

# Pluriverso

Claudio Borri  
Daniele Briganti

---

## L'ingegneria del vento Un'antica, modernissima scienza



PLURIVERSO

QUADERNI DELLA BIBLIOTECA DEL POLO UNIVERSITARIO CITTÀ DI PRATO

— 3 —

PLURIVERSO

QUADERNI DELLA BIBLIOTECA DEL POLO UNIVERSITARIO CITTÀ DI PRATO

1. *La Biblioteca dei distretti industriali presso il Polo Universitario Città di Prato*, 2006.
2. *Nuovi orientamenti negli studi di marketing*, 2006.

Claudio Borri  
Daniele Briganti

L'ingegneria del vento  
Un'antica, modernissima scienza

FIRENZE UNIVERSITY PRESS

2006

L'ingegneria del vento : un'antica, modernissima scienza / Claudio Borri,  
Daniele Briganti. – Firenze : Firenze university press, 2006  
(Pluriverso; 3)

<http://digital.casalini.it/9788864531663>

ISBN-10: 88-8453-547-6 (online)

ISBN-13: 978-88-6453-166-3 (online)

ISBN-10: 88-8453-548-4 (print)

ISBN-13: 978-88-6453-173-1 (print)

624.175 (ed. 20)

Strutture edilizie-Effetti del vento

COMITATO SCIENTIFICO DI COLLANA:

Simone Guercini (Coordinatore)

Maurizio Fioravanti

Laura Leonardi

Donatella Lippi

Teresa Megale

Marco Pierini

Testo della prolusione all'A.A. 2004/2005 dell'Università di Firenze  
tenuta a Prato il 15.03.05

© 2006 Firenze University Press

Università degli Studi di Firenze

Firenze University Press

Borgo Albizi, 28

50122 Firenze, Italy

<http://epress.unifi.it/>

*Printed in Italy*

## INDICE

SOMMARIO	VII
PREMESSA	VIII
SVILUPPI STORICI	1
LA RILEVANZA SOCIO ECONOMICA DELL'INGEGNERIA DEL VENTO	9
L'INGEGNERIA DEL VENTO OGGI (NELL'ATTIVITÀ DEL CRIACIV)	17
L'ingegneria civile strutturale	21
Ingegneria ambientale e climatica	27
Effetti climatici combinati	35
AZIONI DEL VENTO E LE GRANDI STRUTTURE: TRE GRANDI OPERE ESEMPLARI	37
Copertura dello stadio olimpico	37
Il viadotto di Millau	39
Ponte sullo stretto di Messina	41
CONCLUSIONI	43



## SOMMARIO

In questo articolo è riportato il contributo offerto dall'autore all'inaugurazione dell'Anno Accademico 2004-2005 tenutosi presso la sede di Prato dell'Università di Firenze.

Tale evento ha visto tra le altre, la partecipazione interessata delle autorità accademiche, civili ed ecclesiastiche della città; è per questo che ho voluto sottolineare in questa occasione l'importanza e la qualità della ricerca svolta presso il nostro Polo universitario, intendendo porre l'accento sulla necessità di qualificare il nostro impegno a livello internazionale.

Per cercare di dare una risposta il più esauriente possibile sul perché l'ingegneria del vento ha assunto un ruolo così importante ai giorni nostri, ho voluto procedere per tappe, accompagnando dapprima gli intervenuti in un viaggio storico, in cui ho guidato una riflessione sull'ineluttabile rapporto uomo-civilizzazione-clima; in seguito, ho voluto mettere in evidenza gli aspetti socio-economici del fenomeno ed infine, ho portato all'attenzione l'attività di ricerca svolta nel nostro centro interuniversitario (CRIACIV), gettando uno sguardo ad alcuni tra gli esempi ingegneristici di ultima generazione che per loro natura, hanno un legame forte con l'azione vento.



## PREMESSA

Magnifico Rettore, V.a. Eminenza, Autorità tutte, Gent.mi colleghi, Signore e Signori,

Desidero innanzitutto rivolgere il mio gradito e sentito ringraziamento a tutti coloro che, negli anni scorsi, hanno operato in vario modo sostenendo la nostra attività nell'ambito di questa disciplina e contribuendo all'affermazione del Centro (CRIACIV) che ho l'onore di dirigere dal maggio del 2004.

In particolare, vorrei ricordare il supporto del vertice dell'Ateneo, nelle persone dei Rettori Blasi e Marinelli, dei presidenti di Ingegneria (Carnevale ed Angotti) e naturalmente del Presidente del PIN, prof. Fioravanti.

Tenere la prolusione di oggi, su questo tema ed in tale veste, è motivo di grande soddisfazione ed il riconoscimento va anche a chi mi ha preceduto in tale funzione: il prof. G. Augusti, che ha diretto il Centro negli anni della nascita ed il prof. P. Spinelli, oggi qui presente che l'ha guidato attraverso la sua "infanzia", essendone stato Direttore fino all'anno scorso.

Io mi trovo ad affrontare adesso gli anni dell'"adolescenza", che, come si sa, sono in genere anni di forte crescita, ma spesso anche di una certa "turbolenza" e comunque anni molto delicati.

## 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.

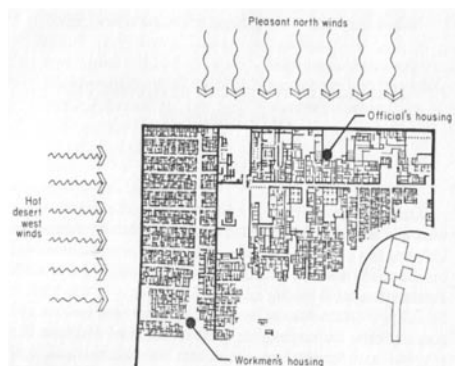


Fig. 1 Schema di distribuzione delle case a Kahun, città egizia del 2000 A.C.

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.

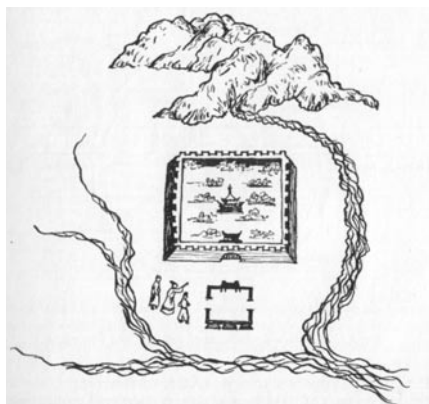


Fig. 2 Disegno Cinese in cui si mostra la disposizione della città rispetto alla posizione della montagna e dei fiumi

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'evaporazione non semplice, bensì di due tipi: una più simile al vapore, l'altra più simile al soffio. L'evaporazione umida è alla base del meccanismo di formazione delle nubi, della pioggia, della neve, delle sorgenti, dei fiumi, della rugiada e della brina; l'evaporazione 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.

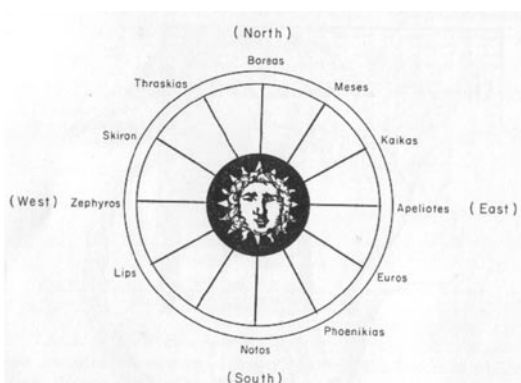


Fig. 3 Rappresentazione della prima Rosa dei Venti ad opera di Teofrasto

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=704m)
- 1933-37: Strauss realizza il Golden Gate Bridge (L=1280m)



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.

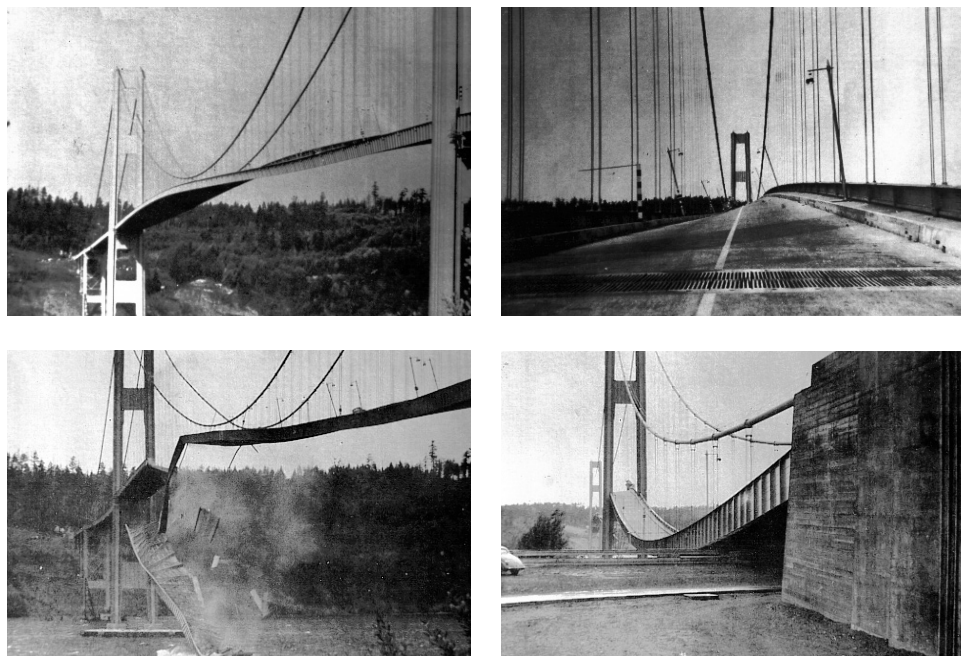


Fig. 14 Foto del ponte di Tacoma in fase di collasso

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 stati 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 possono 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.

