

# INTRODUZIONE AI FENOMENI AEROELASTICI: IL VORTEX SHEDDING

Marco BOZZA \*

\* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

## INTRODUZIONE

L'aeroelasticità si occupa dello studio dei fenomeni nei quali le forze aerodinamiche ed il moto strutturale conseguente interagiscono significativamente. L'Ingegneria Strutturale interessata dai fenomeni aeroelastici può essere suddivisa, a seconda del tipo di strutture coinvolte dall'azione del vento, in due grandi categorie: Civile e Aerospaziale. Mentre nell'Ingegneria Civile i fenomeni aeroelastici sono indotti da flussi in regime subsonico, su strutture per lo più vincolate al suolo, nell'Ingegneria Aerospaziale i fenomeni aeroelastici interessano invece strutture non vincolate completamente immerse in flussi anche in regimi supersonici. Tale distinzione è molto importante perché la presenza o meno di vincoli, associata alla velocità dell'aria incidente, origina effetti sulle strutture coinvolte molto differenti tra loro. È tuttavia importante precisare che per alcune applicazioni ingegneristiche lo studio di base dei fenomeni aeroelastici ha una trattazione comune. Si pensi, ad esempio, all'impalcato di un ponte sospeso: per esso l'azione del vento costituisce il carico dinamico più importante (insieme a quello sismico) da considerare nella progettazione strutturale. L'analisi degli effetti indotti dal flusso d'aria incidente viene valutato, considerando la sezione trasversale dell'impalcato come un profilo alare di un aeromobile, e questo al fine di minimizzare le conseguenze dei fenomeni aeroelastici.

Nella trattazione che segue ci si riferisce alle oscillazioni strutturali aeroelastiche indotte da flussi subsonici e ai fenomeni di instabilità aerodinamica innescati dalla presenza delle forze di interazione fluido-struttura, fondamentalmente per strutture di interesse nell'ambito civile.

Nell'Ingegneria del Vento i fenomeni aeroelastici sono classificati in cinque tipologie:

- *Vortex Shedding e Lock-in;*
- *Oscillazioni per Galloping;*
- *Forze di Buffeting;*
- *Divergenza Torsionale;*
- *Instabilità per Flutter.*

Mentre la divergenza torsionale costituisce un caso di instabilità statica, gli altri sono casi di instabilità dinamica

## INTERAZIONE FLUIDO-STRUTTURA

In generale l'azione del vento sulle strutture origina un sistema di forze associate alla velocità media del flusso, alla turbolenza atmosferica e alla scia vorticoso. Nella pratica progettuale, tuttavia, per disporre di un modello che descriva in termini matematici non troppo complessi l'interazione fluido-struttura, si introducono delle ipotesi semplificative sia sulla forzante esterna, che sul comportamento della struttura stessa. A questo scopo l'analisi strutturale inizia dallo studio di una struttura elastica lineare soggetta a generiche condizioni del vento turbolento, la cui velocità è schematizzata da componenti fluttuanti a media nulla sovrapposte alla velocità media del flusso. I carichi del vento sono applicati sulla struttura indeformata e l'analisi del problema è interamente svolta in ambito lineare. Di conseguenza, anche le pressioni e la risposta strutturale possono essere schematizzate in modo analogo, come somma di una componente media modificata dalla presenza di componenti fluttuanti. Da un punto di vista tecnico, il valore massimo della velocità, delle pressioni e della risposta strutturale può essere calcolato come il prodotto del valore medio per un opportuno fattore di raffica.

Esistono invece delle situazioni, dovute a instabilità aeroelastica, nelle quali le suddette ipotesi di modello a comportamento lineare non sono più valide. In questi casi, accanto alle forzanti usuali nascono forze aerodinamiche auto-eccitate, che agiscono sul corpo in conseguenza del suo stesso moto, accoppiando i rispettivi moti del fluido e della struttura. Il fluido, imprimendo una forza, causa la deformazione della struttura, che di conseguenza provoca moti nel fluido e cambia la propria esposizione al flusso, con conseguente variazione delle forze esercitate dal fluido stesso.

