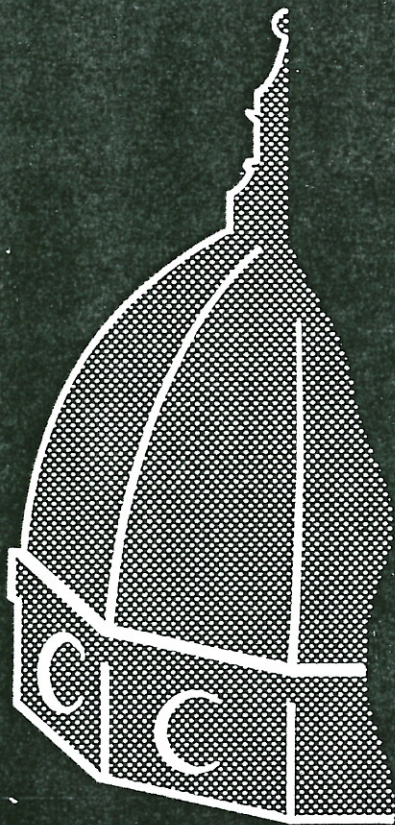




ASSOCIAZIONE NAZIONALE
PER
L'INGEGNERIA DEL VENTO

INGEGNERIA DEL VENTO IN ITALIA



Pitagora Editrice Bologna

BIBLIOGRAFIA

- [1] AEREONAUTICA MILITARE-CENTRO NAZIONALE DI METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA AEREONAUTICA, "Frequenze e medie delle Osservazioni Meteorologiche in superficie", (periodo 1951/78) Vol I - Roma 1983
- [2] AEREONAUTICA MILITARE-CENTRO NAZIONALE DI METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA AEREONAUTICA, "Valori estremi di alcuni parametri meteorologici", (periodo 1951/78) Vol I - Roma 1983
- [3] ISTITUTO CENTRALE DI STATISTICA, "Annuario di statistica meteorologica", - Roma
- [4] OSSERVATORIO GEOFISICO DELLA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MODENA, "Osservazioni meteorologiche"
- [5] OSSERVATORIO GEOFISICO DELLA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA, "Osservazioni meteorologiche"
- [6] SANSONE E., "La stazione per il rilievo dei dati ambientali", Analisi dell'I.U.N. vol. LV, Napoli 1986
- [7] DE MAIO A., SANSONE E., PULCI DORIA G., TAGLIATELA L., "Caratterizzazione ambientale del golfo di Napoli: rilievi preliminari di ventosità", 2° Congresso AIOM, 15-17 novembre, Napoli 1989
- [8] CNR - PIANO FINALIZZATO ENERGETICA, "Indagine sulle risorse eoliche in Italia", Roma 1981
- [9] DE MAIO A., MORETTI M., ROSINI E., "Su alcune caratteristiche dell'andamento annuo della eliofanìa a Napoli", Geofisica e meteorologia Vol. XVIII (n.3/4), Genova 1969

Ringraziamenti

I dati della Aereonautica Militare sono stati forniti agli Autori dall'ing. La Monaca, che li aveva raccolti per ricerche di carattere personale, e che gli Autori stessi avvertono l'esigenza di ringraziare.

Altresì si ringrazia il tecnico Palmiero Antonio per la predisposizione del testo sul computer e per l'organizzazione grafica del presente lavoro.

Atti del

1° Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento IN-VENTO-90

Firenze, 28-30 Ottobre 1990

OSSERVAZIONI SU INDAGINI TEORICHE E CONTROLLI SPERIMENTALI
CONDOTTI SU COPERTURE LEGGERE DI GRANDI DIMENSIONIMassimo Majowiecki
Università di Bologna

Sommario - La modellazione teorica relativa all'analisi dinamica aleatoria di grandi coperture quasi-orizzontali appare ancora oggi non completamente consistente. La descrizione della distribuzione delle pressioni sulla superficie di copertura non può trascurare la componente turbolenta del vento trasversale e non può essere affidata ad un coefficiente, indipendente da $t(C_p)$, una variazione vettoriale nel passaggio dalla direzione del vento ad una componente turbolenta di pressioni normali alla copertura.

Indagini sperimentali su modello permettono una preliminare analisi comparativa dei risultati.

Abstract - The theoretical model related to the random dynamical analysis of large quasi-orizental coverings appear to be not completely consistent. The description of pressure distribution on the covering surface cannot disregard the transversal component of the wind and also is impossible to give the vectorial role to pressure coefficients C_p , independent to time, to change the direction from along wind to normal pressure distribution.

