## 3.11. Azione del vento

### *3.11.1. Premessa*

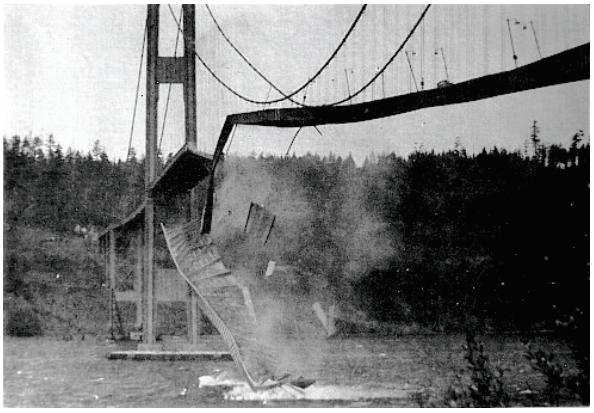
L'azione del vento è una delle azioni più importanti per le strutture caratterizzate da elevata leggerezza e deformabilità, come ad esempio:

- le tensostrutture (coperture e strutture di grandi luci),
- i lunghi ponti (fenomeno della risonanza),
- le strutture di copertura in acciaio,
- le ciminiere (distacco dei vortici che comporta notevoli oscillazioni della struttura).

Viceversa, l'azione del vento non riveste una particolare importanza nel caso di ordinarie strutture in c.a., caratterizzate da notevole peso proprio e notevole rigidezza.







Infatti, particolarmente importanti possono essere i fenomeni di interazione tra la struttura ed il vento quando questa, attraverso la sua deformabilità, possa esaltare gli effetti provocati dal vento (in genere risultano particolarmente pericolosi tutti i fenomeni legati alla concordanza di fase tra la deformazione della struttura e l'azione provocata dal vento).

Particolarmente pericolosi sono i *fenomeni di risonanza* che si possono verificare per il DISTACCO DEI VORTICI (tipico delle ciminiere) o per l'oscillazione torsionale (FLUTTER) che si manifesta nei ponti di grande luce ("INSTABILITA' AERODINAMICA").

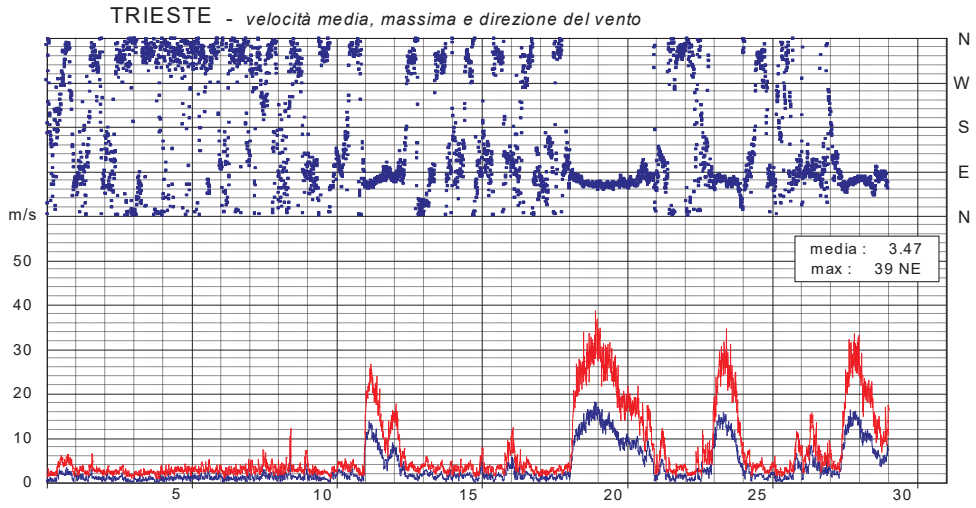
Se la struttura è RIGIDA (strutture in c.a. ordinarie), l'azione del vento può essere considerata più semplicemente come un'azione statica dovuta alla sola spinta che essa esercita sulla struttura.