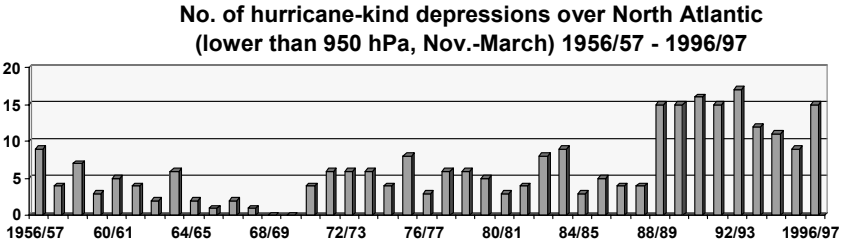


Fig. 15 Numero di Uragani verificatisi tra il 1956 e 1997 aventi un valore di depressione più basso di 950 hPa

	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:

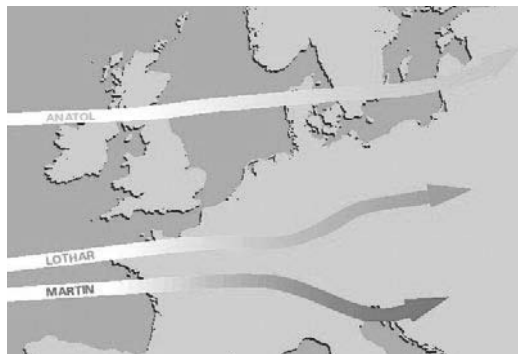


Fig. 16 Percorsi seguiti dalle tre tempeste di vento

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):

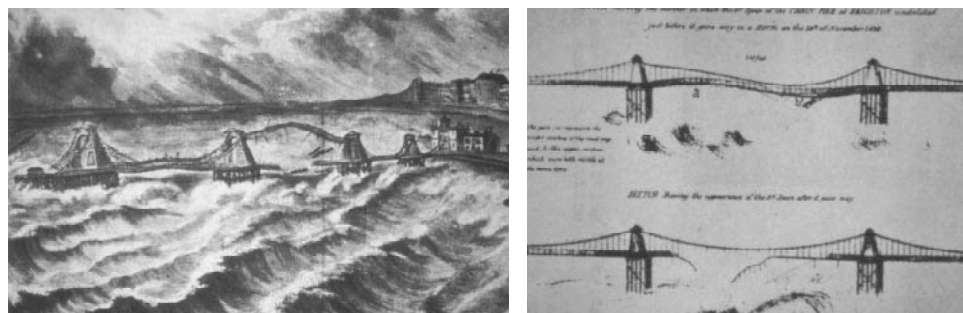


Fig. 17 Disegno del crollo del Brighton Chain Pier

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.

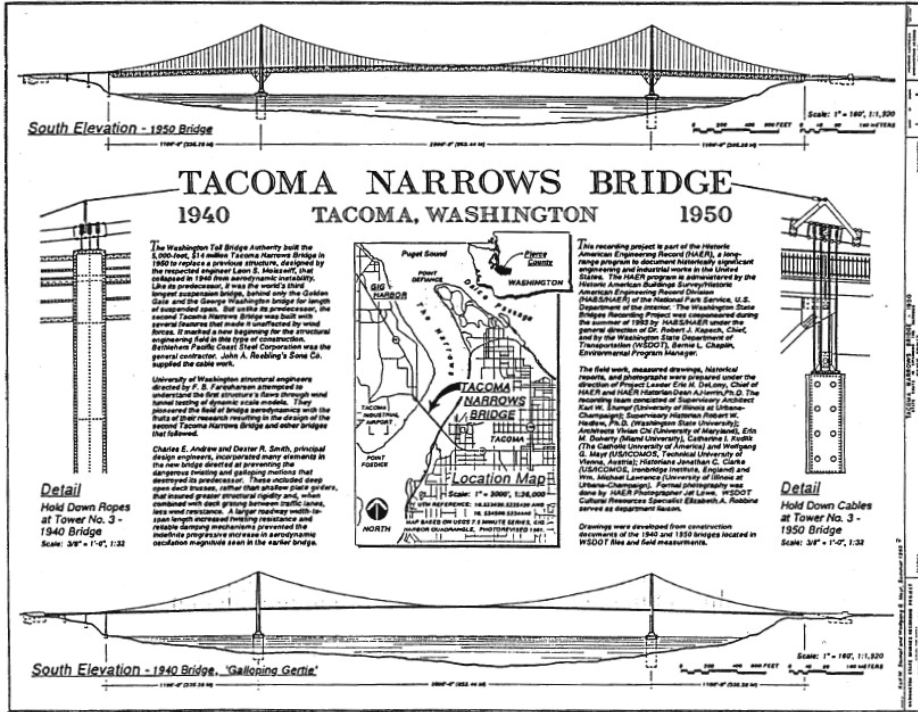


Fig. 18 Locandina del ponte di Tacoma

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.

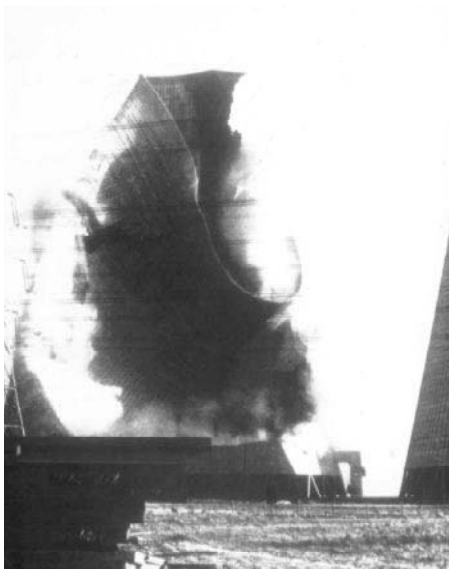


Fig. 20 Foto del crollo di una delle torri di raffreddamento



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”.

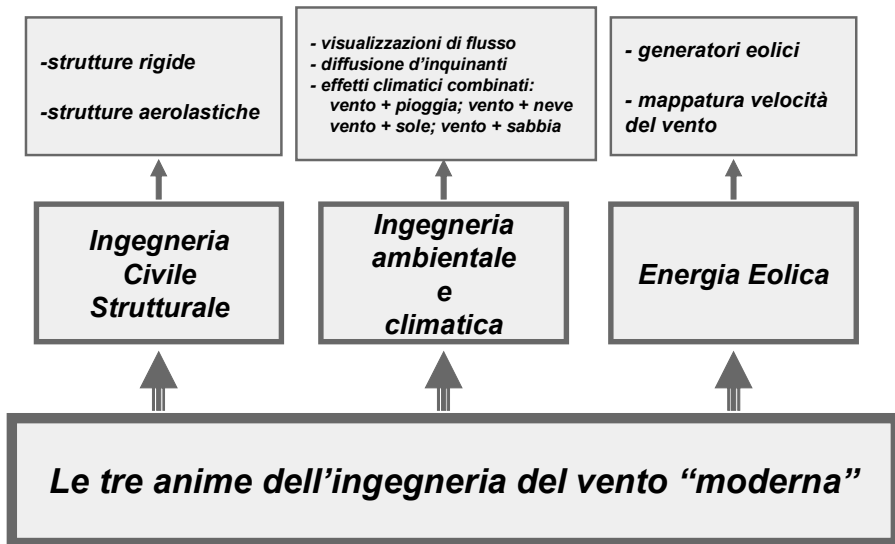
La seconda definizione più recente appartiene a G. Solari che nel 1990 si esprimeva in questi termini:

“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:

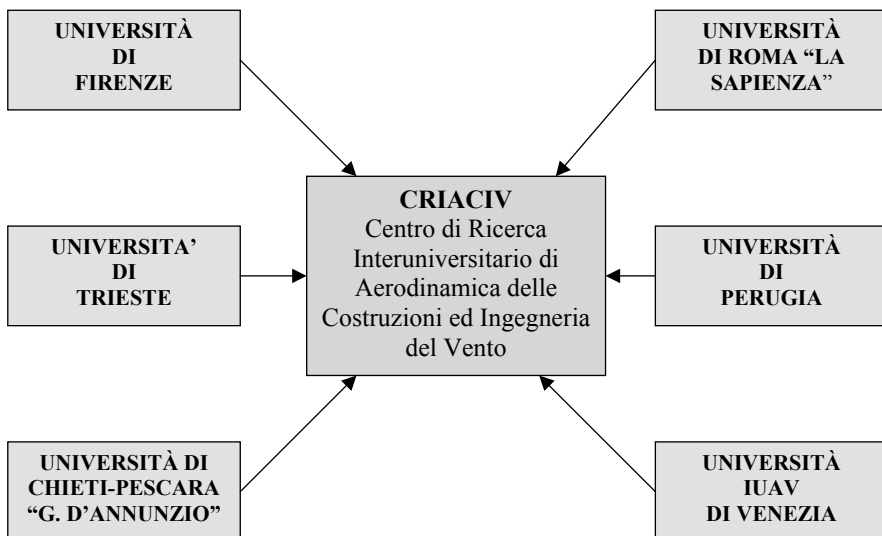


## L'INGEGNERIA DEL VENTO OGGI (NELL'ATTIVITÀ DEL CRIACIV)

Il paragrafo precedente è terminato con uno schema riassuntivo dei principali ambiti di applicazione in cui l'ingegneria del vento ha il suo campo di applicazione.

In questo settore si inserisce il CRIACIV, Centro di Ricerca Interuniversitario di Aerodinamica delle Costruzioni ed Ingegneria del Vento.

Istituito nel 1991 dall'Università degli Studi di Firenze e di Roma La Sapienza, nel 1996 entrarono a far parte del centro l'Università di Trieste e Perugia ed infine nel 1997 le Università di Chieti-Pescara e Venezia.



Ad onor del vero, la "storia" del CRIACIV nasce nel 1984, anno in cui fu stilata la redazione del progetto di un laboratorio di Ingegneria del vento equipaggiato con una "galleria del vento a strato limite"; nel 1985 si passò all'acquisto del blocco propulsore (motore e ventilatore), nel 1990 ci fu il progetto definitivo della galleria

con sede nel polo didattico di Prato, ed infine nel 1992 si arrivò finalmente all'inizio delle attività di ricerca.