Experimental investigation on scale model gives the possibility of a first comparative analysis.

IL MODELLO TEORICO - Valori caratteristici di progetto-verifica

Il modello teorico fino ad oggi predisposto per l'analisi della risposta di sistemi strutturali a comportamento geometrico-meccanico lineare, soggetti all'azione dinamica aleatoria del vento, permette di determinare i valori caratteristici di verifica dello stato di deformazione e di sollecitazione nella forma:

$$\hat{x} = \bar{x} + g \sigma_x \quad (1)$$

dove: \hat{x} = valore massimo della risposta,

g = fattore di picco,

σ_x = deviazione standard del processo $x(t)$ (rms).

La varianza del processo è calcolabile in funzione delle proprietà del sistema strutturale e dello spettro (DSP) delle forze aleatorie. Per la determinazione dei valori caratteristici di progetto e verifica è necessario, inoltre, conoscere la funzione di densità di probabilità mediante la quale è possibile determinare g .

La densità di probabilità applicabile alla velocità del vento è di tipo gaussiano e, considerando il processo $x(t)$ a media nulla, è esprimibile nella forma seguente:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2 / 2 \sigma_x^2} \quad (2)$$

dove $\sigma_x = \sqrt{\bar{x}^2}$ è la deviazione standard di $x(t)$ o rms.

Nel caso di distribuzione normale di $p(x)$ la distribuzione della funzione densità di probabilità dei massimi o inviluppo di un processo gaussiano a banda stretta può essere descritta dalla distribuzione di Rayleigh

$$p(a) = \frac{a}{\sigma_x^2} \cdot e^{-\frac{a^2}{2\sigma_x^2}} \quad (3)$$

con σ_x^2 varianza del processo $x(t)$.

Definendo \hat{x} come valore massimo o estremo del processo $x(t)$ in un periodo d'osservazione T_z , Davenport [1] propone la sua determinazione come valore medio dei picchi della distribuzione della densità di probabilità dei valori massimi \hat{x} , in base all'ipotesi di distribuzione a banda molto stretta di $p(\hat{x})$.

Il valore medio dei picchi può essere valutato con la

$$\hat{x} = g \sigma_x,$$

dove

$$g = \sqrt{2 \log_e vT} + 0,5772 / \sqrt{2 \log_e vT}, \quad (4)$$

$$v = \sqrt{\left[\int_0^\infty f^2 S(f) df \right] / \left[\int_0^\infty S(f) df \right]} \quad (5)$$

è la frequenza apparente del processo, T è il periodo convenzionale di osservazione ed $S(f)$ lo spettro del processo.

Dalla fig. 1 è possibile osservare la distribuzione della funzione densità di probabilità del processo e dei suoi valori estremi. Per periodi $T = 100, 1000$ e 10000 , corrispondenti ad intervalli di tempo di circa 15 minuti, 3 ore e 30 sec. rispettivamente, il valore estremo eccede il valore medio di circa 3,5-4,5 il valore della deviazione standard.

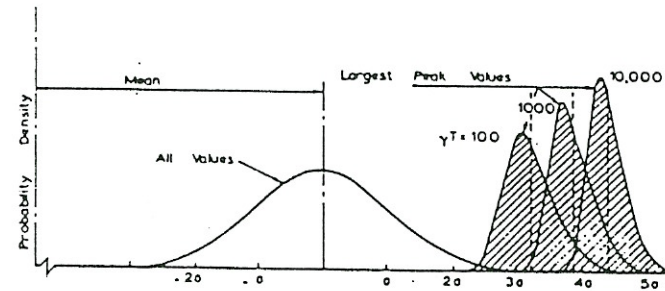


Fig. 1. Funzione densità di probabilità di un processo random e dei suoi valori estremi.

Osservazione 1

La distribuzione del vento indisturbato e delle pressioni o forze su strutture puntuali o superfici quasi normali alla direzione del vento, è ritenuta di tipo gaussiano nella letteratura corrente.

Nel caso di superfici sub-orizzontali in generale e in casi particolari quali le coperture molto estese e di pensiline per stadi, non risultano allo scrivente notizie a riguardo della distribuzione della densità di probabilità, delle forze sull'intradosso e/o estradosso. A questo scopo è stata fatta una parte delle indagini sperimentali su modello rigido (v. tab. 1), dove è possibile osservare che i coefficienti di picco $(\hat{x}-\bar{x})/\text{rms}$ variano tra 3.9 e 6.9, in funzione della posizione di misura, per azimuth di 0° [2]. Si può pertanto osservare che il discostamento dalla gaussianità del processo statistico di descrizione del carico in copertura può apportare notevoli errori nella valutazione della parte fluttuante della risposta teorica (specialmente nel range di frequenza di background) calcolata su periodi convenzionali di $T = 10$ min.