## *3.11.2. Il vento*

Il vento è uno spostamento in senso prevalentemente orizzontale di una massa d'aria rispetto alla superficie terrestre ed è indotto da differenze di pressione atmosferica tra punti diversi posti alla stessa quota. Le differenze di pressione sono generalmente determinate da fenomeni termodinamici e meccanici




Tipica registrazione strumentale del vento

La forza che genera il movimento delle masse d'aria è proporzionale alla differenza di pressione a parità di distanza ed è quindi denominata "Forza di Gradiente"

$$P = m\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n}$$

La velocità del vento è inversamente proporzionale alla distanza fra i centri di alta e bassa pressione e quanto più forte è la rispettiva differenza di pressione.

In assenza di fenomeni perturbanti, i venti dovrebbero teoricamente spirare perpendicolarmente alle isobare; in realtà subiscono una deviazione a causa della rotazione terrestre, dell'irregolarità del suolo e dell'attrito (interno al vento e col suolo).

Sotto l'azione di una forza di gradiente, le masse d'aria tendono inizialmente a muoversi dalle alte alle basse pressioni, ma immediatamente, per l'effetto combinato della rotazione terrestre e della velocità delle stesse masse d'aria, subiscono l'effetto deviante della forza apparente di Coriolis $F_c$ che si manifesta sugli oggetti in movimento.

$$F_c = 2m\left(\vec{v} \times \vec{w}\right)$$





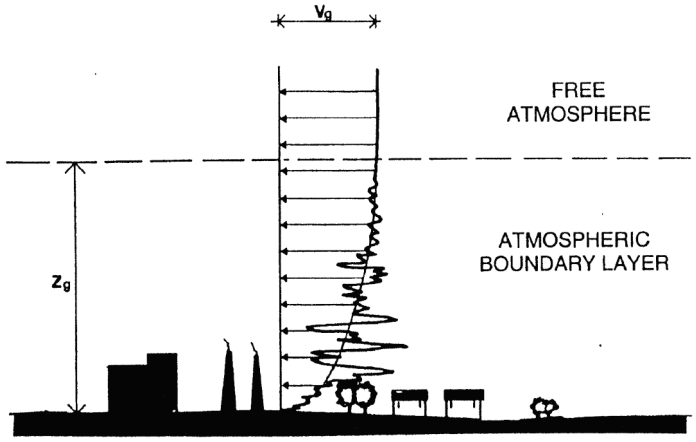
dove:

| | |
|---|---|
| v | è la velocità dell'oggetto in ogni istante tangente alla superficie terrestre; |
| w | è la velocità di rotazione della terra diretta come l'asse terrestre; |

Questa forza deviatorica apparente è tale per cui le masse d'aria, nel moto traslatorio, tendono a deviare verso destra (lasciando le basse pressioni alla propria sinistra) nel nostro emisfero e viceversa nell'emisfero australe.

Il moto di una particella d'aria, ad una quota tale da non risentire dell'attrito con la superficie terrestre, è determinato dall'equilibrio tra il gradiente di pressione P, la forza di Coriolis $F_c$ e la forza centrifuga (quest'ultima è presente nel caso di traiettoria curvilinea); la risultante di queste forze si presenta, se il moto è stazionario, sempre orizzontale e tangente ad una linea isobara, cioè ad una linea di eguale pressione.

Alle basse quote, in prossimità del terreno, l'attrito delle masse d'aria in movimento con il suolo produce un rallentamento nel movimento stesso. Questo rallentamento si trasmette, a causa della viscosità dell'aria, agli strati d'aria superiori in modo progressivamente decrescente con la quota, fino a diventare trascurabile ad altitudini che variano da qualche centinaio di metri a qualche chilometro. Tale quota determina lo spessore del cosiddetto "strato limite atmosferico", cioè dello strato d'aria che risente dell'attrito con il suolo.




L'aria direttamente a contatto con il terreno è ferma.