Di seguito si elencano alcuni tra i più importanti progetti di ricerca coordinati dal CRIACIV:

- Ricerca nazionale:

N.	Titolo	Committente	Durata
1	Interazione fluidi-strutture: impostazione del problema e ricerche sperimentali	MURST-Ateneo (Coord.: G. Augusti)	1993-95
2	Vento strutture e ambiente: progettazione, controllo e normativa	PRIN MURST-Ateneo (Coord.: G. Augusti)	1995-97
3	Ricerche e Sperimentazioni di Aerodinamica delle Costruzioni e Ingegneria del Vento (RESACIV)	PRIN MIUR-Ateneo (Coord.: P. Spinelli)	1997-99
4	Analisi controllo e riduzione del rischio eolico sulle costruzioni e sull'ambiente urbano (ACME-CUE)	PRIN MIUR-Ateneo (Coord.: C. Borri)	1999-2001
5	Dominare il rischio eolico ed assicurare il funzionamento di impianti ed infrastrutture (WINDERFUL)	PRIN MIUR-Ateneo (Coord.:C. Borri)	2001-03
6	Prestazioni per l'intera vita, innovazione e criteri di progettazione di strutture ed infrastr. a fronte dell'azione eolica e di altri eventi naturali (PERBACCO)	PRIN MIUR-Ateneo (Coord.: C. Borri)	2003-05

- Ricerca europea-internazionale,

N.	Titolo	Committente	Durata
1	Research Network BEATRICE – CT RX 92-0077	EU – DG XII	05.07.92 -31.07.96
2	BEATRICE-Euroconferences I, II e III CT EC 93-0183	EU – DG XII	1993-98
3	COST Action C14 in “Urban Wind Engineering” (Progetto proposto e coordinato dal CRIACIV, ma con fondi gestiti direttamente dalla segreteria COST, c/o DG Ricerca della CE; dal 1.1.04 c/o European Science Foundation, Bruxelles)	EU – DG Research	Sett. 2000 - May 2004

- Attività di ricerca per conto terzi (convenzioni di ricerca – contratti):

N.	Titolo	Committente	Durata
1	Analisi teorico-sperimentale delle pressioni indotte dal vento sulle torri di raffreddamento della centrale di Santa Barbara (AR)	ENEL-CRIS (Centro di Ricerche Idrauliche e Strutturali)	22/10/96 -25/02/98
2	Analisi teorico-sperimentale della dispersione di fumi in funzione dell'altezza del camino del polo fumi della centrale RSU di Cà del Bue e delle pressioni indotte dal vento sul camino stesso	AGSM- Comune di Verona	24/11/97 -23/09/98
3	Algoritmi numerici per la generazione di campi multi-correlati di storie di pressione del vento agenti su grandi strutture in base a dati sperimentali ottenuti in galleria del vento	ENEL- PIS (Polo Idraulico-Strutturale) Milano	01/07/98 -06/06/99
4	Effetti di Risonanza acustica su catene di isolatori in Galleria del vento	AVIR SpA	28/10/98 -07/12/99
5	Analisi statistiche e sperimentali delle azioni del vento e della neve sulla copertura del nuovo stadio di Venezia-Tessera.	MAZZI Costruzioni Generali SpA, Verona	28/10/98-
6	Analisi teorico-sperimentale delle pressioni indotte dal vento sulla copertura del Palazzo della Ragione in Padova	Comune di Padova	02/02/98 -21/07/00
7	Analisi sperimentale delle pressioni indotte dal vento su edifici a torre in loc. Fiumaranuova, Genova	Coop7 SpA	27/07/99 -04/10/00
8	Analisi sperimentale della risposta aeroelastica su un modello sezione di una passerella pedonale	Studio DE MIRANDA	30/06/00 -20/07/00
9	Prove in galleria del vento su modelli di nuove strutture di copertura per l'Ente Fiera, porto di Genova	FIUMARANUOVA SpA, Porto di Genova	19.11.98 -18.03.99
10	Analisi sperimentale delle pressioni indotte dal vento su edifici a torre in loc. Fiumaranuova, Genova	Coop7 SpA	27/07/99 -04/10/00
11	Centrale ENEL-P.to Corsini: determinazione di pressioni e forze in campo statico e dinamico sulle pannellature in policarbonato per rivestimento GVR - prove in galleria del vento	ENELPOWER SpA	28/05/01 - 04.12.01
12	Valutazione delle condizioni locali di ventosità del quartiere Salinella ed impatto di nuove costruzioni	ENEA - Taranto	24/10/01 - 14.02.02
13	Prove sperimentali in galleria del vento sulla tenso-struttura di copertura della nuova darsena nautica del porto di Genova	Marina Fiera SpA - Porto di Genova	08/02/02 - 21.05.02

14	Centrale termoelettrica di La Casella: esecuzione di prove sperimentali in galleria del vento su modelli	ENELPOWER SpA	Euro 14.500,00 ( + IVA )
15	Stadio Olimpico di calcio del Pireo, Grecia: prove in galleria del vento per l'analisi delle pressioni indotte dal vento	IntraDevelopment SA; Studio Majowiecki	28.08.03 - 17.03.03

- Prestazioni conto terzi:

N.	Titolo	Committente	Durata
1	Flow visualisation tests on cooling towers	ESSCO	08.06.99 -14.01.00
2	Prove in galleria del vento su modelli in scala 1:6 della "Endless Tower" di Constantin Brancusi a Bucarest, Romania	DISEG-Univ. Genova	29.12.00 -24.08.01
3	Aquapark-Mosca	TNT Taurus	18.11.02 -26.09.03
4	Calibrazione di anemometro in Galleria del Vento	Del Taglia	17.02.03 -28.08.03
5	Prove in Galleria del Vento per la copertura delle tribune dello stadio di Manfredonia	Holzbau SpA	01.04.03 -27.08.03
6	Determinazione di polari statiche per ciminiera in acciaio a sezione ottagonale	Ing. Baroni	26.09.03
7	Determinazione di polari statiche per ciminiera in acciaio a sezione ottagonale	Ing. Cantagallo	01.10.03 -13.10.03

L'immagine che segue, mostra la galleria del vento a strato limite sviluppato del CRIACIV nella sua configurazione attuale.



Una volta presentato il nostro centro di ricerca ed aver accennato alle tipologie di attività che noi svolgiamo, è giusto dare uno sguardo più dettagliato ad alcuni lavori che la nostra galleria del vento, unita alla competenza dei ricercatori, ha potuto fare.

### *L'ingegneria civile strutturale*

- Misure in galleria del vento della distribuzione di pressioni sulla copertura del mercato centrale di “San Lorenzo” in Firenze

Il mercato di S. Lorenzo, fu realizzato dall'ing. Mengoni, una vera autorità storica per l'ingegneria della città di Firenze.

Nell'ambito di una verifica strutturale eseguita da parte del Comune di Firenze, fu richiesto al nostro centro di ricerca di determinare le azioni dinamiche del vento sulla copertura che come si può notare risulta essere abbastanza variegata.

I tests che noi eseguiamo furono mirati alla investigazione dell'azione del vento proveniente da 8 direzioni differenti equipaggiando la struttura realizzata in scala 1:300 con 64 prese di pressione, dislocate come nelle immagini riportate.

Oltre ad aver fornito mappe dei coefficienti di pressione, abbiamo in questo caso confrontato i nostri risultati con quelli riportati dal nuovo Eurocodice 1.



Fig. 26 Foto della copertura del mercato centrale di San Lorenzo

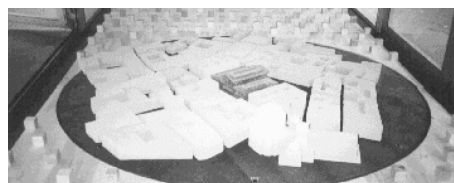


Fig. 27 Foto del modello della copertura posta all'interno della galleria del vento

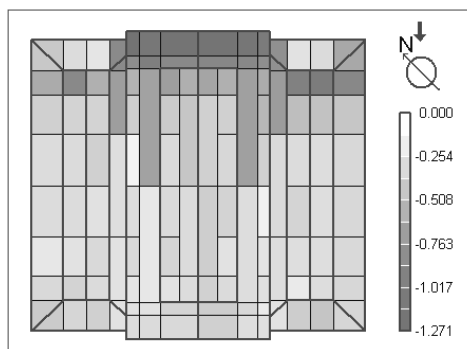


Fig. 28 Valori di progetto misurati in galleria del vento

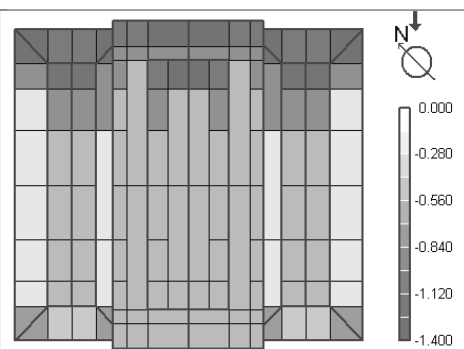


Fig. 29 Valori di progetto secondo l'EC1

- Misure in galleria del vento della distribuzione di pressioni sulla copertura del Palazzo della Ragione in Padova



Fig. 30 Foto del Palazzo della Ragione in Padova

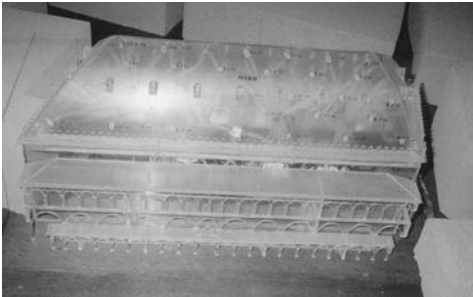


Fig. 31 Foto del modello in scala del Palazzo della Ragione in Padova

Si noti come, per ottenere dati sufficientemente accurati della reale azione prodotta dal vento sulla struttura in esame, sia necessario riprodurre non solo la struttura stessa ma anche una parte importante dell'ambiente circostante.

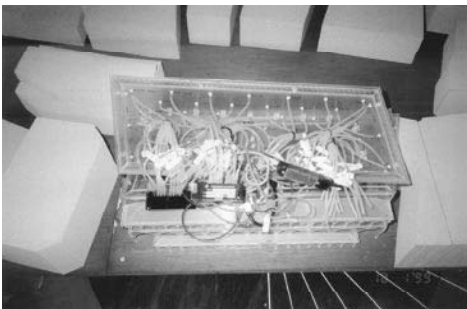


Fig. 32 Foto della strumentazione alloggiata all'interno del modello del Palazzo della Ragione in Padova

Questo splendido esempio di edificio medioevale sito nel cuore della città di Padova è il famoso Palazzo della Ragione.

Nel 1998 ci fu chiesto da parte del Comune di Padova di realizzare una serie di sperimentazioni in galleria del vento per poter determinare le azioni dinamiche sulla copertura.

Questi dati rientravano in un progetto più ampio di verifica dell'antica struttura che la committenza aveva appena iniziato.

L'immagine a lato (fig. 31), rappresenta il modello dell'edificio nel quale si riescono a distinguere le ben 64 prese di pressione dislocate sulla copertura, le quali sono state necessarie per misurare le storie di pressione prodotte dal vento spirante da 8 direzioni diverse.

Le due immagini sotto riportate invece, mostrano da un lato il fitto groviglio di tubicini necessari per eseguire gli esperimenti, nell'altra invece il modello posto in galleria.