DSP dei processi d'uscita

La determinazione della parte fluttuante del processo di risposta è basata sul calcolo del rms (σ_x) che si ottiene integrando la DSP $S_x(f)$,

$$\sigma_x = \left[\int_0^\infty S_x(f) df \right]^{1/2} \quad (6)$$

Tab. 1. Coefficienti di pressione - fattori di picco sperimentali.

Azimutà: 0°

PANEL	Pressure Coefficients												g
	UPPER SURFACE				LOWER SURFACE				FULL PANEL NET				
	max	min	mean	rms	max	min	mean	rms	max	min	mean	rms	
1	0.14	-0.80	-0.30	0.10	0.29	-0.31	0.03	0.06	0.19	-0.80	-0.27	0.10	4.6
2	0.40	-1.10	-0.37	0.18	0.93	-0.43	0.08	0.14	1.23	-1.22	-0.30	0.24	6.4
3	0.28	-0.83	-0.31	0.12	0.40	-0.35	0.04	0.09	0.29	-0.91	-0.28	0.13	4.4
4	0.50	-1.19	-0.37	0.17	0.88	-0.40	0.08	0.14	1.29	-1.26	-0.29	0.23	6.9
5	0.20	-0.93	-0.36	0.12	0.47	-0.36	0.06	0.09	0.41	-0.99	-0.30	0.15	4.7
6	0.15	-0.77	-0.29	0.09	0.40	-0.24	0.10	0.07	0.26	-0.72	-0.20	0.10	4.6
7	0.24	-1.12	-0.40	0.14	0.87	-0.29	0.12	0.08	0.66	-1.02	-0.27	0.15	6.2
8	0.11	-0.58	-0.24	0.08	0.38	-0.17	0.12	0.06	0.16	-0.48	-0.11	0.07	3.9

La matrice di densità spettrale di potenza del processo di risposta, nel nostro caso in termini di spostamenti, relativi agli N gradi di libertà del modello teorico del sistema strutturale, si presenta, facendo uso dell'analisi modale, nella forma:

$$[S_x(f)]_{N \times N} = [\psi]_{N \times m} [h^*(f)]_{m \times m} [\psi_x^T]_{m \times n} [S_f(f)]_{n \times m} [\psi_x]_{n \times m} [h(f)]_{m \times m} [\psi]^T_{m \times N} \quad (7)$$

dove il rango delle matrici è:

N relativo al numero globale dei gradi di libertà del sistema;

m relativo al numero dei modi di vibrare considerati;

n relativo alle forze nodali considerate agenti solo in direzione z (normale alla superficie della copertura considerata orizzontale).

L'elaborazione numerica per via matriciale della (7) è improponibile, in termini di tempo-costi di elaborazione e di occupazione di memoria, in particolar modo per un elevato numero di gdl; inoltre occorre l'integrazione su un dominio non finito e, quindi, dover eseguire la procedura più volte.

Una notevole riduzione degli oneri computazionali è stata ottenuta considerando attentamente la struttura matematica della relazione risolvete il problema, che esprime il termine diagonale generico di $S_x(f)$,

$$S_{x11}(f) = \sum_{j=1}^n P_{ij} S_{fjj} T_{ji} + 2 \sum_{\ell=1}^n \sum_{m=1}^n S_{f\ell m} \operatorname{Re}(P_{i\ell} T_{mi}) \quad (8)$$

dove:

P_{ik} termine generico della i -esima riga del prodotto matriciale $[\psi] \cdot [h^*(f)] [\psi_x^T] = [P]$;

T_{ki} termine generico della i -esima colonna del prodotto matriciale $[\psi_x] \cdot [h(f)] [\psi]^T = [T]$.

Ponendo a confronto la i -esima riga di $[P]$ con la i -esima colonna di $[T]$ si nota che risulta:

$$P_{ij}(f) = T_{ji}^*(f) \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

Ne discende che la matrice $[T]$ è la matrice complessa coniugata trasposta della matrice $[P]$. Da questa proprietà discende, inoltre, che il secondo termine a destra della (8), che tiene conto del contributo dei termini non diagonali, è formato dal doppio della parte reale, essendo la somma di due funzioni complesse coniugate con eguali coefficienti numerici.