L'incremento di velocità da una quota a quella immediatamente superiore è molto rapida e, sempre a causa della viscosità dell'aria, si innescano moti vorticosi tali che il vento, nello strato limite, presenta un andamento turbolento.





Da un punto di vista dell'ingegneria civile lo studio delle caratteristiche del vento all'interno dello strato limite atmosferico è fondamentale, dal momento che è questo il tipo di vento che agisce sulle strutture realizzate dall'uomo.

Le variazioni della velocità del vento con la quota, ad iniziare dal valore nullo in prossimità del suolo, sono descritte dal "profilo di velocità".

Questo tipo di modellazione è valido ad una scala tale che l'entità dell'interazione con la superficie terrestre è misurabile mediante un solo parametro che prende il nome di "rugosità"; non è in sostanza in grado di descrivere il moto ventoso intorno al singolo edificio, ma solo il suo andamento generale.

### 3.11.3. Effetto del vento sulle strutture

Normalmente si distinguono 5 tipologie strutturali:

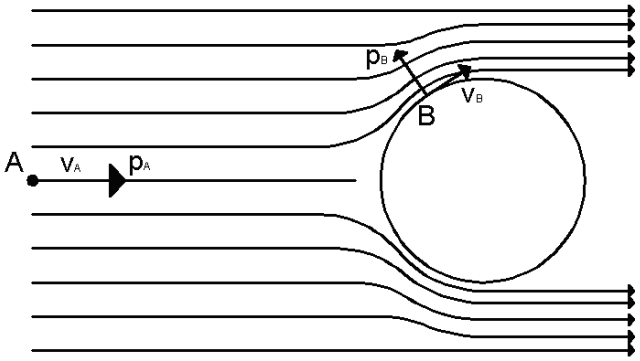
A. Strutture o elementi tanto rigidi che gli effetti del vento possono essere determinati staticamente e tanto "piccoli" che i dati sul vento si possono limitare alla velocità in un punto;
B. Strutture tanto rigide che gli effetti del vento possono essere determinati staticamente, ma tanto "grandi" da richiedere dati sulla velocità del vento in più punti;
C. Come B, ma con l'ulteriore complicazione che oltre ai dati sulla velocità del vento, bisogna tenere conto della forza delle linee e superfici di influenza delle sollecitazioni;
D. Strutture non tanto rigide da poter essere trattate con metodi statici, e richiedenti un'analisi dinamica;
E. Strutture "aerodinamiche" nelle quali il vento, i fenomeni aerodinamici ed il moto strutturale si influenzano a vicenda (il carico del vento è influenzato dal moto della struttura).





### 3.11.4. Effetto del vento su ostacolo cilindrico

Si consideri una corrente stazionaria in un fluido senza attrito (= non viscoso) che investa un ostacolo cilindrico




P.to A = punto indisturbato
($p_A$, $v_A$)

P.to B = punto sull'ostacolo
($p_B$, $v_B$)

Per il principio di conservazione dell'energia (teorema di Bernoulli)

$$\boxed{p + \rho\frac{v^2}{2} = \text{cost}}$$ ($\rho$=densità del fluido)

$$p_A + \rho\frac{v_A^2}{2} = p_B + \rho\frac{v_B^2}{2}$$

$$p_B - p_A = \frac{\rho}{2} v_A^2 \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2}\right)$$
$$= C_P \rho \frac{v_A^2}{2} \quad \text{con} \quad C_P = \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2}\right)$$

Fissate ($p_0$, $v_0$) quali caratteristiche di riferimento della zona non disturbata, si ha

$$p_A = p_0 \qquad v_A = v_0 \qquad \rightarrow \qquad p_B - p_0 = \rho C_P \frac{v_0^2}{2}$$

Il coefficiente $C_p$, chiamato *coefficiente di forma o di pressione*, varia nel tempo anche violentemente se in presenza di zone vorticose, assumendo sia valori positivi (minori di 1), sia negativi e dipende dal punto rispetto al quale viene calcolata la pressione $P_B$.

se $P_B > P_A$ $\quad 0 < C_P < 1$

se $P_B < P_A$ $\quad C_P < 0$

Inoltre la quantità $\rho \frac{v_0^2}{2}$ viene denominata "*Pressione cinetica o Pressione d'arresto*", in quanto rappresenta il salto di pressione nei punti in cui la velocità si annulla.

