

## SVILUPPI STORICI

Di estremo interesse è l'evoluzione storica dell'ingegneria del vento, cioè la storia del rapporto uomo-ambiente ed in particolare di quello fra uomo e clima, uomo e vento.

Tale analisi meriterebbe una più ampia trattazione, sia per il fascino intrinseco che l'argomento possiede, sia per comprendere l'origine e l'evolversi dei problemi connessi con l'argomento.

La storia dell'ingegneria del vento può essere suddivisa in quattro fasi fondamentali:

1. dagli albori al Rinascimento;
2. dall'inizio del 600 alla fine dell'800;
3. dalla fine '800 alla prima metà del '900;
4. dalla metà del '900 ai giorni nostri.

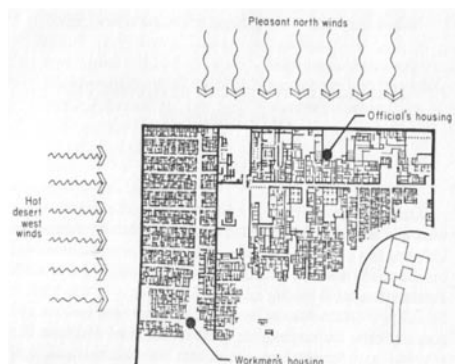


Fig. 1 Schema di distribuzione delle case a Kahun, città egizia del 2000 A.C.

Fin dagli inizi della storia l'uomo, in ogni parte del mondo, ha cercato di rapportarsi con gli elementi naturali e tra questi con il vento. Infatti è emblematica la disposizione di Kahun, città egizia del 2000 a.C. la quale fu edificata in modo da garantire al quartiere ricco della città, da un lato riparo dai venti caldi del deserto e dall'altro la possibilità di godere delle piacevoli brezze provenienti da settentrione.

Nella Cina del VI secolo a.C. le città venivano erette seguendo un principio urbanistico chiamato "Feng Shui" cioè "il vento e le acque"; questi elementi essenziali per la vita dell'uomo, uniti ad una buona illuminazione dovevano essere combinati in modo tale da razionalizzare l'ingresso dell'aria e della luce e a proteggere le abitazioni dal vento e dal freddo. È interessante notare come in antichità, evidenze fisiche si unissero a credenze mistico-filosofiche, capaci al tempo di dare giustificazione dei fenomeni fisici.

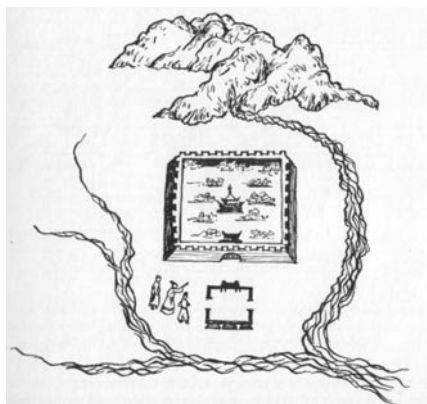


Fig. 2 Disegno Cinese in cui si mostra la disposizione della città rispetto alla posizione della montagna e dei fiumi

È di Aristotele (384-322 a.C.) un interessante esempio di studio sull'argomento, tratto da *"Meteorologia"* la prima spiegazione sull'origine del vento: *"dal riscaldamento della terra ad opera del sole si genera di necessità un'esalazione non semplice, bensì di due tipi: una più simile al vapore, l'altra più simile al soffio. L'esalazione umida è alla base del meccanismo di formazione delle nubi, della pioggia, della neve, delle sorgenti, dei fiumi, della rugiada e della brina; l'esalazione secca, altamente infiammabile, produce le comete, le stelle cadenti, i venti, i terremoti, i fulmini, i turbini, i tifoni"*.

Intorno al I-II secolo a.C. si ha in Grecia il primo esempio di strumento per la valutazione degli eventi meteorologici, con l'edificazione della prima torre dei venti, sulla cui sommità era installata una banderuola con l'effigie del dio marino Tritone.

La prima classificazione dei venti è forse dovuta a Teofrasto (ca. 300 a.C.) il quale nel *"libro dei segni"* descrive una vera e propria *"Rosa dei Venti"*, alle cui direzioni attribuisce nomi dei venti dominanti e loro caratteristiche.

Il periodo Medioevale non ha visto grandi innovazioni nell'ambito dello studio dal vento e della meteorologia, tranne che per l'introduzione dei mulini a vento, strumenti ideati in Persia e diffusi in ogni parte del mondo conosciuto: Cina, Egitto, Arabia ed infine dopo le crociate, importati in Europa.

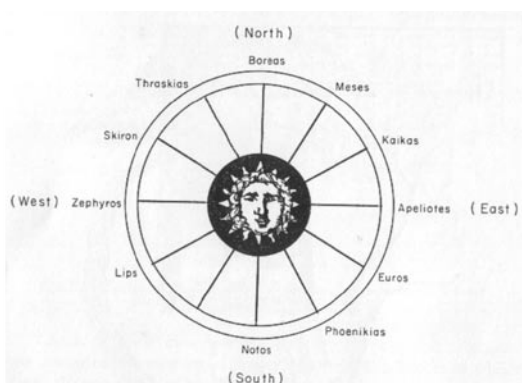


Fig. 3 Rappresentazione della prima Rosa dei Venti ad opera di Teofrasto

Come facilmente intuibile, spetta al Rinascimento il compito di destare dal torpore la curiosità dell'uomo e a rilanciare gli studi sulla climatologia.