Il secondo addendo della (8) può considerarsi fondamentalmente una somma di funzioni esponenziali del tipo [3]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-a_i x} \quad (10)$$

dove l'esponente deriva dalla funzione di correlazione e vale $-(f\sqrt{V})\bar{a}$, essendo \bar{a} la pseudodistanza tra due punti della copertura.

Senza eseguire le somme indicate in (10), la funzione $F(x)$ può essere approssimata da una funzione $F^{ap}(x)$, costituita da un unico esponenziale tale che:

$$F^{ap}(x) = A e^{-\alpha x} \quad (11)$$

dove

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^N a_i$$

ed \bar{a} da determinare tra

$$\begin{cases} \bar{a}_{\min} = \min \{a_i\}_{i=1, \dots, N} \\ \bar{a}_{\max} = \max \{a_i\}_{i=1, \dots, N} \end{cases} \quad (12)$$

in modo da ottenere:

$$\bar{A} e^{-\bar{\alpha}_{\max} x} < F(x) < \bar{A} e^{-\bar{\alpha}_{\min} x} \quad (13)$$

$$\psi \times C \{0, +\infty\} .$$

E' possibile determinare un valore di $\alpha = \bar{\alpha}$ che renda globalmente nulla la funzione errore (fig. 2):

$$\left| \int_0^{+\infty} \sum_{i=1}^N a_i e^{-\alpha_i x} dx - \int_0^{+\infty} \bar{A} e^{-\bar{\alpha} x} dx \right| = 0 \quad (14)$$

dalla quale si ottiene:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{\sum_{i=1}^N \frac{a_i}{\alpha_i}} \quad (15)$$

La validità del risultato relativo alla componente dello stato di deformazione e sollecitazione dipende, osservando la (7), dalla precisa descrizione della matrice di trasferimento [4], specialmente in relazione al contenuto in smorzamento (il sistema strutturale presenta una notevole componente di smorzamento aerodinamico positivo), dai contributi modali considerati e, principalmente, dalla matrice delle DSP incrociate delle forze $[S_f(f)]$.

DSP delle forze teoriche e sperimentali

La DSP in termini di forze nodali è espressa dalla:

$$S_{FJ}(P_1, P_2, f) = S_{PJ}(P_1, P_2, f) A_J^2, \quad (16)$$

matrice di ordine nxn per ogni frequenza considerata, con A_J = area d'influenza del nodo J ed S_P , DSP delle pressioni, ricavabile, a sua volta, in funzione della DSP della velocità del vento, tramite la:

$$S_{PJ}(P_1, P_2, f) = C_p^2 S^2 \bar{v}^2 S_{VJ}(P_1, P_2, f) . \quad (17)$$

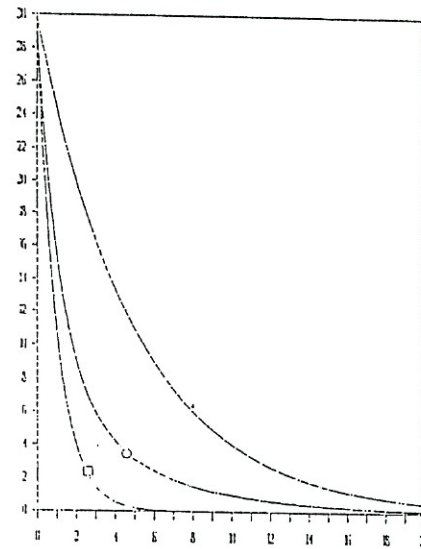


Fig. 2a. + funzione maggiorante
o funzione effettiva
□ funzione minorante

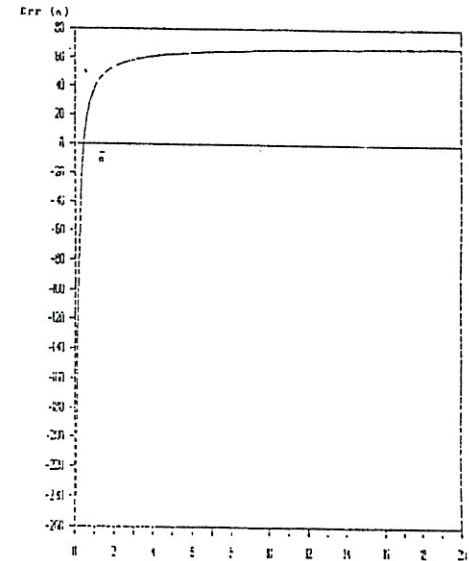


Fig. 2b. Funzione errore al variare di α .