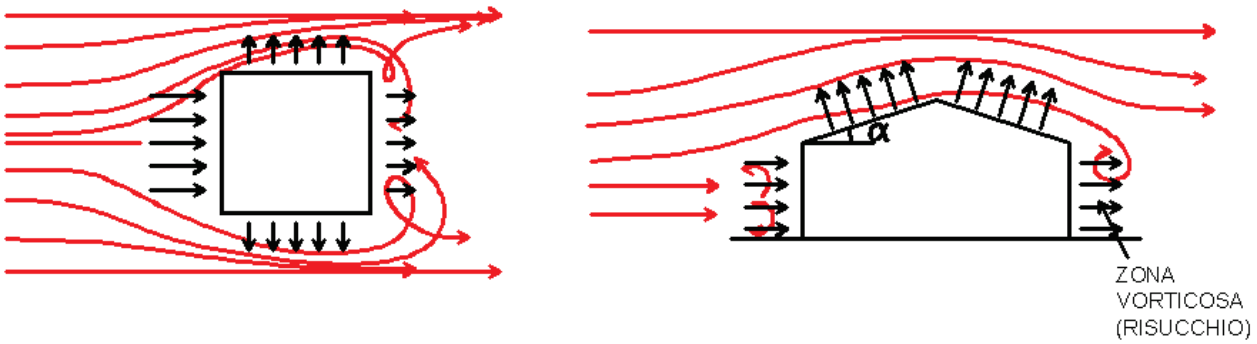




Il valore del coefficiente $C_P$ dipende essenzialmente dall'aerodinamica della circolazione del vento attorno al corpo, in altre parole dipende dalla forma del corpo e dalla posizione del punto considerato sulla superficie del corpo.

La stima del $C_P$ non è facile, per farlo è importante eseguire prove sperimentali in galleria del vento.

Se consideriamo un corpo "spigoloso" investito dal vento, cioè dal fluido "aria" in movimento, si nota come l'addensamento dei filetti fluidi in corrispondenza di un ostacolo implica necessariamente un aumento della velocità del fluido (equazione di continuità), di conseguenza una depressione sulla parete a contatto.



Nella parete sopravento invece, dove il fluido subisce una diminuzione di velocità, si avrà invece un aumento di pressione. La sovrapressione raggiunge solo raramente il valore della pressione cinetica, rimanendo in generale assai inferiore a quest'ultima. Nelle zone soggette a depressione il coefficiente $C_P$ può assumere valori negativi anche elevati (-1.7 ÷ -1.8).
Nel caso di una copertura a falde, al variare della pendenza $\alpha$, la falda può risultare in depressione ($\alpha<20°$) o in pressione ($\alpha>20°$).

Il comportamento del vento entro lo strato limite dipende in modo rilevante dalla presenza di ostacoli e dal numero di Reynolds. La presenza di un ostacolo e la velocità del vento, influenzano in modo rilevante il moto del fluido che può essere + o – turbolento.

Superata la condizione di "moto laminare", si forma un sistema di vortici che dissipano l'energia in eccesso non dispersa per deformazione viscosa. L'entità della possibile deformazione viscosa prima dell'innesco della turbolenza viene regolata dal *rapporto tra la forza d'inerzia del vento agente* $\rho v^2 l^2$, dovuto alla massa d'aria che scorre per una certa estensione l di deformazione