L'Italia del Rinascimento contribuisce in modo notevole alle scoperte e al loro diffondersi, basti pensare a:

- È G.B. Alberti (1404) che, ispirandosi alle opere di Vitruvio (I secolo a.C.) fortunatamente ritrovate, fornisce lo slancio e l'interesse all'architettura e all'urbanistica nei riguardi delle condizioni climatiche e specialmente del vento; essi

trovano pratica attuazione nella edificazione delle nuove città coloniali spagnole, quale per esempio Buenos Aires (1573), il cui reticolo stradale fu orientato verso la direzione dominante dei venti.

- Leonardo da Vinci, il quale fra le altre cose, inventa il primo strumento per la misura del vento e scrive il primo trattato sulla meccanica dei fluidi: “del moto e misura dell’acqua”.
- Ferdinando II dei Medici, Granduca di Toscana, che insieme al fratello Leopoldo fonda due importanti istituzioni, quali l’Accademia del Cimento (nella quale riunisce sotto il motto “Provando e riprovando”, gli uomini più dotti d’Italia e di altri paesi, inclusi Galileo Galilei e Evangelista Torricelli) e la prima Organizzazione Meteorologica Internazionale; in più fornisce lui stesso un contributo diretto alla ricerca inventando l’igrometro.
- Galileo Galilei, che inventa il termoscopio, un rudimentale esempio di termometro;
- E Torricelli, che inventa il barometro (1643);

sempre in quegli anni, grazie anche agli studi condotti sulla variazione della pressione da parte di Blaise Pascal, si realizzarono i primi tentativi di correlare la pressione atmosferica con le condizioni meteorologiche.

Nel 1667, Hooke costruì il primo anemometro a pendolo, mentre Pitot realizzava l’omonimo tubo.

Newton (1642-1727) ritenuto il fondatore della moderna meccanica dei fluidi, scopre la legge delle tre proporzioni: “*la forza esercitata su un corpo immerso in un fluido è proporzionale all’area investita, al quadrato della velocità e alla densità del fluido*”.

Sulle orme di Newton, risultati importanti sono ottenuti da: Bernoulli, D’Alembert, Eulero, Venturi, Navier, Cauchy, Poisson, Stokes, De Saint-Venant, Poiseville, Von Helmholtz, Lord Kelvin, ed altri.

È Robinson che nel 1846 inventa il primo anemometro a coppe, una semplice ma efficace “macchina” composta da due aste disposte a croce e portanti alle cui estremità sono collocate delle cavità sferiche in lamina metallica, rivolte tutte in modo concorde; queste, investite dal vento si mettono in moto, raggiungendo una velocità tale da poter essere correlata in modo estremamente semplice con la velocità del fluido stesso.

Mentre Dini tra il 1888 e il 1889 getta le base della grande evoluzione strumentale che avrà luogo nel XX secolo, incorporando nel tubo di Pitot un congegno per la registrazione continua della velocità e della direzione del vento.

Contemporaneamente all’evoluzione strumentale e agli studi di fluido dinamica, si consolidano gli studi sulla meteorologia: Halley (1686) pubblica un’importante trattato sull’origine dei venti, affermando che questi traggono energia dall’azione dei raggi del sole sull’aria e sull’acqua durante il suo quotidiano passaggio sugli oceani.

Nel prima metà dell’800 si assiste ad un’accesa polemica con risvolti anche giudiziari fra Redfield e Espy (due meteorologi americani) sull’origine delle tempeste di vento, il primo formula una teoria rivoluzionaria: “*le tempeste di vento che colpiscono la costa americana sono in realtà grandi vortici rotanti, in senso antiorario, intorno a una*

*zona di calma*”; il secondo invece asserisce che: *“le tempeste hanno origine allorché l'aria umida, riscaldata dal calore della superficie terrestre, si innalza come stesse salendo per un camino”*. E' interessante notare come questi due brillanti scienziati abbiano speso tempo ed energie nel cercare di invalidare l'uno le teorie dell'altro, tanto da non accorgersi che in realtà avevano entrambi trovato le due metà della spiegazione del perché si originano le tempeste di vento.

Il XIX secolo segna per l'ingegneria civile l'inizio di una nuova era, si iniziano a concepire opere snelle e leggere, grazie anche all'uso di nuovi materiali dalle grandi caratteristiche meccaniche, che pongono improvvisamente gli ingegneri dell'epoca di fronte ad un problema inaspettato, l'interazione vento-struttura.