In altri termini, nei fenomeni aeroelastici il flusso d'aria e le conseguenti forze di interazione fluido-struttura risultano completamente modificate dal moto della struttura stessa.

Lo studio dei fenomeni aeroelastici viene condotto mediante l'utilizzo di modelli analitici ed empirici, descritti da un numero di parametri sufficienti per cogliere le caratteristiche più rilevanti dei fenomeni analizzati. I modelli empirici sono utilizzati solamente per la previsione di effetti aeroelastici nell'ambito della teoria dell'analisi bidimensionale, facendo quindi riferimento ad un'opportuna sperimentazione in galleria del vento. Essi possono venire usati per la previsione di effetti aeroelastici solo se gli intervalli delle variabili adimensionali, che governano il fenomeno, sono gli stessi sia per il modello che per il prototipo.

## DISTACCO DEI VORTICI DA UN CILINDRO

Nei corpi con sezione profilata immersi in una corrente fluida, lo strato limite aderisce all'oggetto su tutta la superficie, per cui non si ha distacco di vena e, di conseguenza, non si verifica la formazione di vortici. In questo caso, sulla superficie del corpo si instaurano delle azioni tangenziali che contribuiscono in modo significativo alla forza di resistenza, mentre l'effetto delle azioni normali alla forza di resistenza da' un contributo piccolo. Al contrario, corpi tozzi (*bluff-bodies*), aventi una dimensione caratteristica  $D$ , proiettata in un piano normale alla direzione del flusso incidente, come ad esempio un cilindro a sezione circolare, sono soggetti ad una elevata forza di resistenza. Se tali corpi sono immersi in una corrente fluida di velocità  $U$  (avente una densità  $\rho$  e una viscosità dinamica  $\mu$ ), per numeri di Reynolds  $Re = \rho U D / \mu > 800 \div 1.000$  si ha formazione e distacco di vortici (*Vortex Shedding*).

Il meccanismo di distacco dei vortici nel caso dei cilindri circolari è stato largamente studiato in letteratura, e questo per il fatto che esso riveste una notevole importanza nella progettazione strutturale di ciminiere e camini industriali. Su queste strutture la concentrazione di vorticità di segno opposto in nuclei ristretti sui contorni del corpo produce, all'esterno di tali zone, velocità rotatorie rilevanti e quindi una forte forza di resistenza causata dall'alto contenuto energetico della scia.

Il distacco di vena che si instaura su tali profili crea una sia di vortici alternati che produce forze di resistenza e di portanza variabili nel tempo, anche se la velocità della vena incidente ha modulo e direzione costante. Infatti, a causa delle asimmetrie che la scia produce nel campo di velocità e di pressione, insorgono forze di direzione trasversale e longitudinale, variabili nel tempo con frequenza pressoché costante.

### Frequenze di Strouhal

Queste forze variabili, nel caso di profilo fermo, hanno caratteristiche aleatorie con densità di potenza spettrale che presenta un picco in corrispondenza di una particolare frequenza  $f_s$ , detta *frequenza di Strouhal*, definita dalla seguente relazione:

$$(1) \quad f_s = \frac{S_t U}{D}$$

dove  $S_t$  è una costante, detta *Numero di Strouhal*, caratteristica del corpo. Per cilindri a sezione circolare la configurazione del flusso è caratterizzata da una doppia schiera di vortici controrotanti che si distaccano alternativamente dalla superficie e vengono convogliati a valle dalla corrente.