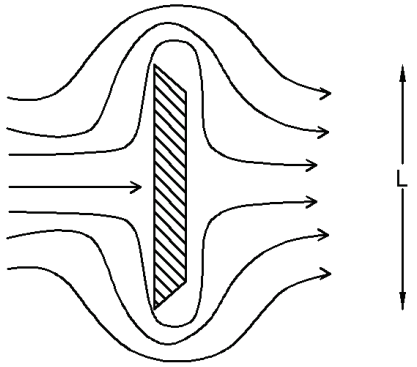


relativa rispetto allo strato inferiore, *e la sua forza di trascinamento viscoso* $\mu v l$, cioè dal cosiddetto "Numero di Reynolds":

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot l^2}{\mu \cdot v \cdot l} = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu}$$

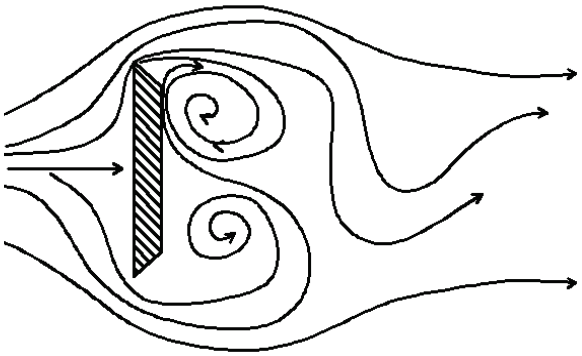
dove:

| | |
|---|---|
| $\rho$ | è la densità dell'aria (pari a 1.25 kg/m$^3$ al livello del mare), |
| $\mu$ | è la viscosità dinamica dell'aria, |
| l | è una misura spaziale caratteristica del fenomeno (la lunghezza di una superficie, il diametro di un oggetto, una misura geometrica indicativa del volume d'aria coinvolto, ecc.). |




Re < 0.3

- Moto laminare (prevalgono i fenomeni viscosi)
- Assenza di vortici
- I filetti fluidi rimangono aderenti alla superficie

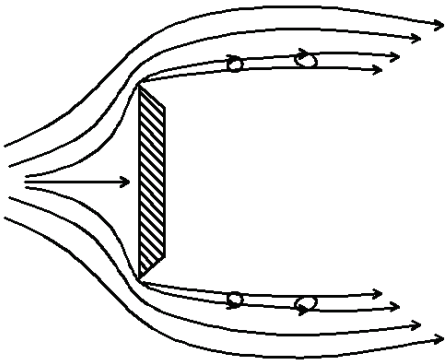


Re ≅ 250

- I filetti fluidi si distaccano dalla superficie
- Inizio fenomeno "distacco dei vortici"
- Presenza di azioni impulsive sulla struttura
- Vortici non più simmetrici e si alternano ciclicamente. Inoltre essi vengono trasportati lungo la scia.



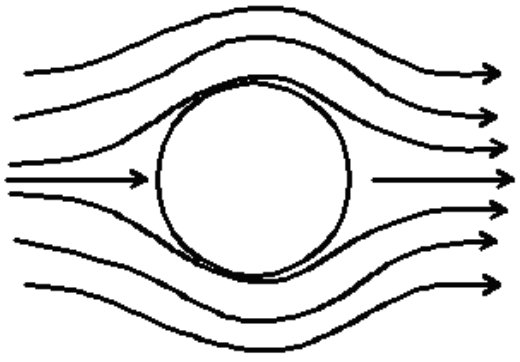




Re > 1000

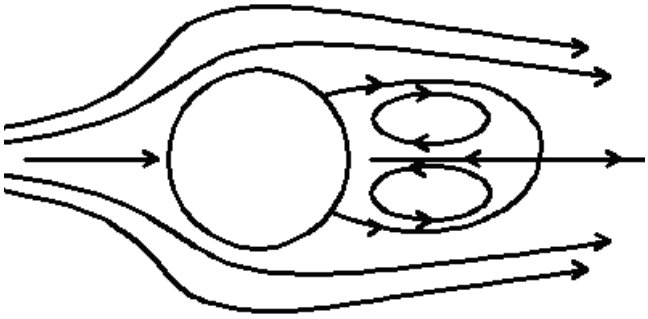
- I due bordi esterni formano uno "strato di taglio" consistente in una serie di piccoli vortici che separano la regione della scia dalla adiacente regione a flusso laminare.
- Prevalgono le forze di inerzia.