Purtroppo però, l'ingegneria di allora non era confortata da una teoria matura ed affidabile per affrontare problemi di tale natura e questo si evidenziò drammaticamente sui primi ponti sospesi che furono costruiti:

- Redgrath e Brown nel 1817 realizzano il King's Meadows Bridge (L=33,6m)
- Smith nel 1817 realizza il Dryburgh Abbey (L=79,3m) (crolla nel 1818)
- Telford fra il 1819 e il 1824 realizza il ponte sullo stretto di Menai (L=174 m), che crolla nel 1824
- Seguin nel 1824 realizza il ponte ferroviario di Tournon sul Rodano
- Brunel nel 1829 realizza il ponte sull'Avon presso Clifton (L=214m)
- Bouch nel 1878 realizza il Tay Bridge (crollato il 28 dicembre 1879)
- Sir Samuel Brown realizza il Brighton Chain in Pier (crollato 2 volte a causa di un eccessivo moto oscillatorio, 1833 e 1836)



Fig. 5 Brighton Chain Pier



Fig. 6 Foto del Tay Bridge di Bouch  
(crollato il 28 dicembre 1879)

Analizzando le tipologie costruttive di questi esempi, si osserva un comune denominatore nella imponentza e pesantezza delle torri e nella straordinaria deformabilità e leggerezza degli impalcati, i quali risultavano del tutto inadeguati alle forze orizzontali.

È comunque da annoverare un certo numero di ponti sospesi, quali tra i più famosi il ponte sull'Ohio (1867) 322 m e il famosissimo ponte di Brooklyn (1869) 284-486-286 m, entrambi progettati da Roebling e tuttora in uso.

Proprio per poter studiare l'interazione vento-struttura, alla fine del '800 compare nello scenario internazionale la “galleria del vento” uno strumento che si rivelerà in seguito estremamente potente per lo studio dei corpi immersi in un fluido.



Fig. 7 Foto del ponte sospeso sull'Ohio



Fig. 8 Foto del ponte di Brooklyn

La prima galleria del vento fu realizzata da Wenham (nel 1874, Aer. Soc., Inghilterra), sotto proposta di Irminger (1893, Danimarca) il quale voleva studiare la spinta sui profili alari.

Seguendo l'esempio di Irminger, in ogni parte del mondo furono costruite nuove gallerie del vento e si osservò un vero e proprio fiorire di ricerche sia su profili alari che su corpi tozzi, portando addirittura alla stesura di normative, per esempio quella Svizzera la quale riprese gli studi sistematici su tipologie edilizie ricorrenti.

Fin quando però nel 1956 Bailey mise in evidenza l'inadeguatezza della sperimentazione condotta su modelli di strutture, eseguita su gallerie del vento del tipo proposta da Irminger.

Questa scoperta cadde come una doccia gelata sui ricercatori di tutto il mondo, poiché in sostanza affermava che tutti gli sforzi fatti fino a quel momento, erano vani.

È lo stesso Bailey a spiegare che la ragione dell'inadeguatezza dipende dal flusso laminare uniforme che in questo tipo di gallerie si produce, del tutto diverso dal flusso di aria presente in atmosfera.

Sarà Jensen con la pubblicazione della fondamentale opera: "*Model – law : the correct model test for phenomena in the wind must be carried out in a turbulent boundary layer and the model-law requires that this boundary layer be to scale as regards to velocity profile*", a dare gli strumenti per realizzare un corretta similitudine tra flusso reale e flusso prodotto in galleria.

Se da un lato la costruzione dei ponti sospesi ha portato alla realizzazione delle gallerie del vento, gli edifici alti hanno permesso la così detta sperimentazione *full-scale*; la Torre Eiffel fu la prima costruzione sulla quale oltre tutto lo stesso progettista poté misurare la velocità del vento a 300m di altezza e gli spostamenti in sommità. In seguito, sull'esempio di Eiffel furono condotti altri studi su altri edifici alti, quali per esempio l'Empire State Building (1931) di 381m.

Di pari passo con il progredire della tecnica costruttiva, si svilupparono in quei tempi nuove teorie capaci di descrivere in modo più soddisfacente il comportamento di un certo tipo di strutture.



Fig. 9 Foto della Torre Eiffel



Fig. 10 Foto dell'Empire State Building (1931)



Fig. 11 Foto del George Washington Bridge

Tra queste ricordiamo i modelli al secondo ordine di Melan per lo studio dei ponti sospesi, con i quali successivamente Amman progettò il George Washington Bridge ( $L=1066$  m), estremamente pesante e stabile.

Da questo momento in poi, sicuri di una teoria capace di placare le perplessità dei progettisti, furono realizzate opere sempre più ardite. Ricordiamo:

- 1933-36: Moisseiff costruisce il San Francisco-Oakland Bay Bridge ( $L=704$ m)
- 1933-37: Strauss realizza il Golden Gate Bridge ( $L=1280$ m)



Fig. 12 Foto del San Francisco-Oakland Bay Bridge



Fig. 13 Foto del Golden Gate Bridge

Nel 1940 accadde però un evento che scosse il mondo dell'ingegneria strutturale: il crollo del ponte di Tacoma.