### Influenza del numero di Reynolds

Per  $50 < Re < 150$  questa struttura è molto ben organizzata e prende il nome di scia di Von Karman, in quanto fu proprio T. Von Karman a darne per primo una formulazione matematica nel 1912. Secondo questa teoria, la scia può essere stabile soltanto quando il rapporto tra la distanza media tra i vortici e il diametro  $D$  vale 3,56. Questo dato non è perfettamente confermato dagli esperimenti, in quanto trascura la viscosità del fluido e le dimensioni spaziali dei vortici (che Von Karman ha supposto puntiformi). Molto più rilevante è il fatto sperimentale che i vortici si distaccano con una frequenza tale che il numero di Strouhal  $S_t$  mantiene un valore pressoché costante, e molto prossimo a 0,2. Dalla relazione (1) è quindi possibile determinare la frequenza di distacco dei vortici, note la velocità  $U$  e il diametro  $D$ . È da notare che questo risultato si estende anche ben al di là del campo di valori di  $Re$  citati: il vortex shedding si verifica fino a valori di  $Re$  molto grandi, anche se in tal caso  $S_t$  tende a passare da 0,2 a 0,3. La differenza rispetto ai numeri di  $Re$  sopracitati è che al flusso di scia è ora sovrapposto molto disturbo, e pertanto soltanto una analisi del segnale può mettere in evidenza il dominio di una data frequenza su tutte le altre. Per valori di  $Re \approx 10^6$  il flusso è pienamente stocastico e l'energia distribuita su molte frequenze.

## CASO DEL CILINDRO FLESSIBILE

Comunque, per quasi tutti i valori di  $Re$  il campo è periodico con una ben determinata pulsazione. Poiché la circolazione complessiva del campo deve rimanere costante, il rilascio dei vortici nella scia implica, secondo il teorema di Lagrange-Thompson, che la circolazione intorno al cilindro varia. Per il teorema di Kutta-Jukowsky si ha che anche la portanza sul cilindro varia nel tempo, e precisamente con la stessa legge periodica del distacco dei vortici:

$$(2) \quad F_P(t) = F \sin(2\pi f_s t)$$

Se si suppone che il cilindro abbia una massa  $M$  e sia supportato elasticamente da una molla di rigidezza  $K$ , si pone il problema di evitare che la frequenza  $f_s$ , o suoi multipli, della forza di portanza  $F_P(t)$  non sia troppo vicina alla frequenza propria  $\omega_0 = (K/M)^{1/2}$  del sistema meccanico. Un'analoga considerazione vale per la forza di resistenza  $F_R(t)$ , con la differenza che questa pulsa con frequenza  $2f_s$ , ossia doppia di quella di  $F_P(t)$ . Ci si rende conto di questo notando che, mentre è necessario che si sia compiuto il distacco di due vortici controrotanti affinché la portanza compia un'oscillazione completa, è sufficiente il distacco di un solo vortice di ogni schiera per generare il pericolo della resistenza. L'entità della resistenza è tuttavia inferiore a quella della portanza e perciò meno influente. Quando l'oggetto è libero di vibrare in direzione ortogonale alla vena, se la frequenza propria di vibrazione del corpo  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  coincide con la frequenza  $f_s$ , esso, eccitato in risonanza, inizia ad oscillare.

Mentre nel caso di cilindro fisso il distacco di vortici avveniva disordinatamente nelle varie sezioni lungo il profilo originando forzanti aleatori, ora in tali condizioni per effetto della vibrazione esso si sincronizza con la vibrazione stessa. La conseguenza è che si genera una forza non più aleatoria, ma quasi armonica, con frequenza sincronizzata con la vibrazione. Si verifica cioè un sincronismo tra il distacco dei vortici e l'oscillazione che aumenta l'intensità della forza alternata di portanza. Tale sincronismo si mantiene anche se la velocità  $U$  della vena cambia in un certo intervallo di tempo, detto campo di sincronismo. Nel caso del corpo cilindrico il campo di sincronismo varia da  $0,9 \cdot U_s$  a  $1,3 \cdot U_s$ , essendo

$$(3) \quad U_s = \frac{f_0 D}{S_t}$$

la velocità della vena in condizioni di risonanza. In risonanza le forzanti aerodinamiche esistono anche in assenza del moto del corpo e possono esserne la causa soltanto se le loro frequenze (o multiple di queste) cadono in vicinanza delle frequenze proprie del sistema. Quest'ultimo non deve avere necessariamente sezione circolare: altre forme (rettangolari, ellittiche ecc...) possono creare analoghi problemi, anche se ad altri valori di  $S_t$ . È importante specificare che il fenomeno del sincronismo, aumentando l'intensità delle forze alternate, può provocare vibrazioni di elevata ampiezza, che possono raggiungere cicli limiti dell'ordine delle dimensioni dell'oggetto stesso.