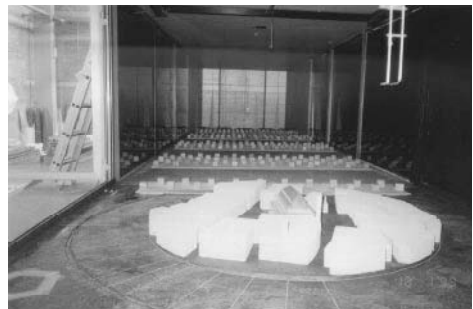


Fig. 33 Foto del modello Palazzo della Ragione in Padova alloggiato in camera di prova della galleria del vento

I risultati ottenuti, sono sintetizzati nell'immagine sotto riportata per la quale oltre tutto abbiamo anche realizzato un confronto con l'Eurocodice 1.

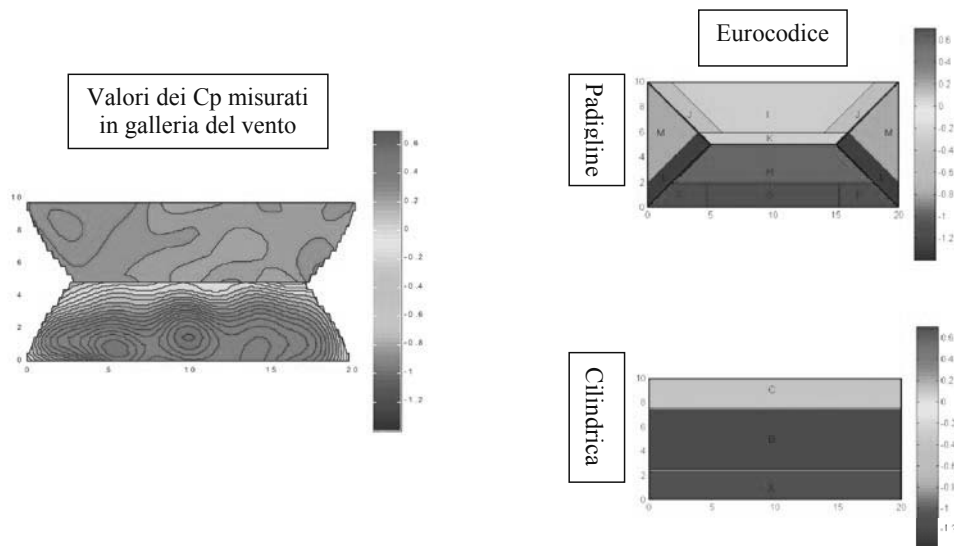


Fig. 34 Confronto fra coefficienti di pressione ricavati dalla campagna di sperimentazione e l'EC1

- Analisi della distribuzione delle pressioni sulle torri di raffreddamento della centrale ENEL di “Santa Barbara”

Eccoci tornati in Toscana e più precisamente nella zona di Val d’Arno, dove è situata la centrale ENEL di S. Barbara.

Nel 1996 ci fu commissionato da parte dell’ENEL-CRIS di determinare l’azione dinamica del vento sulle due torri di raffreddamento, dovute all’interferenza.



Fig. 35 Foto delle torri di raffreddamento della centrale ENEL di Santa Barbara



Le torri alte 80 m., rappresentano per l'ENEL un simbolo da salvaguardare, essendo state progettate dal famoso Ing. Riccardo Morandi.

Come evidente dall'immagine di lato, solo una torre fu strumentata con 64 prese di pressione; furono inoltre investigate 8 direzioni del vento.

Ecco come si presentano alcuni diagrammi dei coefficienti di pressione determinati attraverso le prove in galleria.

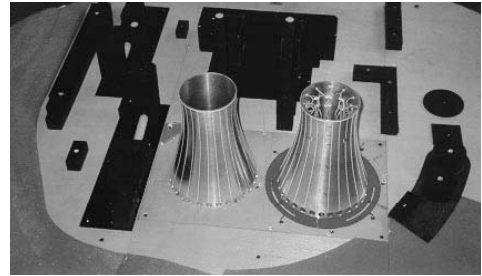


Fig. 36 Foto del modello in scala delle torri di raffreddamento di Santa Barbara

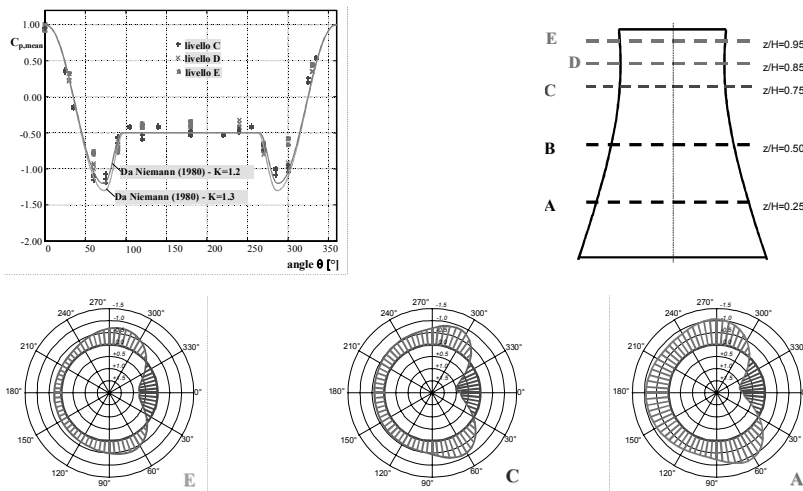


Fig. 37 Distribuzione dei coefficienti di pressione in corrispondenza delle sezioni A, C ed E

- Analisi sperimentale della risposta aerostatica su un modello sezione dell'impalcato del ponte rio Higuamo, Repubblica Dominicana



Fig. 38 Foto del ponte sul Rio Higuamo, Repubblica Dominicana

Nel 2000 fummo incaricati dalla impresa Fortunato Federici S.p.a. di Roma, un'importante impresa italiana che opera anche in America latina, di realizzare le prove in galleria del vento per la determinazione dei coefficienti aerodinamici sull'impalcato del ponte strallato sul Rio Higuamo, progettato dall'Ing. De Miranda.

Le prove che realizzammo furono di tipo aerostatico e di tipo statico.

Le due foto riportate a lato, rappresentano l'impalcato del modello sezione utilizzato per realizzare le prove.

Si noti come la forma utilizzata, sia stata studiata appositamente per ridurre al minimo eventuali fenomeni aerolastici.

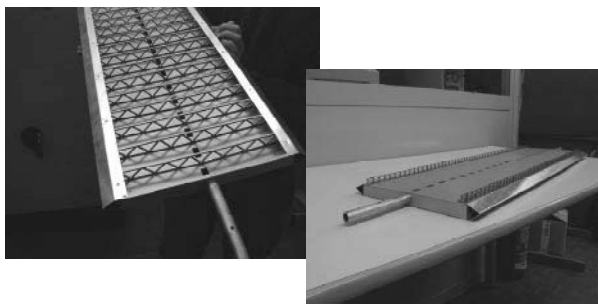


Fig. 39 Foto del modello sezione utilizzato per le prove in galleria del vento



Fig. 40 Foto della cella di carico utilizzata per le prove in galleria del vento

Questa foto mostra la preparazione della prova sul modello sezione d'impalcato.

Il telaio esterno è sufficientemente rigido da sostenere il sistema dinamico, composto da molle, dall'impalcato stesso e dal sistema di misurazione composto da due distanziometri laser posti in sommità e necessari per misurare la storia degli spostamenti durante la prova.

- Prove sperimentali in galleria del vento ed azioni dinamiche di progetto sulla nuova copertura dello stadio "Delle Alpi" di Torino (Juventus F.C. Torino)

Nel 2003-04 per conto della Juventus F.C. Torino, la quale vorrebbe, per espressa volontà dell'amministratore delegato, ridurre il numero dei posti nelle gradinate portando lo stadio ad una capienza di circa 40.000 posti.

Tale riduzione verrebbe realizzata mantenendo inalterata la vecchia struttura ma introducendo su questa una nuova copertura interna alla precedente.



Fig. 41 Foto stadio Delle Alpi di Torino



Fig. 42 Foto del modello dello stadio utilizzato nelle prove in galleria del vento

Il modello realizzato per le prove in galleria del vento rende bene l'idea sulle intenzioni della committenza nei confronti della nuova opera.

Gli obiettivi delle prove sono stati due: il primo quello di determinare le azioni dinamiche del vento sulla nuova copertura, mentre il secondo (che vedremo in seguito) è indirizzato alla valutazione dei flussi d'aria all'interno dello stadio e nelle gradinate.

Le prove condotte portarono ad un numero notevole di dati: basti pensare al fatto che il modello è stato equipaggiato con 256 prese e sono state investigate ben 16 direzioni differenti, con la presenza della nuova copertura e senza.

Di seguito sono riportate alcune mappature dei coefficienti di pressione.

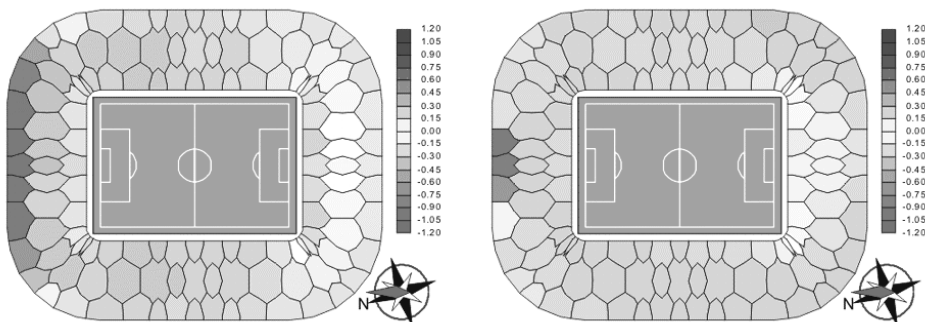


Fig. 43 Rappresentazione dei coefficienti di pressione sulla copertura relativi a due differenti direzioni del vento

- Prove sperimentali in galleria del vento sulla nuova copertura dello stadio olimpico del Pireo (Grecia)

Dal settembre al dicembre 2003, grazie allo studio tecnico del Prof. Ing. Majowiecki, il nostro centro di ricerca può studiare lo stadio Karaiskaki del Pireo, al fine, anche in questo caso, di determinare le azioni dinamiche del vento sulla nuova copertura.