Si era verificato, sotto lo sguardo di una cinepresa un fenomeno nuovo; per la prima volta tutti i ricercatori del mondo poterono assistere alle evoluzioni inaspettate di un ponte sospeso, eccitato da un vento di poca rilevanza.

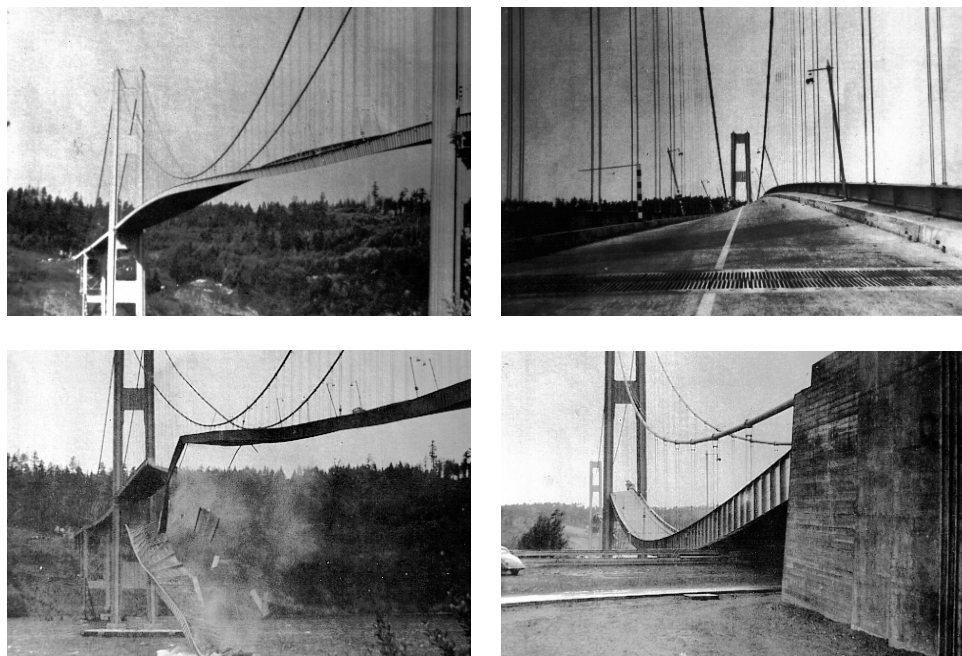


Fig. 14 Foto del ponte di Tacoma in fase di collasso

Ovviamente questo evento scatenò l'interesse di noi ricercatori, che ancor oggi, nonostante i notevoli passi in avanti e alla scoperta di modelli semplificati in grado di spiegare taluni fenomeni, non siamo ancora riusciti a risolvere il problema da un punto di vista generale.

Mentre l'ingegneria del vento ricevette stimoli importanti dalla realizzazione dei grattacieli e dei ponti sospesi, la meccanica dei fluidi raggiunse la piena maturazione:

- Reynolds, 1883: *"An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels"*
- Prandtl, nel 1904, formula il concetto di strato limite
- Grazie a V. Bjerknes nasce la meteorologia moderna
- Bjerknes e Sorberg pubblicano la teoria ciclogenetica (1919-22)
- Nasce la *Micrometeorologia* con Taylor (teoria statistica della turbolenza, concetto di scala integrale e di densità spettrale, 1915-45)
- primi processi di sintesi delle varie discipline: "Aerodynamics and the Civil Engineer", (Pagon, 1935), "Aerodynamics and the Art of the Engineer" (Von Karman, 1950)

I giorni nostri, rappresentano nella storia dell'ingegneria del vento, il periodo della maturazione intellettuale; tempi in cui la meteorologia, la microclimatologia, l'aerodinamica, la meccanica dei fluidi e la meccanica delle strutture sono discipline scientificamente indipendenti.

Gli studi sulle varie discipline viaggiano con un passo superiore rispetto alle epoche precedenti, grazie anche al progredire della tecnologia: si pensi infatti alla rete di satelliti radar immessa in orbita, che permise di effettuare il così detto *monitoraggio remoto*, consistente nella misurazione di parametri dai quali si poterono ricavare le velocità del vento e preziose informazioni sui fenomeni eolici a media e a piccola scala; fu proprio questo sistema di satelliti che nel 1961 permise a J.F. Kennedy di varare un programma di previsione del tempo ai quali parteciparono l'ONU, l'WMO e l'Int. Council Scient Unions, istituendo così una rete meteorologica internazionale.

Il 1961 è una data importante anche per l'ingegneria del vento, che vede pubblicato il lavoro di A.G. Davenport: "*The application of statistical concepts to the wind loading of structures*", il quale innescò il processo di sintesi della conoscenza fino ad allora nota, permettendo all'ingegneria strutturale di valutare l'azione prodotta dal vento in termini di densità spettrale.

Sempre sua è una intuizione fondamentale che pubblicò nel 1963: "The relationship of wind structure to wind loading", il quale basandosi sull'evidenza dello "spectral gap", permise di scomporre la velocità istantanea del vento come somma di una componente media e una fluttuazione a media nulla.

