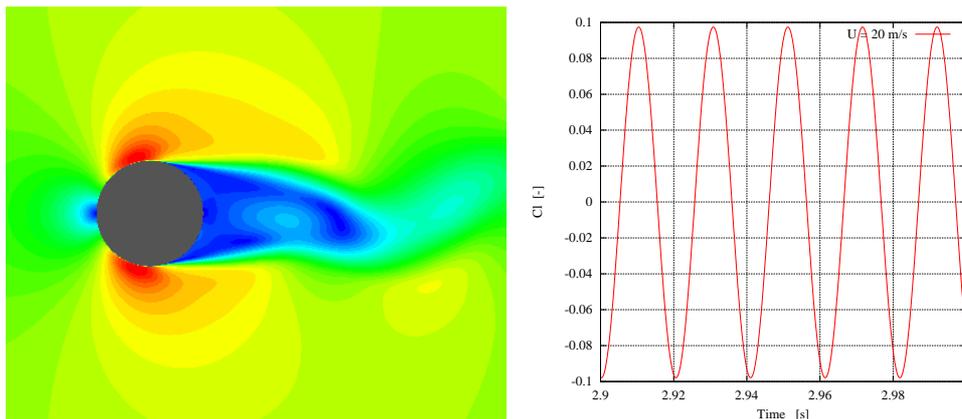


Figura 1 – Velocità istantanea e coeff. di resistenza a 20 m/s

3.2 Modello di calcolo aeroacustico

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 & Hawkins [2]. 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. Trascurando il rumore broadband dovuto alla turbolenza, la formulazione integrale di Ffowcs Williams & Hawkins può essere scritta, nel dominio delle frequenze, come

$$(1) \quad H(f) \hat{p}'(\mathbf{y}, \omega) = - \int_{f=0} i \omega \hat{Q}(\xi, \omega) G(\mathbf{y}; \xi) ds - \int_{f=0} \hat{F}_i(\xi, \omega) \frac{\partial G(\mathbf{y}; \xi)}{\partial y_i} ds$$

dove:

H è la funzione di Heaviside;

G è un'opportuna funzione di Green;

ξ è il vettore delle coordinate della superficie di integrazione;

\mathbf{y} è il vettore delle coordinate dell'osservatore;

\hat{Q} e \hat{F}_i sono le sorgenti acustiche valutate a partire dai dati fluidodinamici mediante le seguenti espressioni:

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

$$(3) \quad Q = (\rho U_i - \rho_0 U_{0i}) \hat{n}_i$$

dove:

p , ρ e U sono le grandezze locali del campo fluidodinamico

p_0 , ρ_0 e U_0 rappresentano le stesse in campo indisturbato

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 [3]. 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 de-correlazione spaziale della scia può essere modellizzata assumendo che le grandezze fluidodinamiche siano sfasate casualmente lungo la direzione spanwise [4]. 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.

3.3 Validazione

Per validare la procedura di calcolo aeroacustico, sono stati confrontati i risultati ottenuti applicando la formulazione di Ffwoes-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 de-correlazione del segnale. Le emissioni acustiche verranno quindi valutate considerando un osservatore posto sulla normale al cilindro ad una distanza di $r=100D$ dal centro. La soluzione numerica ottenuta risolvendo l'equazione di Ffwoes-Williams and Hawkings e la soluzione ottenuta con la formulazione di Curle approssimata ha evidenziato un ottimo accordo.

3.4 Risultati

L'analisi delle emissioni acustiche dell'elemento di riferimento è stata effettuata risolvendo l'equazione di Ffowcs-Williams and Hawkins per un osservatore posto ad una distanza di $2D$ dal centro del cilindro. In figura 3 a sinistra 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. A destra 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 è trascurabile. All'aumentare della velocità aumenta la frequenza di rilascio dei vortici, di conseguenza aumenta la frequenza del tono principale.

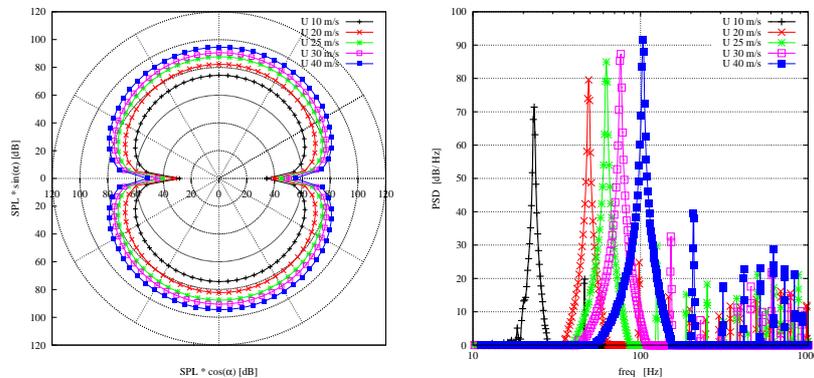


Figura 3 – Risultati analisi di sensibilità pendino F1

4. Applicazione estensiva del metodo

Il metodo di calcolo così definito è stato applicato in modo estensivo alle strutture che si collocano al di sotto di un diametro critico di 0.325 m, valore al di sopra del quale, nelle condizioni di vento considerate, eventuali emissioni acustiche si collocano al di sotto del campo di udibilità ($f < 20$ Hz).