Dal punto di vista strutturale, la sezione circolare resta, tuttavia, una delle più pericolose, non solo per le strutture snelle, ma anche per quelle più tozze: si ricorda a tal proposito l'incidente verificatosi nel 1965 alla centrale elettrica di Ferrybridge in Inghilterra, nel quale tre delle otto torri di raffreddamento furono completamente distrutte per effetto del vortex shedding.

### FENOMENO DI SINCRONISMO (LOCK-IN)

Dalla relazione di Strouhal si ricava che  $f_s = S_t U/D$ , ovvero la frequenza di distacco dei vortici varia linearmente con la velocità  $U$  della corrente incidente. In condizioni di risonanza ( $f_s = f_0$ ), come detto, si verifica il sincronismo tra il distacco dei vortici e la vibrazione della struttura. Tale sincronismo, tuttavia, si mantiene anche se la velocità della vena varia in un certo intervallo di sincronizzazione: questo fenomeno di risonanza è chiamato *lock-in*.

Nell'intervallo di sincronizzazione viene dunque violata la relazione di Strouhal, poiché la frequenza di distacco resta costante (eguale alla frequenza naturale della struttura) all'aumentare della velocità del vento. L'ampiezza di oscillazione del corpo tozzo si stabilizza al crescere della velocità nell'intervallo di sincronizzazione, indipendentemente dal valore dello smorzamento strutturale: si tratta quindi di oscillazioni auto-limitanti. Normalmente si osserva un'ampiezza pari ad una frazione della dimensione  $D$ , mentre le massime oscillazioni in regime di sincronizzazione avvengono per valori del parametro dimensionale  $U/f_0 D$  (*velocità ridotta*) dipendente dalla forma della sezione. Alla fine dell'intervallo di sincronizzazione, la frequenza di distacco passa bruscamente al valore previsto dalla relazione di Strouhal.

Il lock-in è caratterizzato anche da un altro aspetto molto importante: la risposta di un corpo tozzo in sincronizzazione presenta effetti isteretici. In certi intervalli di velocità  $U$  sono possibili due stati di oscillazione stabili per un singolo valore della velocità ridotta. Tale effetto isteretico è indipendente dallo smorzamento meccanico del sistema e può non essere presente per alti valori di smorzamento. Inoltre le forze fluttuanti di portanza su un cilindro oscillante in condizioni di sincronismo sono fortemente maggiorate rispetto ai valori del cilindro fisso. Infine si osserva che il moto del cilindro in condizioni di sincronizzazione può incrementare la resistenza media ed alterare la fase, la sequenza e il percorso dei vortici nella scia, con particolare riduzione di lunghezza della regione di formazione dei vortici. Da tutti queste proprietà si evince come il fenomeno del lock-in sia fortemente non lineare.

### CONSIDERAZIONI SULLA MODELLAZIONE MATEMATICA

Una descrizione matematica esatta e completa del fenomeno delle vibrazioni indotte dal distacco dei vortici dovrebbe tenere conto della circolazione del fluido attorno a corpi tozzi fissi, e delle modifiche indotte dall'interazione fluido-struttura per corpi flessibili. Una tale modellazione comporterebbe in realtà il coinvolgimento dell'equazione dinamica del moto della struttura, accoppiandola con le equazioni della fluidodinamica di Navier-Stokes, in presenza di un contorno soggetto a moti arbitrari. La difficoltà di soluzione di questo problema è tale da avere determinato lo sviluppo di numerosi modelli matematici semplificati, in grado di tenere in conto gli aspetti fisici essenziali del fenomeno. Ovviamente nessun modello analitico soddisfa completamente la descrizione della risposta di un corpo tozzo elastico soggetto al vortex-shedding. Tutti i modelli matematici semplici, spesso empirici, sono dedotti per la previsione della risposta trasversale di un corpo rigido supportato da molle lineari e immerso in una corrente fluida di velocità uniforme  $U$ , vincolato a muoversi soltanto in direzione perpendicolare al flusso.