Come precedentemente accennato, la spinta propulsiva dei nostri tempi è indubbiamente l'avanzamento tecnologico e con esso il progredire delle prestazioni di calcolo dei computer che ci hanno permesso di realizzare operazioni impensabili fino a pochi anni fa, quale per esempio l'integrazione dell'equazione di Navier-Stokes o più in generale effettuare operazione di simulazione numerica.

Dal punto di vista teorico risultano di estremo interesse gli studi effettuati da Scanlan e Sabzevary nel 1967 i quali proposero il metodo delle derivate aerodinamiche per studiare il problema della instabilità aerolastica dei ponti. In seguito sempre ad opera di Scanlan, insieme a Beliveau e Budlong svilupparono la tecnica delle funzioni indiciali; mentre Davenport tra il 1977 e il 1978 propose il primo modello completo per il calcolo aerolastico della risposta dei ponti.

Infine, si scoprono nuovi fenomeni oltre al Flutter e alla Divergenza torsionale quali il Lock-in, il galloping, l'interferenza, ecc.

## LA RILEVANZA SOCIO ECONOMICA DELL'INGEGNERIA DEL VENTO

Negli ultimi decenni è cresciuta la consapevolezza che il vento rappresenta il fenomeno naturale che produce nel mondo il maggior numero di danni economici e il più elevato numero di morti ed è per questo che sono state sviluppati studi di “azzardo”, di “vulnerabilità” e “rischio” in ottica eolica.

Per dare una risposta sul perché l'ingegneria del vento ha raggiunto una importanza socio-economica così rilevante negli ultimi anni, ritengo giusto fornire alcuni dati pubblicati dalla più grande compagnia di contro-assicurazione del mondo, la Munich Re di Monaco di Baviera, la quale ha stimato che:

- ci sono stati circa 15 milioni di morti e feriti negli ultimi 1000 anni in almeno 100.000 di catastrofi naturali (siccità e carestie escluse)
- il numero delle naturali catastrofi e delle relative perdite (a causa dell'alta concentrazione di persone e di beni) è in rapido incremento
- graduale declinare del numero di morti e feriti (dovuto al miglioramento dei sistemi di allerta al pericolo e per le migliorate tecniche di protezione)
- Le perdite economiche dovute a rischi naturali:  
Sisma: 35%    Alluvioni: 30%    Tempeste di vento: 28%
- Percentuale sul totale assicurazione reclamato a causa delle catastrofi naturali:  
Tempeste di vento: 70%    Sisma: 18%    Alluvioni: 6%    Altro: 6%
- Principali cause in termini di attrezzature:  
Sisma: 47%    Tempeste di vento: 45%    Alluvione: 7%

Dai dati emerge come le tempeste di vento, producono danni dell'ordine di quelli prodotti dal sisma, fatto questo impressionante e lo è ancora di più se si pensa al fatto che il numero di eventi catastrofici sta aumentando vertiginosamente negli ultimi anni, come si evidenzia dai diagrammi riportati in figura 15 e tabella 1.

Le ragioni posso essere ricercate da un lato sulla migrazione delle popolazioni e dei beni nei territori a più alta vulnerabilità eolica, da un altro, dalla variazione del clima che ha indubbiamente modificato la distribuzione probabilistica degli eventi catastrofici, aumentandone il numero e l'intensità.

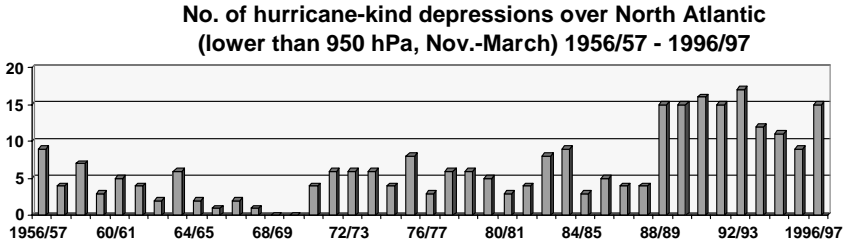


Fig. 15 Numero di Uragani verificatisi tra il 1956 e 1997 aventi un valore di depressione più basso di 950 hPa

	Decade	Decade	Decade	Decade	Factor	Factor
	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1987-1986	80s/60s	90s/60s
No. of events	8	14	31	25	3,9	3,3
Socio-economic losses	26,6	39,5	45,9	115,5	1,7	4,3
Insured losses	6,2	9,7	21,2	68,9	3,4	11,1

Tab. 1 Valori espressi in miliardi di dollari USA, livelli di prezzo del 1996

Ovviamente questo non basta a spiegare il perché di danni socio-economici così elevati, essi infatti, possono trovare giustificazione solo se si ammette che l'effetto è il prodotto di una molteplicità di cause, quali:

- troppi alloggi inadeguati ancor esistenti, i quali hanno una VULNERABILITÀ troppo alta;
- moderni edifici e strutture leggere stanno diventando più VULNERABILI;
- carenza oggettiva dal punto di vista normativo sulla valutazione del carico vento;
- mancanza di rigorose contromisure (radicali restrizioni sull'uso del territorio; prevenzione delle perdite secondarie; miglioramento dei sistemi di emergenza, previsione delle tempeste di vento; riduzione dei gas serra, mancanza di ricerca finalizzata sia in quantità e in qualità.