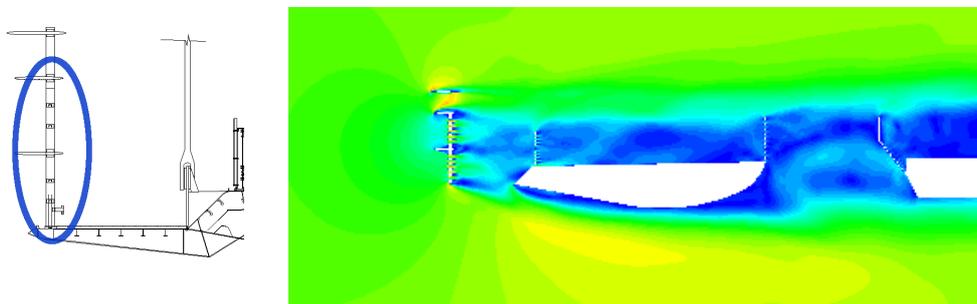


Figura 4 – Analisi fluidodinamica dell'impalcato del ponte

In particolare sono stati considerati tutti i pendini di sospensione e i cavi di alimentazione della linea ferroviaria. Sono stati esclusi i cavi principali e le torri perché di diametro superiore al valore critico e gli elementi presenti sull'impalcato in quanto questo ambito è protetto da apposite barriere frangivento, rispetto alle quali le simulazioni fluidodinamiche evidenziano un'efficace riduzione di velocità (figura 4).

5. Propagazione acustica e confronto con il soundscape locale

La caratterizzazione delle singole sorgenti è stata utilizzata per calibrare un modello complessivo del ponte utilizzando il software previsionale di ray-tracing Raynoise, costituito da circa 85.000 sorgenti e 1.500 punti di calcolo. Un esempio di mappatura risultante è riportato in figura 5 sx.

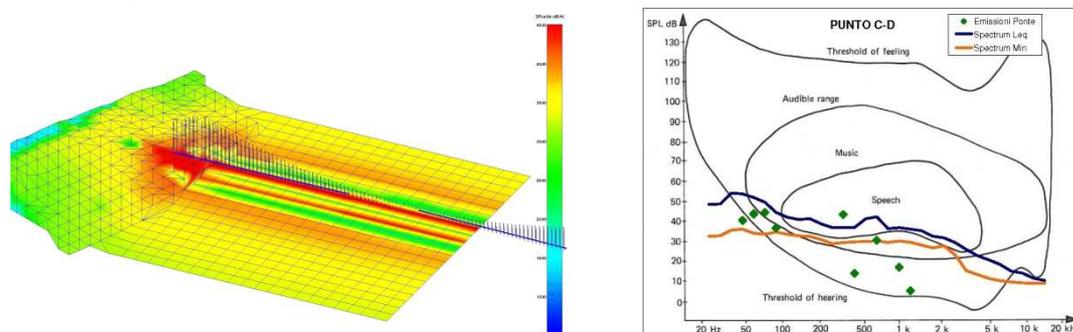


Figura 5 – Mappatura acustica (sx), Confronto con il soundscape locale (dx)

I livelli massimi riscontrabili nelle aree di attestamento del ponte raggiungono i 45 dBA nelle condizioni peggiori (vento ortogonale all'asse ponte), e sono pertanto significativi in termini assoluti.

Il fenomeno fisico risultante è stato infine confrontato con le analisi di soundscape svolte in 8 punti di ascolto localizzati nelle aree di costa in prossimità del Ponte sullo Stretto. Sovrapponendo sull'audiogramma normale gli spettri continui dei campionamenti audio e gli spettri discreti dei risultati delle simulazioni (figura 5 dx) è possibile concludere che il contributo delle emissioni aeroacustiche del ponte presenta valori che in alcune situazioni risultano percepibili. Considerando tuttavia l'innalzamento del rumore di fondo determinato dalla presenza di un vento di 25 m/s in prossimità del suolo, stimato da dati di letteratura di 20-25 dBA, si può affermare che Fonè del ponte non risulterà udibile.

6. Bibliografia

- [1] F.R. Menter, *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA Journal vol. 32, n8, (1994)
- [2] A. Iob, R.Arina, C. Schipani, *Frequency-domain linearized Euler model for turbomachinery noise radiation through engine exhaust*, AIAA Journal, v. 48, n4, (2010)
- [3] M. Konig, 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)
- [4] 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)
- [5] H. Fujita, *The characteristics of the Aeolian tone radiated from two-dimensional cylinders*, Fluid Dyn. Res. vol.42 (2010)
- [6] M.S. Howe, *Theory of vortex sound*, Cambridge University press (2003).
- [7] OpenFOAM®. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam> (consultato il 03/05/2012)

Si ringrazia il gruppo di lavoro del DIMEAS del Politecnico di Torino Prof. R. Arina, Ingg. A. Iob, R. della Ratta e I. Cozza per la partecipazione allo studio.