Se si considera il caso di un cilindro circolare (ciminiera) si hanno i seguenti casi:



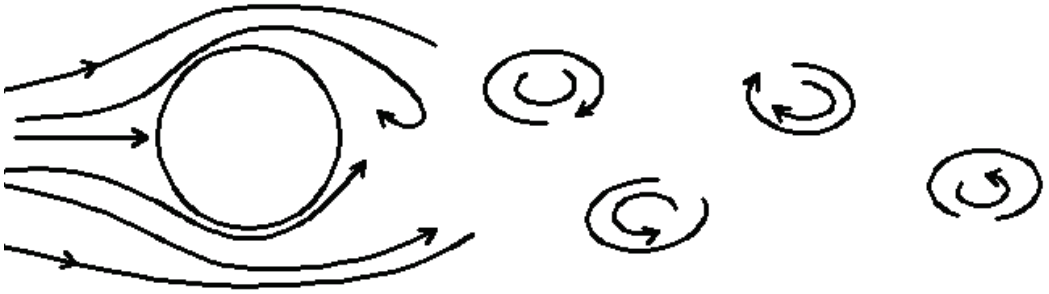
Re = 1

- Moto laminare (prevalgono i fenomeni viscosi)
- Assenza di vortici
- Il flusso rimane aderente al cilindro senza distacco della vena fluida



Re ≅ 20

- Inizio distacco della vena fluida
- Formazione di due grandi vortici simmetrici attaccati alla superficie del cilindro
- Può essere ancora trattato come un *fenomeno statico*



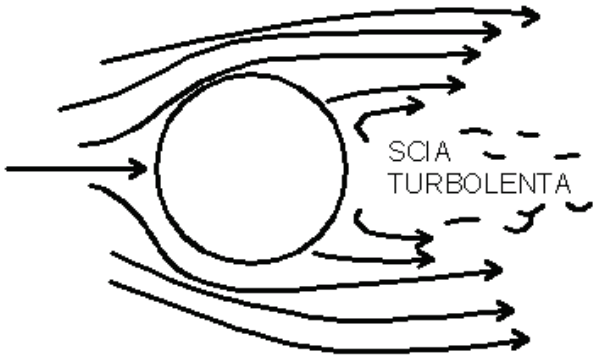
30 < Re < 5000

- Lo strato limite rimane laminare fino al punto di distacco che avviene a circa 80° dal punto di stagnazione



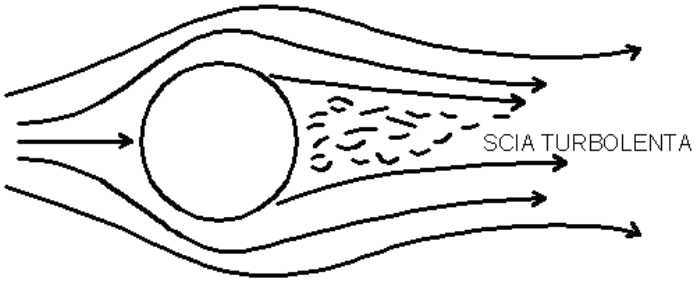


- Si formano alternativamente vortici regolari che danno luogo ad una scia, detta scia di Von Karman (1911), ampia e NON turbolenta
- Al distacco di ciascun vortice si crea una forza ortogonale alla direzione del vento: maggiore è v, maggiore è la frequenza del distacco dei vortici che se si avvicina alla frequenza della struttura, dando origine ad una risonanza che fa oscillare la ciminiera; il fenomeno diventa dinamico.




Re > 5000

- Lo strato limite diventa turbolento
- La scia vorticosa diventa turbolenta, si restringe e si avvicina al corpo




Re > 200000

- La scia turbolenta si attacca al corpo

Questi ultimi due casi generalmente riguardano il campo dell'aeronautica e non il campo civile.