Per chiarire meglio quanto detto, riportiamo di seguito tre esempi di eventi catastrofici avvenuti nel 1999:

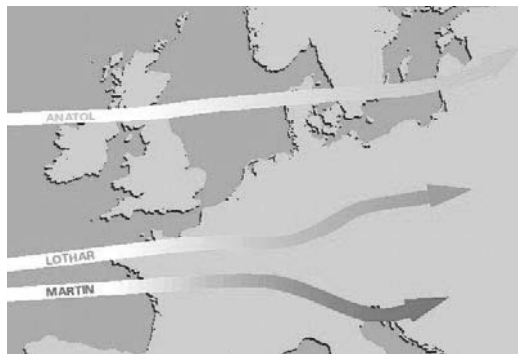


Fig. 16 Percorsi seguiti dalle tre tempeste di vento

Il primo in ordine di tempo fu Anatol il quale il 3 dicembre attraversò otto paesi del Nord Europa: Danimarca, Germania, Gran Bretagna, Svezia, Lituania, Lettonia, Russia, Polonia.

Le perdite socio-economiche stimate furono di circa 2,5 miliardi di €, dei quali solo 600.000 € risultarono assicurati.

I principali danni si ebbero alle coperture, alle facciate, ai veicoli, alle navi e alle strutture temporanee (impalcati, ecc.); per di più 165.000 case rimasero senza approvvigionamento di corrente elettrica: il più grave danno mai avvenuto alle linee elettriche pensili in Danimarca e Svezia.

La seconda tempesta di vento (Lothar) percorse Francia, Germania, Svizzera, Belgio, Austria, Italia il 26 dicembre, causando in termini socio-economici perdite pari a 11 milioni di € dei quali solo 2,4 milioni di € erano assicurati.

Anche in questo caso i maggiori danni furono alle coperture, alle strutture temporanee, alle gru, alle linee elettriche sospese, alle foreste; mentre, dal lato delle infrastrutture si rilevarono ben 4 milioni di famiglie senza rifornimenti per alcune settimane nel Sud-Ovest della Francia; la EDF denunciò (non assicurati) la perdita di alcuni milioni di € (linee elettriche e centrali elettriche), in più, i trasporti pubblici furono interrotti per alcune giorni nella città di Parigi, con aeroporti chiusi e segnali telefonici disturbati per alcuni giorni.

In ultimo si ebbe il passaggio di Martin il 27 dicembre, che attraversò Francia, Spagna, Italia e Svizzera con un bilancio complessivo di perdite socio economiche dell'ordine 4 milioni di € del quale solo un quarto era assicurato.

I principali danni furono riscontrati a coperture, strutture temporanee, gru, linee elettriche sospese e foreste; mentre, per quanto riguarda le infrastrutture, si videro danneggiati soprattutto gli edifici storici quali castelli e abbazie.

Per dare un'idea della violenza dei venti che hanno spirato durante il passaggio di Martin sulle coste della Toscana, le velocità di picco hanno raggiunto i 200 km/ora.

È interessante a questo punto fare una rassegna storica di alcuni danni provocati dall'azione del vento sulle opere dell'uomo.

Il primo esempio è offerto da suggestivi disegni dell'epoca in cui è riprodotto il crollo del Chain Pier Bridge a Brighton (fig. 17):

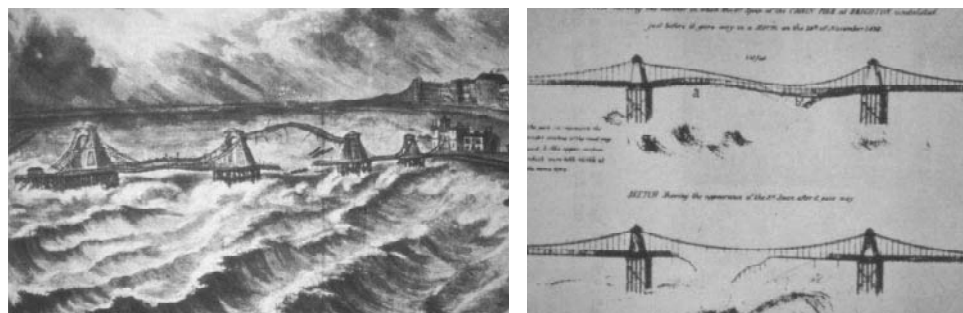


Fig. 17 Disegno del crollo del Brighton Chain Pier

La prima immagine di seguito riportata, è la locandina illustrativa del nuovo ponte sospeso di Tacoma. Le caratteristiche geometriche di questo, costituivano un primato, non tanto per la notevole campate sospesa, quanto per le esigue dimensioni dell'impalcato rispetto alla luce del ponte.