Analogamente allo studio effettuato per lo stadio Delle Alpi, il modello fu strumentato con 256 prese di pressione e furono investigate 16 direzioni con profilo del vento tipo "mare".

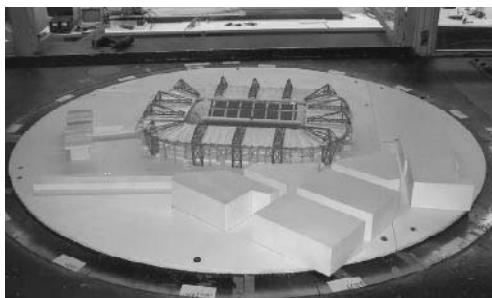


Fig. 44 Foto del modello dello stadio utilizzato per le prove in galleria del vento

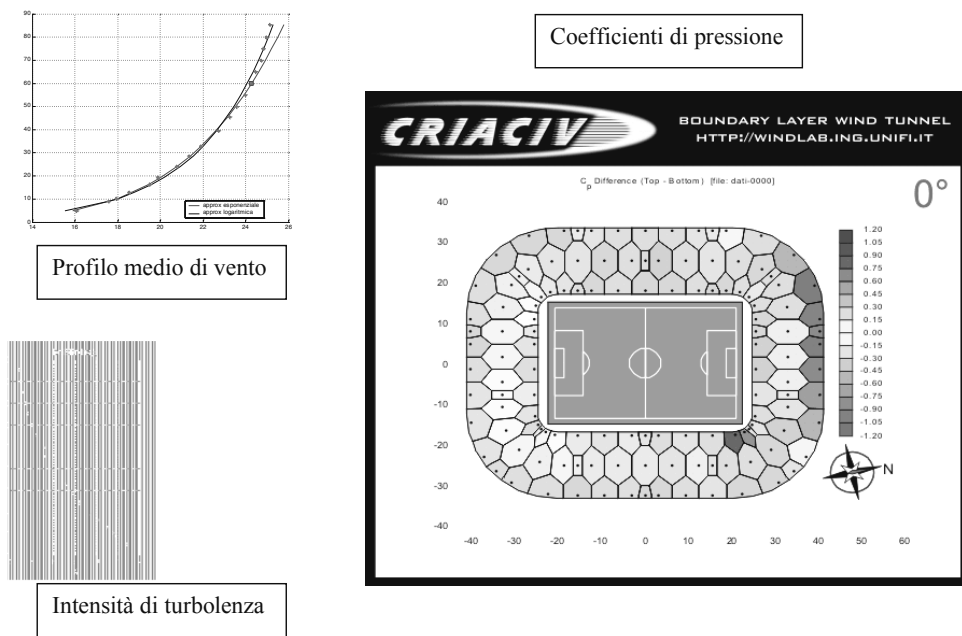


Fig. 45 Rappresentazione dei coefficienti di pressione sulla copertura

*Ingegneria ambientale e climatica*

Le potenzialità della galleria del vento non si esauriscono con gli studi ed analisi d'ingegneria civile strutturale, ma anzi trova grande spazio nel nostro centro di ricerca l'impiego e lo studio in ingegneria ambientale.

Il motivo del perché dell'utilizzo della galleria del vento è evidente se si pensa alla possibilità di realizzare analisi affidabili di impatto ambientale, per esempio simulando la dispersione in atmosfera di inquinanti allo stato gassoso.

Le cose che possono essere simulate attraverso un'opportuna scalatura sono:

- Orografie complesse (spesso troppo complesse per codici di calcolo di CFD);
- Interazione di più pennacchi emessi simultaneamente;
- Sorgenti di emissione areale (ex. discariche);
- Effetti di edifici e costruzioni che si ergono nelle vicinanze dei camini;
- Effetti della stabilità atmosferica se la galleria possiede opportune capacità di stratificazione termica.

Di seguito è riportato uno schema semplificato di come vengono effettuate le prove di diffusione di inquinanti.

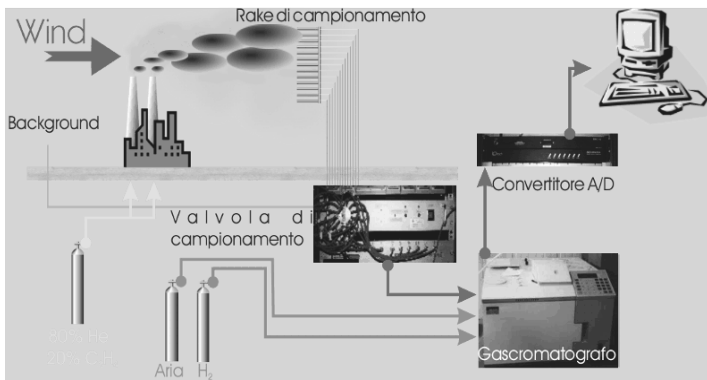


Fig. 46 Schema delle prove di diffusione delle sostanze inquinanti

Il procedimento per la misurazione della concentrazione degli inquinanti è abbastanza semplice: si procede ad iniettare nell'atmosfera riprodotta in galleria un gas tracciante, ovviamente uscente dai camini o in generale dalle strutture riprodotte in scala; in seguito, si misurano a valle della sorgente le concentrazioni del gas presente nell'atmosfera, prelevando dei campioni del flusso in punti prestabiliti. Questa operazione viene effettuata attraverso un gascromatografo il quale, attraverso un convertitore analogico - digitale invia ad un computer i dati ottenuti, in modo tale da poter essere analizzati.

Vediamo adesso alcuni lavori trattati nella nostra galleria:

- Valutazione degli impatti al suolo da sistema di incenerimento di RSU mediante studio applicativo in galleria del vento "L'inceneritori di Ca' del Bue" (Verona)

Quello che si vede nella figura 47, è il modello realizzato nel 1998 per valutare le concentrazioni delle emissioni prodotte dai due camini dell'inceneritore di Ca' del Bue sito in provincia di Verona.

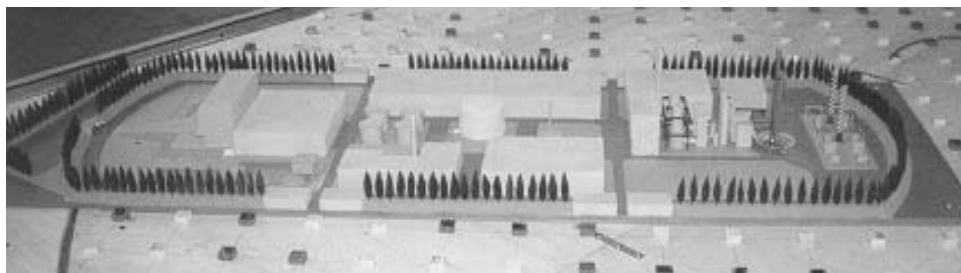


Fig. 47 Schema del modello dell'inceneritore di Ca' del Bue utilizzato per le prove di diffusione delle sostanze inquinanti

Le indagini si spinsero ad investigare 8 direzioni del vento, equipaggiando il modello con sonde per l'analisi della concentrazione (FID).

Quelli che si vedono di seguito sono alcuni dei risultati ottenuti

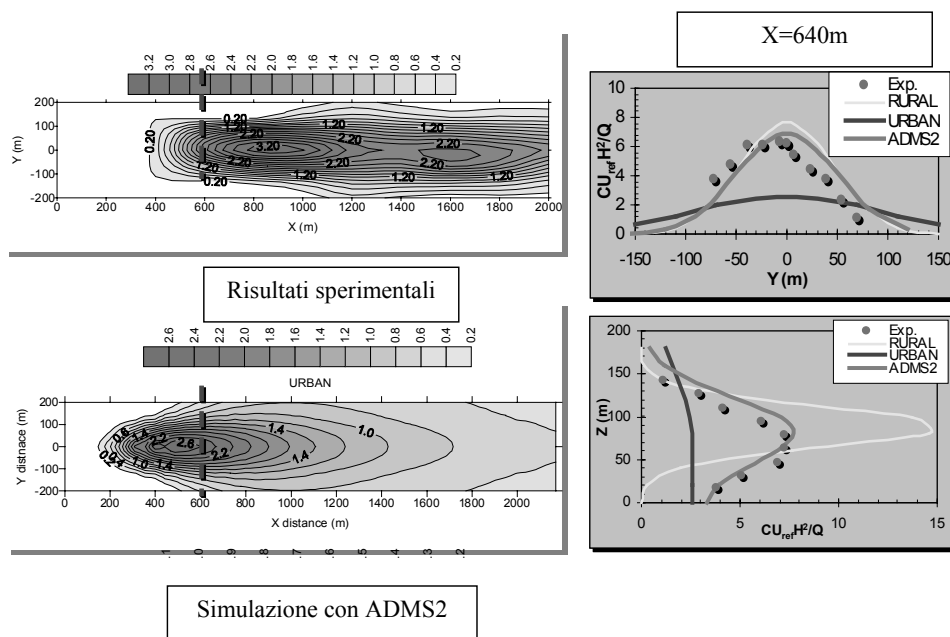


Fig. 48 Schemi di diffusione degli'inquinanti ottenuti analizzando i risultati delle prove in galleria del vento

Queste prove si sono rivelate necessarie per comprendere se con i venti dominanti presenti in quella zona, il centro abitato sarebbe stato raggiunto da gas sprigionati dall'inceneritore. Il risultato di questa ricerca propendeva per la costruzione dell'opera.

- Dispersione del pennacchio di vapore da torri di raffreddamento



Fig. 49 Foto del modello in scala utilizzato durante le prove in galleria del vento

Nel 1999 la ESSCO di New York, ci commissionò lo studio dell'ottimizzazione di una barriera per limitare la ricaduta di vapore su una autostrada limitrofa.

Noi investigammo 3 direzioni di vento con il modello equipaggiato con sonde per l'analisi della concentrazione.

Le immagini di seguito riportate, rappresentano tre diverse soluzioni al problema.