### *3.11.5. Cenno ai fenomeni aeroelastici*

Negli ultimi decenni sono state condotte numerose ricerche sul tema delle vibrazioni auto-eccitate o aeroelastiche di copri cilindrici immersi in una corrente fluida bi-tridimensionale. L'interesse per queste problematiche è via via aumentato in virtù dei numerosi casi di strutture investite da tali fenomeni; le principali cause posso essere:

- utilizzo di materiali da costruzione in condizione limite
- strutture caratterizzate da snellezze e flessibilità molto elevate
- strutture poco smorzate

I tipici fenomeni aeroelastici,

Distacco di vortici,

Galloping,

Divergenza torsionale,

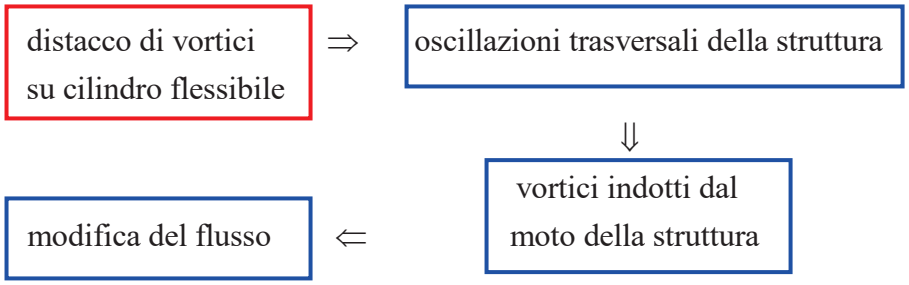
Flutter,

sono trattati separatamente in letteratura, nonostante concettualmente siano molto simili fra loro.

## Distacco di vortici

Questo fenomeno risulta particolarmente importante in presenza di strutture snelle e costruzioni cilindriche. Viceversa, nel caso di strutture rigide risultano più importanti gli effetti di resistenza e portanza.

Nel caso di strutture sufficientemente deformabili (ponti, ciminiere, torri, condotte offshore) si può avere:




Quando i vortici si staccano da un cilindro flessibile provocano oscillazioni trasversali con evidente effetto di interazione fluido – struttura. In particolare se la frequenza di distacco $\nu_s$ è prossima alla frequenza naturale della struttura, si ha il fenomeno della risonanza ed in particolare della sincronizzazione: cioè quando l'oscillazione cattura il processo di distacco di vortici originando un fenomeno di amplificazione.





## Galloping

Le oscillazioni galoppanti (galloping) sono un tipico fenomeno di instabilità aerodinamico di strutture snelle eventi sezione NON CIRCOLARE.

In corrispondenza di una velocità detta $v_{critica}$ si possono avere oscillazioni di grande ampiezza a frequenze molto minori di quelle corrispondenti al distacco dei vortici. Avviene quando la forma del corpo è tale che un piccolo movimento trasversale o torsionale provoca un'asimmetria dei due flussi tangenziali; ciò comporta un carico di pressione oscillante sul corpo che può amplificare il moto iniziale del corpo, originando la cosiddetta instabilità per oscillazioni galoppanti.

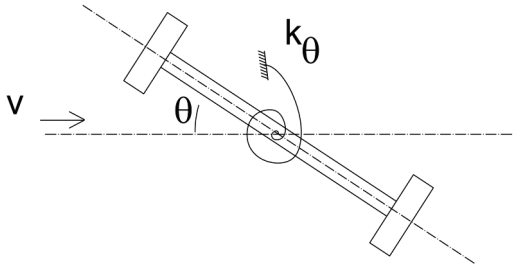
Solitamente si riscontra in edifici alti, elementi isolati, pali d'illuminazione e linee aeree quando la formazione di ghiaccio in inverno genera una sezione diversa da quella circolare.