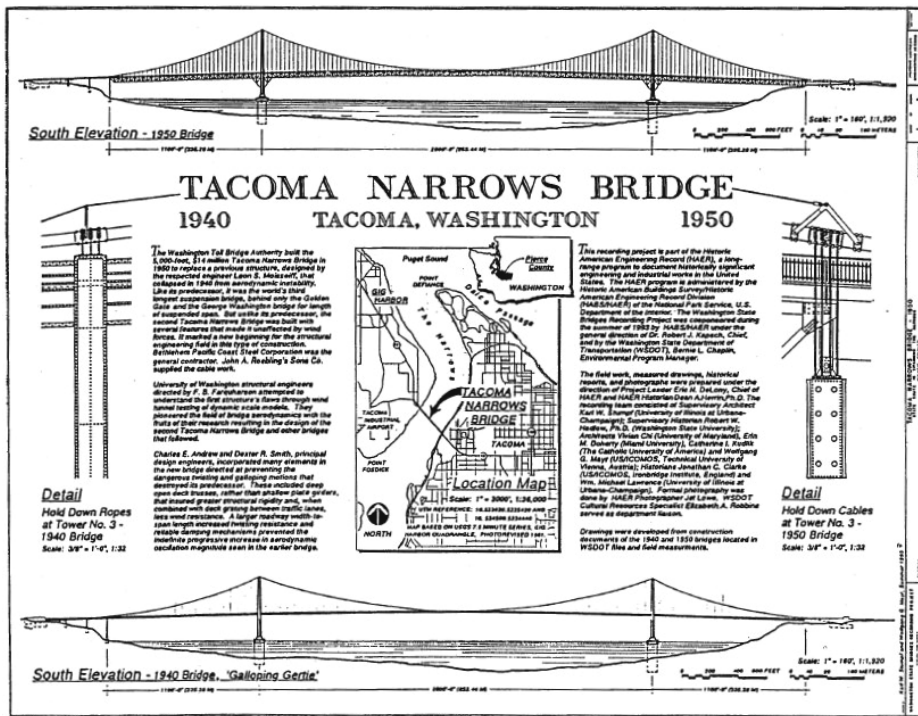


Fig. 18 Locandina del ponte di Tacoma

Grazie a Burt Farquharson docente di ingegneria civile, siamo oggi in grado di vedere quello che accadde il giorno del crollo, infatti fu lui a fotografare e a riprendere con la cinepresa tutte le peripezie dell'impalcato.

Le cronache dell'epoca raccontano che già all'inaugurazione il ponte ondulava in modo vistoso, ma senza conseguenze fatali. In seguito furono cercati sistemi per ridurre le oscillazioni attraverso dissipatori, ma evidentemente anche questi risultarono poco efficaci.

C'è da dire che a quei tempi, non esistevano studi approfonditi sull'interazione delle forze aerodinamiche sui ponti, nonostante ci fossero già stati esempi di crolli clamorosi.

Il problema fu semplicemente accantonato, pensando che tali fenomeni non potessero avvenire su un ponte di tale mole.

In onore del vero, l'ingegner Theodore Condron, unica voce fuori dal coro, raccomandò di rinforzare la struttura.

Subito dopo il crollo, la Federal Works Agency, stabilì una commissione d'indagine con tecnici quali Othmar Ammann e Theodore Von Karman che scagionò il proget-

tista, osservando che se le pecche del ponte erano ovvie a uno sguardo retrospettivo, il progetto rispondeva a ogni criterio accettabile nella pratica.

Ma cosa accadde realmente al ponte? Perché crollò?

Oggi dopo decenni di studi siamo arrivati alla conclusione che il crollo avvenne per le forti oscillazioni torsionali amplificate non da un fenomeno di risonanza, ma da oscillazioni aerolastiche autoeccitate, ovvero si verificò una instabilità aerolastica.

È da precisare per comprendere meglio la differenza, che la risonanza è quel fenomeno fisico di amplificazione della risposta dovuto all'uguaglianza delle frequenze proprie di oscillazione del sistema elastico con quelle della forzante periodica.

È evidente che il crollo del ponte di Tacoma non può essere ricondotto ad un semplice fenomeno di risonanza, poiché l'evento avvenne alcune ore dopo che il processo vibrazionale si era instaurato, in più il vento che provocò il crollo era praticamente costante e dell'ordine dei 50-60 km/h, in assenza di raffiche forti e improvvise, venendo così a mancare la periodicità della forzante.

In realtà oggi sappiamo che il fenomeno che si instaurò quel 7 novembre 1940 (v. fig. 14) è da ricondurre al così detto "Flutter".

Un altro evento catastrofico ma importante dal punto di vista degli studi dell'ingegneria del vento, fu il crollo di tre delle otto torri di raffreddamento di Ferrybridge, Inghilterra, dovuto ad un nuovo fenomeno, l'interferenza tra le strutture.



Fig. 19 Foto aerea delle torri di raffreddamento di Ferrybridge, Inghilterra

Guardando l'immagine sopra riportata, può venire in mente che le ciminiere alte 120 rimaste in piedi siano tali grazie all'effetto schermante di quelle in seguito crollate. In realtà le cose non andarono così; infatti, le torri che resistettero all'azione del vento furono proprio quelle colpite da vento frontale, mentre le altre, in posizione apparentemente protetta, furono colpite da violenti vortici di distacco provenienti dalle torri frontali stesse.