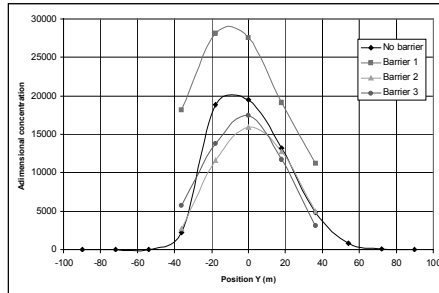
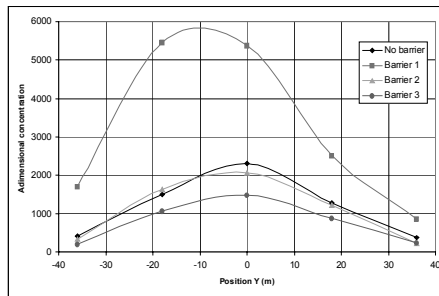
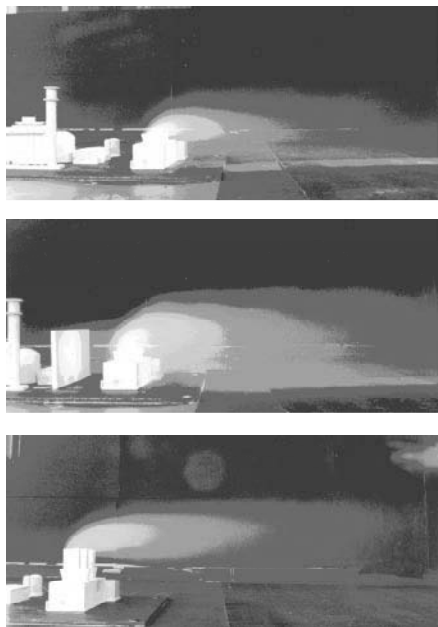


Fig. 50 Fotogrammi ripresi durante le prove di diffusione

- Valutazione della diffusione degli inquinanti emessi da un modello di discarica in orografia complessa

Un interessante lavoro di ricerca che il CRIACIV ha intrapreso negli ultimi tempi è quello di valutare le emissioni dalle sorgenti areali, ovvero dalle discariche.

I tests eseguiti riguardano l'analisi della concentrazione tramite FID in varie configurazioni approfondimenti tramite PIV.

Le foto di seguito riportate, danno una panoramica dell'esperimento effettuato, si noti come a valle della discarica di forma tronco-piramidale, sia stata inserita una collina, in modo da rendere più complessa l'orografia.

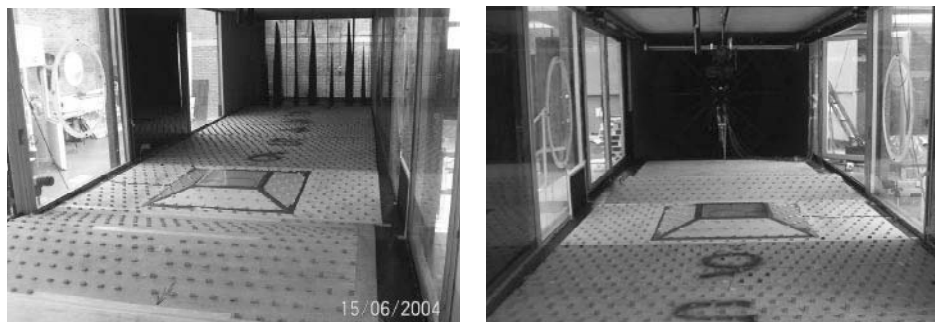


Fig. 51 Foto del modello della discarica utilizzato nelle prove in galleria del vento

Di seguito sono riportate le mappe di concentrazione dell'inquinante o come nel nostro caso, della diffusione del cattivo odore che una discarica inevitabilmente produce.

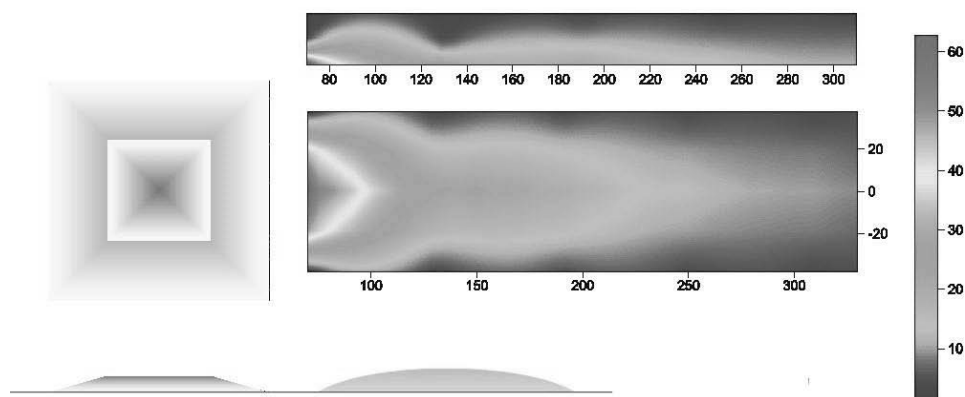


Fig. 52 Rappresentazione della diffusione del cattivo odore proveniente dalla discarica

- Prove sperimentali in galleria del vento di confort sulla nuova copertura dello stadio "Delle Alpi" di Torino (Juventus F.C. Torino)

Abbiamo già accennato in occasione dell'esposizione della parte relativa alla sperimentazione sulla copertura dello stadio Delle Alpi di Torino che l'incarico conferito al CRIACIV dalla società di calcio Juventus F.C., non riguardava soltanto la determinazione delle azioni del vento sulla nuova copertura, ma anche lo studio del confort ambientale.



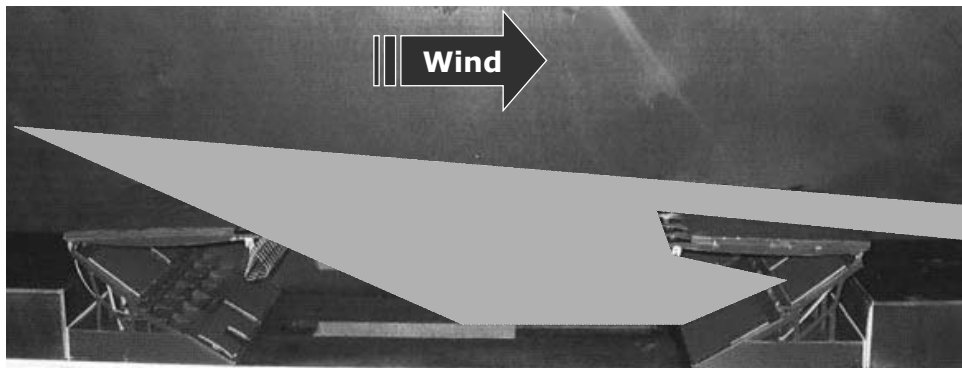


Fig. 53 Prova in galleria del vento con utilizzo della tecnica PIV

L'immagine sopra riportata, mostra il modello dello stadio attraversato dal vento nella direzione indicata dalla freccia, mentre il cono di colore giallo altro non è che la luce emessa da una sorgente laser (532 nm – 220 nm) la quale permette attraverso un meccanismo complesso di ricostruire in una regione dello spazio, il flusso dell'aria.

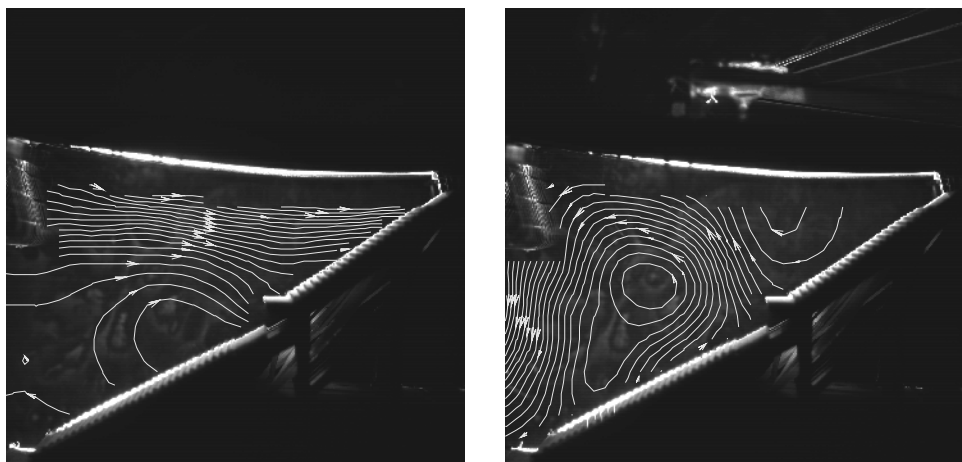


Fig. 54 Confronto dei flussi di aria interni alla copertura prima e dopo l'introduzione della nuova copertura

Nelle immagini estremamente suggestive e di facile comprensione, rappresentano le linee di flusso.

I risultati ottenuti in termini di distribuzione delle pressioni hanno evidenziato un accentuato effetto di schermatura della vecchia copertura sulla nuova.

In particolare eccetto che per le direzioni prossime a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , l'effetto schermante produce una distribuzione media positiva delle pressioni nette dirette verso il basso.

- Visualizzazioni di linee di flusso

La tecnica della visualizzazione delle linee di flusso, utilizzata anche nello studio del confort dello stadio Delle Alpi, è uno strumento importante per visualizzare e comprendere come i flussi di vento investono le opere dell'uomo.

Ad un primo sguardo, la visualizzazione delle linee di flusso può apparire come una speculazione intellettuale, ma in realtà conoscere come queste circondano talune strutture diventa importante per migliorare la fruibilità della struttura stessa.

Riportiamo due sistemi differenti per ricavare le linee di flusso:

- il primo, utilizza dei traccianti che vengono messi nell'olio che cosparge il suolo:

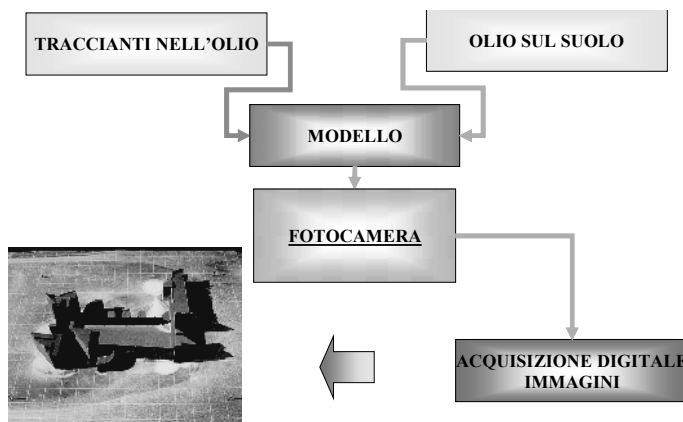


Fig. 55: Visualizzazione a tracciamento ed olio (nel caso del modello del Nuovo Palazzo di Giustizia di Firenze, 2001)

- il secondo, chiamato PIV, è un sistema interamente informatizzato di cui l'immagine di seguito riporta lo schema di funzionamento:

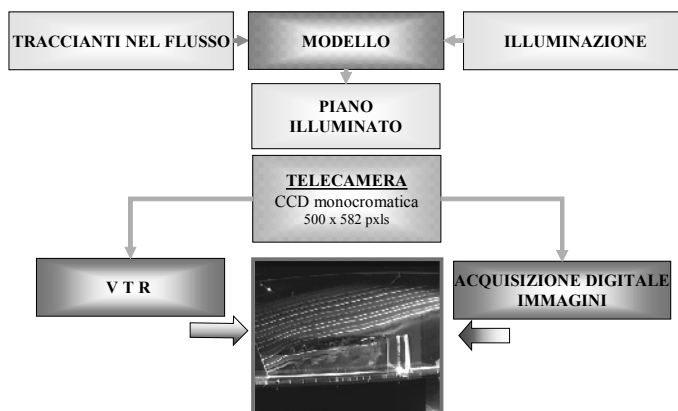


Fig. 56: diagramma schematico della tecnica di visualizzazione di flusso

Come si vede dallo schema, durante la prova si introduce nel flusso un tracciante, il quale viene da un lato illuminato in maniera intermittente ad intervalli di tempo prestabiliti da un laser, dall'altro attraverso l'uso di una telecamera si acquisiscono le immagini.