## Divergenza torsionale

La divergenza torsionale è l'unico fenomeno aeroelastico che NON presenta caratteristiche oscillatorie: è sostanzialmente un'instabilità statica legata alla perdita di rigidezza del sistema (analogamente all'instabilità delle colonne metalliche o *buckling*).

In generale, il fenomeno è presente ad elevate velocità del fluido e spesso riguarda strutture aerodinamiche (profilo alare), ma anche strutture aventi un profilo simili come l'impalcato da ponte.

Si consideri un *impalcato da ponte* avente una elasticità torsionale $k_\theta$ concentrata e $\theta$ angolo di torsione del profilo, come in figura.








All'aumentare della velocità del vento, il momento torcente aumenta e torce ulteriormente la struttura; di conseguenza, a causa dell'aumento dell'angolo di attacco $\theta$, aumenta il momento stesso. Tale interazione prosegue fino a che non si raggiunge una velocità limite in cui il momento indotto dal vento crea un'instabilità statica non equilibrata dalla rigidezza torsionale del profilo dell'impalcato: la struttura diverge ruotando fino alla distruzione.

## Flutter

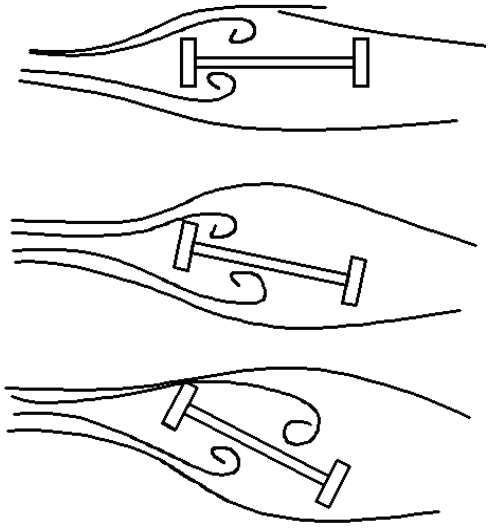
È un tipico fenomeno aeroelastico di auto-eccitazione delle strutture, caratterizzato da una componente significativa di tipo torsionale.

A causa di un moto iniziale di ampiezza limitata (ad esempio un disturbo iniziale causato da un vortice non simmetrico) si può avere un decadimento (smorzamento) o una divergenza (amplificazione dell'effetto) del moto, a seconda che l'energia di input dal fluido sia minore o maggiore dell'energia dissipata dalla struttura attraverso lo smorzamento meccanico.

La linea teorica di separazione tra il moto di decadimento e il moto di divergenza è la condizione critica di flutter.

È un fenomeno che interessa strutture a ponte di grandi luci o molto leggere (come le passerelle) in quanto possiedono il *primo modo di vibrare di tipo torsionale*.

La struttura, soggetta ad un vento ed a causa di asimmetrie sul distacco di vortici, inizia ad oscillare verticalmente e torsionalmente assorbendo energia dal vento ed ampliando la sua oscillazione torsionale fino al collasso.







Un esempio famoso di tale fenomeno fu il crollo del Tacoma Narrow Bridge: un ponte sospeso, con luce della campata centrale di 850 m, costruito nel 1940 e crollato dopo soli 4 mesi.

Il crollo del ponte avvenne alcune ore dopo che il processo vibrazionale si era instaurato indotto da un vento praticamente costante dell'ordine di 65 Km/h e in assenza di raffiche forti ed improvvise. La velocità del vento, di entità ben inferiore a quella prevista in fase di progetto, indusse nella campata centrale oscillazioni torsionali di ampiezza inesorabilmente crescente.

La rotazione torsionale dell'impalcato raggiunse angoli superiori ai 45° rispetto all'orizzontale, causando a un certo punto la rottura di uno dei cavi di sostegno che modificò istantaneamente la configurazione dinamica della struttura stessa provocandone il collasso.

Uno dei primi studiosi ad interpretare il crollo del Tacoma Narrows Bridge mediante la teoria dell'instabilità aeroelastica fu Theodore Von Kármán.

Filmato del crollo