I modelli proposti possono essere raggruppati in due categorie a seconda di come viene specificata la forzante. La prima categoria include i modelli ad un solo grado di libertà, in cui la forzante contiene termini dovuti al distacco alternato dei vortici, mentre la seconda riguarda i modelli che simulano l'effetto fluido-elastico utilizzando un oscillatore meccanico per rappresentare il fluido. I modelli ad un solo grado di libertà sono i più utilizzati in ambito progettuale per la maggiore semplicità e sono interessati al calcolo dell'ampiezza di picco dell'oscillazione. I modelli ad oscillatore fluido accoppiato offrono in generale una migliore descrizione dell'interazione fluido-struttura, cercando di ritrovare le caratteristiche tipiche della sincronizzazione.

### Necessità della simulazione numerica

Accanto ai modelli analitico-empirici e alla sperimentazione in galleria del vento, lo studio del vortex-shedding viene oggi affrontato anche mediante l'utilizzo di sofisticatissime tecniche di simulazione numerica agli elementi finiti nell'ambito della *Fluidodinamica Numerica (CFD)* (si vedano le immagini della Figura 1).

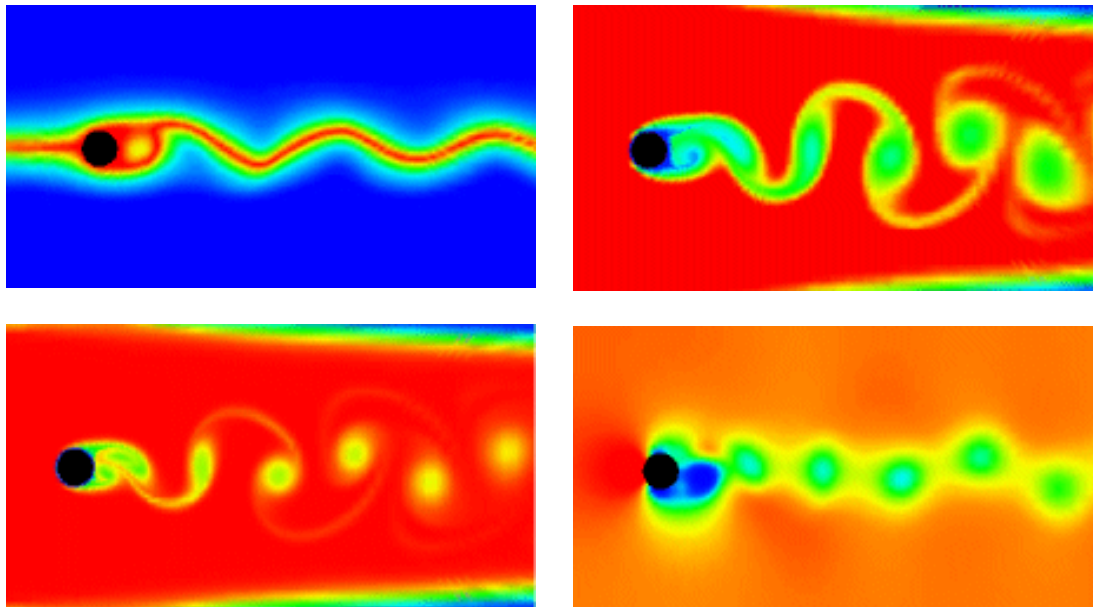


Figura 1

Esse permettono di visualizzare la formazione e l'evolversi della scia vorticoso dietro l'oggetto investito dalla vena fluida, consentendo di valutare il campo di forze, e il relativo stato tensionale, sull'oggetto stesso. Tale metodologia di analisi, come detto, non sostituisce completamente la verifica sperimentale in galleria del vento, che rimane comunque, quando possibile, l'approccio preferenziale, ma ne costituisce un valido strumento di integrazione per l'interpretazione dei risultati in sede progettuale.