L'elaborazione della sequenza delle immagini permette di determinare gli spostamenti delle singole particelle, ottenendo così l'esatto percorso delle linee di flusso.

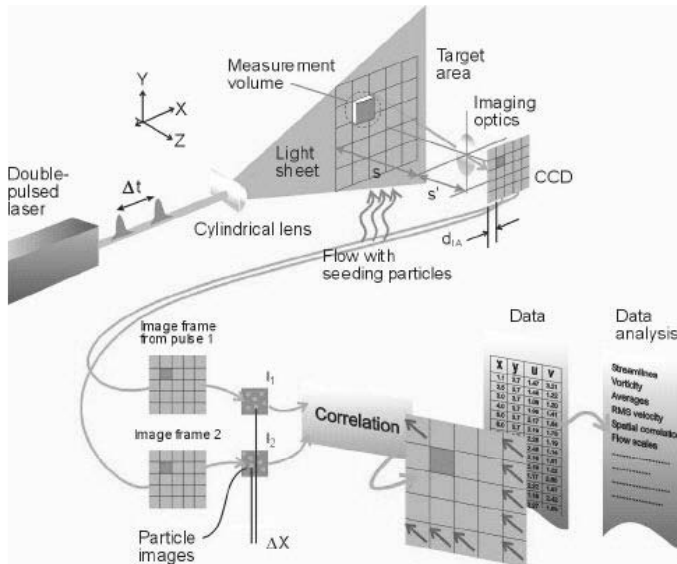


Fig. 57: La catena di misura con tecnica PIV

Le due tecniche sopra espone furono utilizzate contemporaneamente per studiare problemi di comfort per il Nuovo Palazzo di giustizia di Firenze:

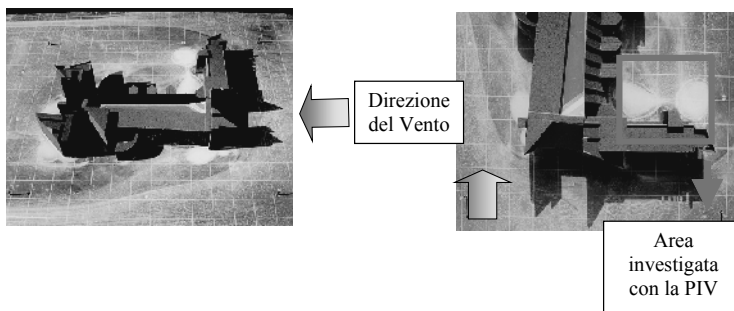


Fig. 58 Rappresentazione delle linee di flusso sul modello del Nuovo Palazzo di Giustizia di Firenze

La superficie fu ricoperta con una miscela di olio e pigmento (biossido di titanio): la configurazione visualizzata è un involuppo delle linee di flusso al suolo che consente l'individuazione delle zone di ricircolo e di distacco della vena fluida.

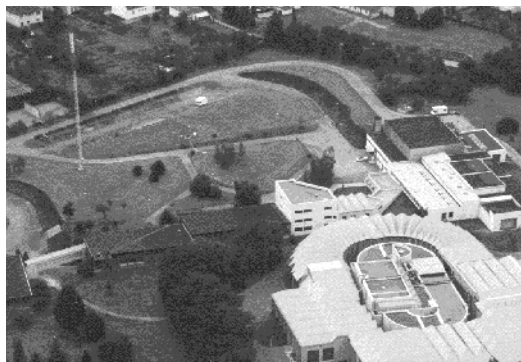
*Effetti climatici combinati*

Fig. 59 Foto del centro di ricerca CSTB di Nantes

La parte dedicata all'ingegneria del vento che studia gli effetti combinati del vento con sole, sabbia, neve, pioggia e ghiaccio viene studiata nel centro di ricerca CSTB di Nantes.

Le potenzialità di tale centro sono notevoli, se si pensa che è la galleria del vento più grande del mondo, con due circuiti uno interno all'altro.

Di seguito sono riportate alcune foto significative in cui sono rappresentati esperimenti effettuati nelle varie condizioni climatiche.

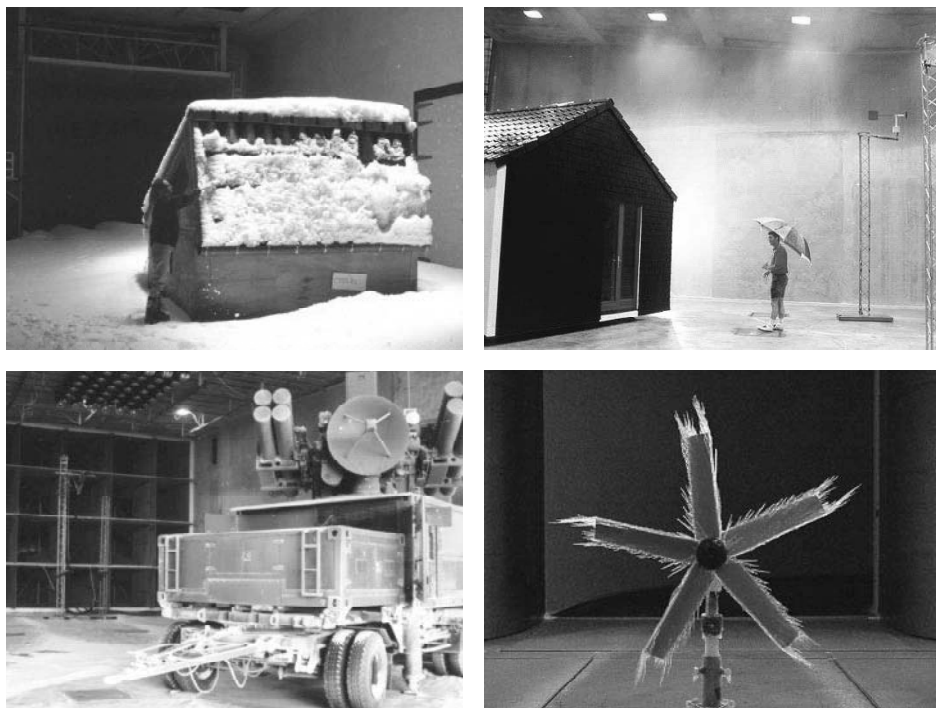


Fig. 60 Foto di possibili applicazioni alternative della galleria del vento del centro di ricerca CSTB di Nantes



## AZIONI DEL VENTO E LE GRANDI STRUTTURE: TRE GRANDI OPERE ESEMPLARI

Nei capitoli precedenti, ho cercato di fornire un quadro generale su quello che vuol dire oggi “fare” Ingegneria del Vento.

Abbiamo visto come in realtà la sperimentazione in questo campo è necessaria e questo perché oltre a fornire uno strumento d’indagine per rendere più affidabili le nostre strutture, consente anche di rendere le opere dell’uomo più confortevoli e quindi più vivibili.

Forse non sarebbe necessario andare oltre con gli esempi, poiché credo ormai evidente il ruolo di questa disciplina all’interno della società moderna, ma ritengo comunque utile accennare a sfide che l’uomo ha lanciato alla storia delle costruzioni e che ha saputo vincere proprio grazie ai risultati ottenuti nell’ambito dell’ingegneria del vento.

### *Copertura dello stadio olimpico*

La copertura dello stadio Olimpico di Roma è un esempio di competenza strutturale, nonché un esempio di una raffinata eleganza estetica.

Nel 1988 in seguito alla bocciatura da parte della Commissione per i Beni Ambientali del progetto della copertura che per gli addetti ai lavori sarebbe stata realizzata, i progettisti si trovarono improvvisamente di fronte ad “un foglio bianco” a 18 mesi dall’inizio dei campionati del mondo di calcio.

Il risultato, frutto del lavoro di molti progettisti è sotto l’occhio di tutti, una struttura indubbiamente elegante, anche grazie alla notevole leggerezza.

Si pensi che la struttura è semplicemente composta da un anello reticolare esterno interamente compresso e un cavo interno preteso, necessario mantenere stabili le travi di funi radiali che sorreggono il telo che serve a coprire le gradinate.

È evidente che una struttura così leggera risulta esser sensibile al vento, tanto che anche noi, che al tempo non possedevamo ancora la galleria, realizzammo un modello computazionale della struttura, studiando in profondità la dinamica (dalle forme modali alla risposta della copertura ad una raffica di vento).

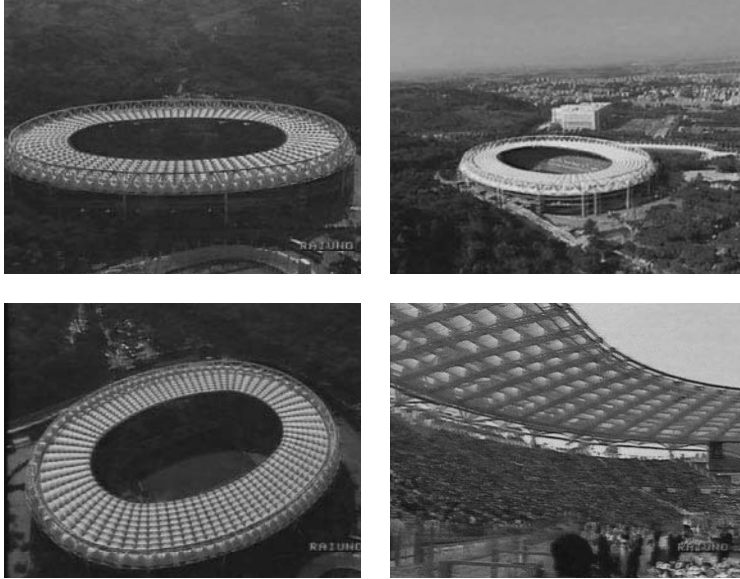


Fig. 61 Fotogrammi della copertura dello stadio olimpico di Roma

Di seguito le prime tre forme modali e una immagine della risposta dinamica.