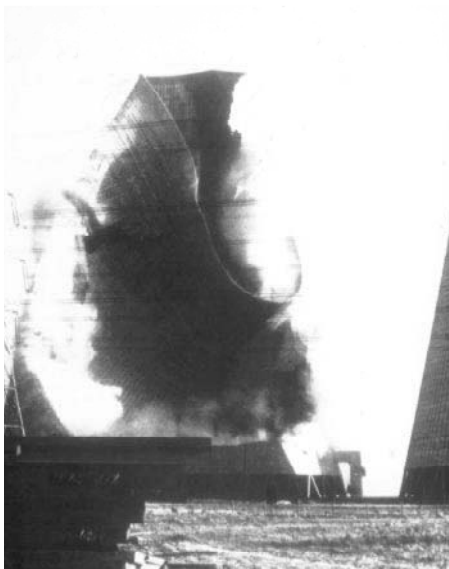


Fig. 20 Foto del crollo di una delle torri di raffreddamento



Fig. 21 John Hancock Tower di Boston

La violenza delle oscillazioni prodotte da questi vortici e conseguentemente il successivo crollo è dovuto alla vicinanza delle ciminiere che hanno risentito enormemente del fenomeno d'interferenza fra i corpi.

L'evento avvenuto nel 1965, mise in luce che progettare strutture come isolate dal contesto in cui sono immerse, può portare a risultati per nulla conservativi.

Fino ad ora abbiamo evidenziato come l'azione prodotta dal vento può produrre effetti devastanti (collasso) su particolari tipi di strutture, quali ponti sospesi e ciminiere.

L'esperienza però ha evidenziato che studiare solo lo stato limite ultimo non esaurisce tutte le fenomenologie associate a questa particolare azione.

Per meglio comprendere questo aspetto riportiamo di seguito due esempi che si riferiscono ad opere che pur restando strutturalmente intatte, risultarono inagibili a causa dell'azione dinamica del vento.

Il palazzo in fig. 21, è il John Hancock Tower di Boston, il quale fu soprannominato "l'edificio dei pannelli di compensato" poiché dopo una bufera avvenuta nel 1968, andarono in frantumi ben 5000 vetrate con un danno economico di circa 15 milioni di dollari.

Questo particolare evento evidenziò la necessità di studiare particolari costruttivi che prima non si pensava potessero essere interessati dall'azione del vento.

Sui serramenti per l'appunto furono condotti esperimenti mirati a comprendere l'effetto dei picchi di pressione prodotti dal vento.

In fig. 22 è riportata la foto del John Hancock Center di Chicago.

L'apparente robustezza dell'edificio non trae in inganno, infatti questo maestoso esempio di grattacielo non ha mai presentato problemi relativi allo stato limite ultimo, ma bensì ad una cosa ovviamente inaspet-

tata; poco dopo il suo completamento, esso manifestò vibrazioni fisiologicamente intollerabili: le persone all'interno del palazzo non tolleravano le eccessive oscillazioni.

Si può facilmente intuire il danno economico che un tal tipo di fenomeno possa aver portato; da questo momento in poi ebbero inizi gli studi sul confort delle strutture per cercare di stabilire quale fosse il limite superiore di tollerabilità dell'uomo al movimento della struttura.

Le immagini di fig. 23 e 24, sono esempi della furia devastatrice delle bufere di vento che colpirono la Francia nel 1999 ed in particolare la seconda è quello che rimane di uno dei tralicci che portavano corrente elettrica a tutta la zona Sud Ovest che rimase completamente senza luce per alcuni giorni.



Fig. 23 Prototipo di edificio in legno (sperimentale) con tetto zavorrato



Fig. 24 Foto di un traliccio collassato dopo il passaggio di una bufera in Francia nel 1999



Fig. 22 John Hancock Center di Chicago

Da quanto sopra detto si capisce l'importanza della ricerca nel campo dell'ingegneria del vento, spetta infatti a questa il compito di cercare sistemi volti a mitigare la così detta vulnerabilità eolica.

Due esemplari definizioni offerte da due esperti in materia: la prima appartiene a Cermak il quale nel 1975 scrisse:

“Wind Engineering stands for the rational treatment of interactions between wind, in the atmospheric boundary layer, and man and his works on the surface of Earth”.

La seconda definizione più recente appartiene a G. Solari che nel 1990 si esprimeva in questi termini:

“L'ingegneria del vento è una disciplina intersettoriale che nasce dalla sintesi di svariate materie quali la matematica probabilistica e dei fenomeni aleatori, la

fisica dell'atmosfera, la meccanica dei fluidi e dei solidi, la meteorologia, l'aerodinamica, l'ingegneria strutturale, ambientale e meccanica, l'energetica, la fisiologia e la psicologia".

Alla luce delle cose dette, ritengo possibile sintetizzare i campi di applicazione dell'ingegneria del vento con il seguente schema:

