

ASPETTI GENERALI DELL'INGEGNERIA DEL VENTO NELL'AMBITO DELL'INGEGNERIA CIVILE

Marco BOZZA *

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

INTRODUZIONE

L'*Ingegneria del Vento* (*Wind Engineering*) è quella branca dell'Ingegneria che si occupa dello studio degli effetti del vento sulle costruzioni e sviluppa i criteri di progettazione tali da prevenire i danni e i disagi che il vento può causare. Prevedere il comportamento dinamico delle strutture all'azione del vento (per esempio nel caso dei ponti sospesi) è di fondamentale importanza, in quanto condiziona in maniera determinante le scelte progettuali. L'Ingegneria del Vento, come disciplina di studio dell'ingegneria strutturale, ha conosciuto negli ultimi decenni un notevole sviluppo teorico-sperimentale. L'interesse per queste ricerche è andato progressivamente aumentando in relazione all'incremento di vulnerabilità delle strutture all'azione del vento. Questa maggiore vulnerabilità delle costruzioni alle azioni eoliche è dovuta alla loro elevata flessibilità e snellezza: in questa ipotesi le strutture sono generalmente poco smorzate e quindi più sensibili alle vibrazioni.

Lo sviluppo dell'Ingegneria Strutturale, infatti, consente oggi l'utilizzo sia di materiali da costruzione più resistenti di quelli impiegati tradizionalmente in ambito civile, che di tecnologie costruttive avanzatissime. Questo, grazie anche all'impiego di potenti codici di calcolo (soprattutto agli elementi finiti), permette di sfruttare i materiali in condizioni limiti e di operare con margini di sicurezza minori. Tuttavia, all'aumento di flessibilità per alcune tipologie di strutture (ponti sospesi, antenne per telecomunicazioni) non deve corrispondere solamente un pari incremento di resistenza meccanica, ma vi dev'essere anche una notevole resistenza ai possibili *fenomeni aeroelastici*. Ciò è dovuto al fatto che costruzioni aventi particolari morfologie strutturali sono interessate da fenomeni di interazione tra il moto dell'aria e quello conseguente della struttura (ad esempio il *flutter* per i ponti sospesi ed il *lock-in* per le antenne snelle). La comprensione generale di quest'ultima problematica costituisce uno degli aspetti maggiormente caratterizzanti l'Ingegneria del Vento.

Lo studio dell'interazione fluido-struttura è attualmente oggetto di complesse ricerche, sia sul piano teorico/numerico che su quello sperimentale.

Approccio numerico

Da un punto di vista teorico il problema viene affrontato attraverso l'impiego di sofisticate tecniche di analisi numerica (metodo degli elementi finiti) che tendono a simulare i sistemi strutturali il più fedelmente possibile, per poter formulare previsioni sulla capacità portante e sulla durabilità. Accanto alla corretta modellazione delle proprietà strutturali in senso stretto, e quindi anche delle eventuali non linearità (sia per geometria che per materiali), per le strutture dinamicamente eccitabili si pone anche il problema della simulazione del vento come fenomeno naturale, dinamico, aleatorio. Nel caso di strutture snelle, sensibili all'azione del vento, risulta quindi indispensabile integrare i modelli computazionali delle strutture con quelli di simulazione del vento. Per questo motivo l'Ingegneria del Vento si avvale, in condizioni di vento di elevata turbolenza, anche di complesse procedure numeriche sviluppate nell'ambito della *Fluidodinamica Computazionale* ovvero CFD (*Computational Fluid-Dynamics*).

Approccio sperimentale

Qualora risulti indispensabile valutare una corretta quantificazione delle azioni e degli effetti del vento turbolento su costruzioni di rilevante impegno strutturale, accanto ad un'analisi numerica del complesso fluido-struttura si affianca anche un approccio sperimentale. Il ricorso alla sperimentazione avviene fondamentalmente utilizzando modelli in scala in *galleria del vento*. I risultati consistono nella misurazione degli effetti indotti dal vento incidente su modelli in scala, in modo da soddisfare le condizioni di similitudine geometrica imposta dal flusso generato. La riproduzione in scala riguarda, oltre l'oggetto direttamente investito dall'azione del vento, anche le altre costruzioni o ostacoli presenti nelle immediate vicinanze dello stesso, in modo da riprodurre correttamente le condizioni locali di flusso nella zona di interesse. Le misurazioni che vengono effettuate sono generalmente volte alla caratterizzazione delle azioni globali sulla struttura o alla valutazione delle azioni locali, valutate in campo dinamico, attraverso la misurazione della pressione istantanea in più punti della struttura stessa.

FENOMENOLOGIA DEL VENTO TURBOLENTO

La turbolenza può essere definita come una condizione di flusso irregolare in corrispondenza della quale le diverse proprietà che la definiscono (velocità, densità, temperatura, ecc.) mostrano una variazione casuale rispetto al tempo e allo spazio, cosicché è possibile individuare valori medi statisticamente distinti di tali proprietà. Esistono, a livello macroscopico, due tipi di turbolenza:

turbolenza di parete (*wall turbulence*): è quella generata dalle forze di attrito su pareti fisse (ad esempio per flussi intorno a corpi)

turbolenza libera (*free turbulence*): è quella generata dal moto di strati di fluido con differenti velocità l'uno sull'altro, ovvero l'uno attorno all'altro.

In generale, nel caso di flussi viscosi gli effetti della viscosità si traducono nella conversione di energia cinetica in energia termica: dunque i flussi turbolenti sono dissipativi per loro natura, e quindi rotazionali. La turbolenza nasce per la formazione di vortici e la dissipazione ha luogo essenzialmente in quelli di piccole dimensioni. Altro effetto della viscosità è quello di rendere la turbolenza più uniforme e meno dipendente dalla direzione del flusso. Al limite la turbolenza può avere la stessa struttura quantitativa in tutte le parti del campo fluido: in tal caso essa è detta **turbolenza omogenea**. Si definisce invece **turbolenza isotropa** quella per cui le sue proprietà statistiche non mostrano nessuna direzione privilegiata. In tal caso non si genera uno sforzo tangenziale medio e, di conseguenza, un gradiente di velocità: ciò significa che la velocità è costante in tutto il campo. In tutti gli altri casi, in cui cioè è presente un gradiente della velocità media, si ha **turbolenza non-isotropa**. Poiché il gradiente della velocità media è associato alla generazione di uno sforzo tangenziale medio, in questo caso si ha la **turbolenza da sforzo tangenziale**. La turbolenza libera e quella non isotropa ricadono in questa classe. In funzione del tempo, poi, il flusso turbolento può essere di due tipi:

• **flusso turbolento stazionario**: le fluttuazioni turbolente sono sovrapposte a valori medi, costanti nel tempo, delle grandezze termo-fluidodinamiche (in particolare della velocità);

• **flusso turbolento non-stazionario**: le fluttuazioni turbolente sono sovrapposte a valori medi che nel tempo non sono costanti.

La turbolenza come processo stocastico

I modelli dinamici investiti dal vento turbolento sono soggetti a un campo di forze aerodinamiche (eccitazioni) di tipo aleatorio: tali eccitazioni sono non deterministiche, ovvero il valore assunto dalle stesse, ad un generico istante di tempo, non può essere conosciuto a priori, se non in termini probabilistici. Quando le forze aerodinamiche godono di queste proprietà, si dice che esse definiscono un *campo di flusso in regime turbolento*. Tale fonte di eccitazione induce sul sistema una risposta in termini di spostamenti, accelerazioni e un corrispondente stato di sollecitazione anch'esso di natura aleatoria. Quest'ultimo va analizzato con particolari tecniche al fine di definire, il comportamento (risposta) del sistema stesso. Tale analisi va condotta mediante lo studio delle vibrazioni random, utilizzando la *Teoria dei Processi Stocastici*.

Le problematiche connesse con le eccitazioni aleatorie non possono essere naturalmente analizzate su basi deterministiche, ma è necessario un approccio statistico, ovvero probabilistico, in cui sia l'eccitazione sia la risposta del sistema a tale eccitazione siano definibili in funzione di alcuni parametri statistici. La turbolenza, come fenomeno random, infatti, mostra una regolarità statistica nel senso che, pur essendo le diverse storie temporali differenti tra loro, alcune grandezze medie rimangono costanti. In tal caso la turbolenza e la risposta che essa induce sul sistema sono considerati come processi stocastici che possono essere descritti da pochi parametri statistici, e da funzioni statistiche opportune, come ad esempio la *funzione densità di potenza spettrale*.

Un *processo stocastico* può essere definito come una famiglia di funzioni di un parametro (il tempo) che rappresentano possibili realizzazioni di uno stesso fenomeno fisico, e sono quindi correlabili in senso probabilistico. Alternativamente, per ogni valore del parametro, il processo stocastico corrisponde ad una distribuzione di una variabile aleatoria. Più in particolare si introduce anche l'ipotesi che la turbolenza possa essere considerata come un *processo stocastico stazionario ed ergodico* (tale ipotesi permette una notevole semplificazione della trattazione analitica del fenomeno).

RISPOSTA STOCASTICA NEL DOMINIO DEL TEMPO

La moderna analisi strutturale, grazie alla disponibilità di risorse di calcolo ad elevata potenza, tende a realizzare simulazioni le più realistiche possibili, per poter formulare previsioni sulla capacità portante e sulla durabilità dei sistemi strutturali. Accanto alla corretta modellazione delle proprietà strutturali, e quindi anche delle eventuali non linearità, sia geometriche (grandi spostamenti) che fisiche (materiali oltre il limite elastico lineare), per le strutture dinamicamente eccitabili si pone anche il problema della simulazione dei fenomeni naturali dinamici aleatori (vento, sisma, ecc...). Nel caso di strutture particolarmente sensibili all'azione del vento (strutture snelle), è necessario quindi procedere all'integrazione dei modelli computazionali delle strutture, con i modelli di simulazione della generazione della storia temporale dell'azione stocastica dovuta al vento turbolento.

Lo stato limite ultimo in campo dinamico è generalmente dominato da fenomeni non lineari assai pronunciati, per cui una verifica realistica della capacità portante ultima può essere effettuata soltanto con un'analisi nel dominio del tempo. L'analisi nel dominio delle frequenze non consente lo studio della risposta strutturale, in particolare quando la struttura investita dal vento si deforma sensibilmente. Si rende in tal caso necessario il ricorso a metodi di simulazione nel dominio temporale. Tale procedura è indispensabile anche per l'analisi di strutture soggette a fenomeni di interazione aeroelastica. In questi casi, infatti, si ha un'influenza reciproca tra l'azione stocastica del vento (causa) e la risposta stocastica del sistema (effetto) in termini di spostamenti, velocità o accelerazioni. È tuttavia doveroso precisare che l'analisi nel dominio del tempo (integrazione diretta delle equazioni del moto) costituisce di fatto un metodo deterministico, anche se si è in presenza di un'azione stocastica.

Carattere stocastico del vento

Il carattere stocastico dell'eccitazione, nel caso di vento turbolento, non rende determinabile in assoluto il valore massimo della risposta da utilizzare per il dimensionamento (V_d). Tale estremo può essere definito soltanto in base alla probabilità di superamento che si intende assegnargli, ed è funzione del *valore medio* μ_V e della *deviazione standard* σ_V attraverso la relazione:

$$(1) \quad V_d = \mu_V + g \sigma_V$$

dove g indica il "fattore di picco", il cui valore dipende dalla probabilità di superamento assegnata al valore estremo. Nel metodo del dominio del tempo, il calcolo della dispersione σ_V della distribuzione della variabile della risposta V fa riferimento ad una serie di "funzioni campione" del campo di velocità del vento (vettore di n componenti fra loro correlate, ognuna delle quali è formata da una storia temporale della velocità del vento in un punto e per una direzione), le quali vengono opportunamente trasformate, dato un modello del carico, in una serie di funzioni campione di forze aerodinamiche (un campo di storie temporali di n componenti). Da queste ultime vengono determinate, per integrazione diretta delle equazioni del moto, funzioni campione della risposta strutturale, ovvero del vettore dei processi temporali degli spostamenti della struttura. L'analisi di ognuna di queste funzioni campione fornisce un valore della dispersione:

$$(2) \quad \sigma_V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t) - \mu_V]^2 dt$$

Dalle medie di insieme delle funzioni campione si ottengono poi le statistiche dell'intero processo di risposta. I vantaggi più importanti di questa procedura sono:

- possono essere considerate non linearità sia nel modello del carico che in quello della struttura;
- il metodo rimane efficiente anche per sistemi con molti gradi di libertà;
- il comportamento strutturale risulta più leggibile;
- possono essere messe in evidenza instabilità latenti;
- il metodo ha come obiettivo la riproduzione per via numerica di una prova in galleria del vento, e quindi può contribuire ad una riduzione del numero di prove sperimentali.