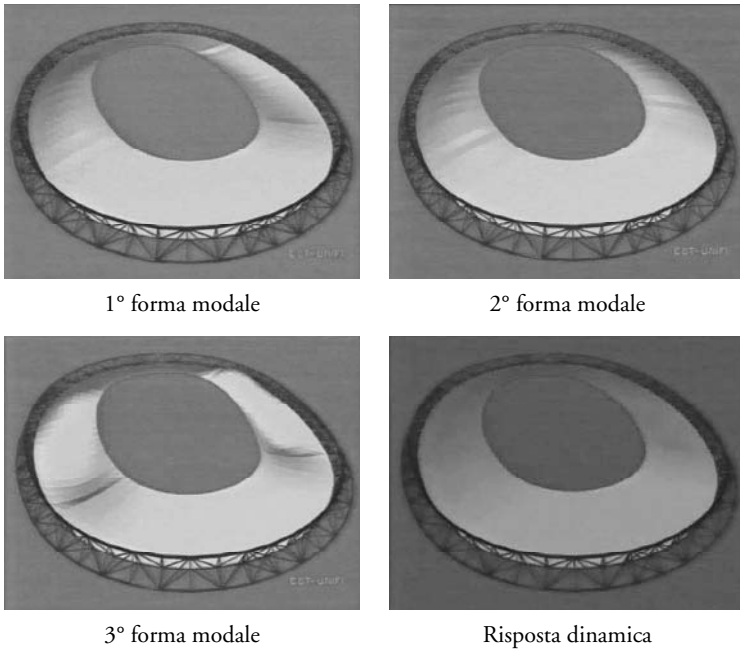


Fig. 62 Rappresentazione delle forme modali

*Il viadotto di Millau*

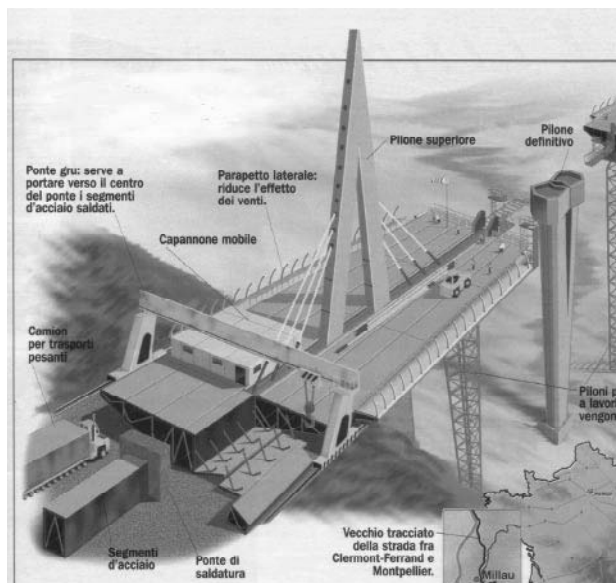


Fig. 63 Illustrazione delle fasi di costruzione dell'opera

Un esempio recentissimo di opera progettata pensando all'azione del vento è sicuramente il viadotto Miliaiu, costruito nel Sud della Francia, nel tratto che collega Clermout-Ferrand a Montpellier.

Si tratta di un record mondiale per il ponte più alto: infatti l'impalcato si trova a 270 m. dal fiume Tharn. Si consideri inoltre che sopra l'impalcato si elevano i piloni di aggancio dei cavi per gli stralli.



Fig. 64 Particolari costruttivi



Ovviamente in fase di studio, furono realizzati modelli in galleria del vento non solo per l'opera finita ma anche per le fasi transitorie, come per esempio le colonne provvisorie a traliccio che potevano risentire in talune situazioni dell'effetto ribaltante del vento.



Fig. 65 Modello in scala utilizzato per le prove in galleria del vento

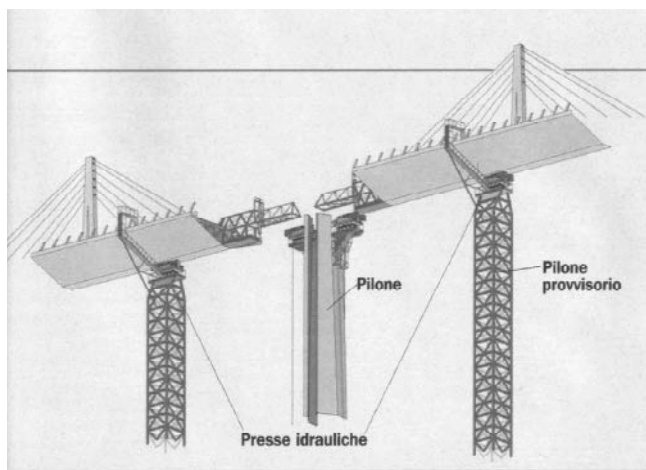


Fig. 66 Illustrazione di una fase di montaggio dell'opera

*Ponte sullo stretto di Messina*



Fig. 67 Immagine del futuro ponte sullo stretto di Messina

Il ponte di Messina, un'opera tanto discussa del quale non potevamo tacere, visto tra l'altro l'interesse specifico del nostro centro di ricerca; infatti, recentemente il CRIACIV ha deliberato l'attivazione di una campagna di sperimentazione atta a ottimizzare le dimensioni dell'impalcato multicassone del tipo di Messina.

Per meglio comprendere il profilo, di seguito è riportata la sezione dell'impalcato.

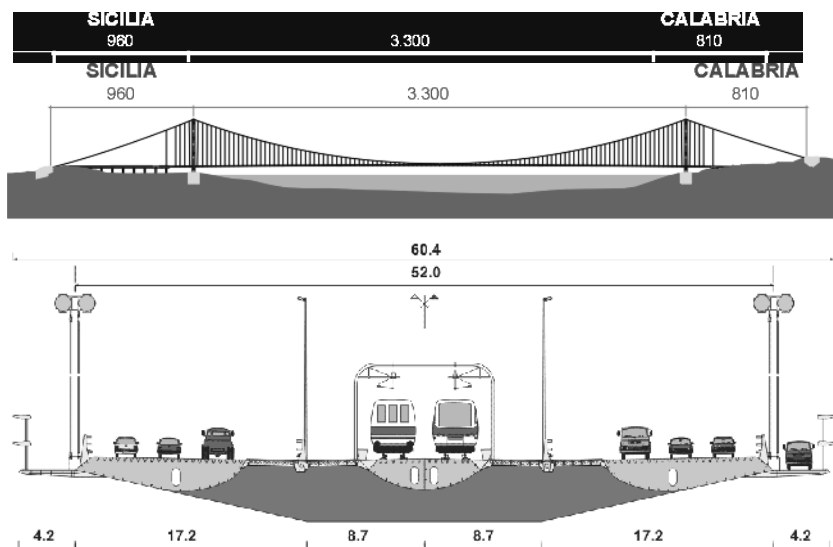


Fig. 68 Immagine dell'impalcato del ponte

Le dimensioni di questo capolavoro sono impressionanti: la larghezza complessiva dell'impalcato è di circa 60m per una lunghezza complessiva della campata di 3300m.



## CONCLUSIONI

Come accennato all'inizio di questo lavoro, l'intento della prolusione prima e del seguente articolo poi è quello di far emergere una disciplina, quale l'ingegneria del vento, che generalmente non gode di notorietà se non presso gli addetti ai lavori.

Ho voluto inoltre mostrare il lavoro svolto dal nostro centro di ricerca, il quale ritengo possa essere ritenuto di fatto un piccolo centro di eccellenza a tutti gli effetti.

Ovviamente i risultati ottenuti non sono frutto del caso ma di un intenso lavoro da parte di tutti noi ricercatori coinvolti e di una politica volta a valorizzare l'alta formazione.

A tal proposito vorrei citare i corsi che la nostra Università e il CRIACIV organizzano:

- Stages e tirocini per studenti / laureandi / dottorandi, anche nell'ambito dei programmi di mobilità europea ed internazionale (LEONARDO, TEMPUS, SOCRATES)
- Formazione alla ricerca post-dottorato, anche nell'ambito dei programmi quadro dell'UE
- Attivazione / coordinamento di un corso di dottorato internazionale in "Gestione del rischio nell'ambiente costruito"

Per citare alcuni esempi di collaborazione internazionale nell'ambito della formazione, vorrei ricordare tra l'altro l'arrivo circa 3 anni fa di stagisti indiani, i numerosi borsisti europei, i colleghi americani, questo solo per dire che il nostro laboratorio ha ormai una spiccata dimensione internazionale ed una grande rete di collaborazione.

Dalle cose dette finora si capisce che il lavoro svolto nell'ambito dell'ingegneria del vento è notevole, ma altrettanto notevoli sono gli obiettivi che il nostro centro di ricerca si propone di realizzare:

1. consolidamento e strutturazione, il che passa obbligatoriamente per un incremento e una specializzazione delle attrezzature ed uno sviluppo del personale.
2. ricerca, innovazione e promozione/sviluppo: riteniamo di poter raggiungere questo obiettivo attraverso la promozione di attività di ricerca (convenzioni / contratti, attività per conto terzi anche presso le sedi consorziali del centro), attraverso

l'intensificazione e la diversificazione della partecipazione ai progetti di ricerca italiani/europei ed infine un coordinamento o associazione con altri laboratori italiani ed europei.

3. investimento nell'alta formazione attraverso la promozione e partecipazione a corsi di perfezionamento post-laurea, quali corsi di aggiornamento per organismi professionali, master di II livello e corsi di dottorato; in più ritengo necessario proseguire sulle giornate di incontro studio sull'utilizzo della galleria del vento e la redazione di materiale informativo brochure a schede, bollettino informativo elettronico (CRIACIV NEWS) ed altro.

Grazie a tutti per la cortese attenzione.