Per contro, gli svantaggi consistono essenzialmente:

- in un onere computazionale elevato (anche per sistemi semplici);
- nella dipendenza della qualità del risultato dal numero e dalla lunghezza delle simulazioni numeriche;
- nella necessità che le storie di velocità del vento utilizzate siano effettivamente convergenti alle funzioni spettrali assegnate.

Procedura generale di analisi nel dominio del tempo

Più in generale, il problema viene scomposto nelle seguenti quattro fasi:

- 1) generazione di un campo multi-correlato di storie temporali della velocità del vento, con le caratteristiche spettrali assegnate;
- 2) sviluppo e messa a punto di un modello del carico aerodinamico e/o aeroelastico, per la trasformazione della velocità del vento in forza eccitante;
- 3) determinazione della risposta lineare e non lineare conseguente alla storia del carico;
- 4) elaborazione e analisi stocastica dei risultati.

Le quattro fasi, nel caso più generale, non sono indipendenti e disaccoppiate l'una dall'altra. Se si escludono gli effetti della risposta del flusso del vento incidente, la fase 1) può essere effettuata e conclusa indipendentemente dalle successive, come calcolo preliminare. Questo significa che la velocità del vento viene inizialmente generata per tutta la durata del fenomeno, senza conoscere quale sarà la risposta della struttura. Inoltre, anche la fase 2), nel caso di linearità del modello di carico (indipendenza dalla risposta), può essere condotta in modo autonomo. Al contrario, nel caso di effetti aeroelastici non trascurabili, le fasi 2) e 3) non possono essere distinte, ma sono parte di una stessa unità di calcolo.

IL CASO DEI PONTI DI GRANDE LUCE

Negli impalcati dei ponti di grande luce, le caratteristiche meccaniche e le quantità statiche e cinematiche possono essere ridotte, attraverso la teoria classica delle travi, in termini di grandezze di sezione (parametri di sollecitazione e di deformazione). Se si ipotizza che anche le caratteristiche aerodinamiche della struttura possano essere espresse attraverso quelle delle singole sezioni, la simulazione del comportamento di un modello 3D della struttura può essere basata sui risultati delle prove sperimentali in galleria del vento, effettuate su *modelli sezione*.

Questo approccio semi-empirico si sviluppa attraverso i seguenti passi operativi:

- per ogni sezione tipo di interesse viene analizzato un modello 2D in galleria del vento;
- per integrazione delle pressioni sulla superficie l'assetto aerodinamico della sezione è descritto globalmente da coefficienti aerodinamici;
- la struttura è discretizzata con modelli numerici ad elementi finiti, e ad ogni nodo è associato alla serie di coefficienti aerodinamici relativi alla sezione che esso rappresenta;
- l'azione del vento viene applicata ai nodi strutturali nella forma di storie temporali della forza provocata dalla velocità del vento;
- nel corso dell'analisi del tempo, ad ogni valore t del tempo considerato vengono calcolate le forze aerodinamiche istantanee (relative cioè alla velocità del vento a quell'istante) e la corrispondente risposta strutturale;
- infine si elaborano statisticamente le storie temporali della risposta.

L'effetto di tridimensionalità del processo di carico reale, è tenuto in conto attraverso la riproduzione della struttura di correlazione delle storie di velocità del vento, così da sviluppare un modello di calcolo spaziale sulla base del modello 3D della struttura. Quest'ultimo può essere così considerato del tutto equivalente al modello (sezione) completamente aeroelastico in galleria del vento. Nel caso specifico degli impalcati da ponte, ciò significa che i risultati di un'onerosa prova sul modello aeroelastico completo possono essere raggiunti attraverso una simulazione numerica, che parta dai risultati sperimentali ottenuti da prove su modello sezione (molto meno complesse).

Tuttavia per strutture di particolare impegno strutturale, come i ponti sospesi di grande luce, l'utilizzo della procedura numerica e di quella sperimentale in galleria del vento su modelli globali costituiscono *sempre* approcci complementari e *mai* sostitutivi uno dell'altro.