Nel caso in esame le DSP della velocità del vento $S_{VJ}(P_1, P_2, f)$ sono state determinate, per via teorica, mediante il modello di ESDU:

$$S_V(f) = 30,85 \bar{V} [1 + 337500 (f/\bar{V})^2]^{5/6}; \quad (18)$$

moltiplicando per la funzione di correlazione spaziale

$$\sqrt{\text{Coh}(P_1, P_2, f)} = \exp\{-f/\bar{V}[\sqrt{(C_x^2 D_x^2 + C_y^2 D_y^2)}]\} \quad (19)$$

con $C_x = 2$, $C_y = 16$ e x direzione di propagazione del vento.

La funzione $S_V(f)$ è diagrammata per $\bar{V} = 28,65$ m/sec in fig. 3.

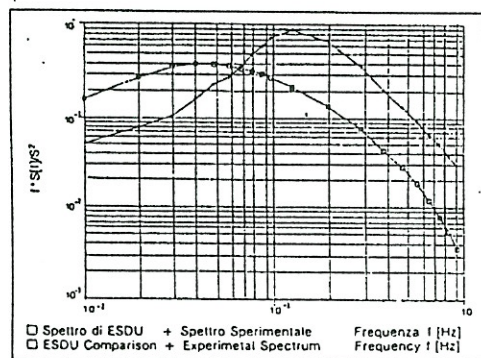


Fig. 3. Analisi comparativa del contenuto in frequenza tra la DSP del vento (direzione u) e DSP delle pressioni rilevata sperimentalmente.

Nella stessa figura viene sovrapposto il diagramma corrispondente delle DSP delle pressioni, ottenuta sperimentalmente su modello rigido. I diagrammi sperimentali sono stati utilizzati per la modellazione numerica approssimandoli con una serie di linee rette, in diagramma bilogaritmico, espresse da funzioni:

$$\log S = \log S_0 + b \log f \quad (20)$$

che significano un legame tra le variabili di tipo esponenziale

$$S(f) = S_0 f^b \quad (21)$$

con

$$S_0 = \text{valore di DSP per } f = \bar{f}$$

e b che controlla la variazione dello spettro (per $b = 0$, si ha una distribuzione "white noise" $S(f) = S_0$).

Con le DSP delle pressioni sulla copertura si può ulteriormente semplificare l'indagine dinamica considerando che il valore rms della risposta

$$\sigma^2 = \frac{1}{K^2} \int_0^{\infty} S_p(f) |H(f)|^2 df \quad (22)$$

può essere valutato separatamente,

$$\sigma^2 = \frac{1}{K^2} \int_0^{f_0} S_p(f) df + \frac{1}{K^2} \int_0^{\infty} S_p(f_0) |H(f)|^2 df \quad (23)$$

considerando come approssimazione che $H(f) = 1$ per la banda di frequenze da 0 a f_0 (frequenza naturale). La prima parte della (23) ci dà l'effetto di "back-ground", che è valutabile direttamente dall'integrale della $S_p(f)$ sperimentale, pertanto l'integrazione numerica può essere svolta solo per il campo di frequenze che interessano la struttura.

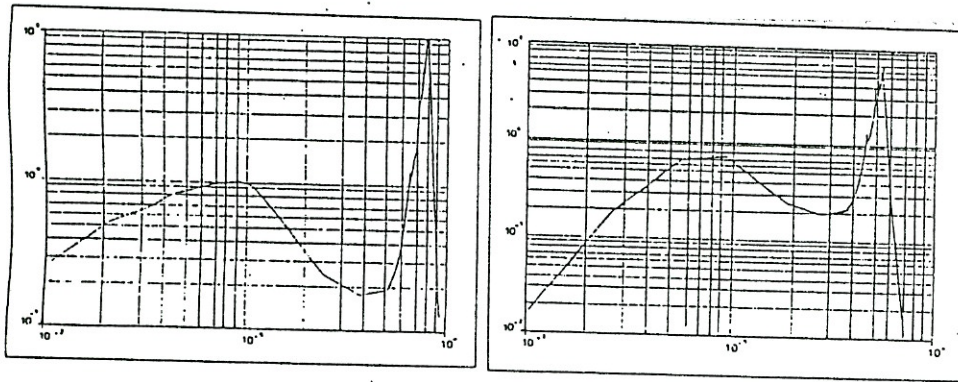
Osservazione 2

Dall'osservazione comparativa dell'analisi teorica e dell'analisi sperimentale si può notare che:

- la descrizione teorica delle DSP incrociate delle pressioni non sono in accordo con quelle rilevate sperimentalmente. In fig. 3 si può notare come la DSP diagonale autocorrelata sperimentale delle pressioni sia spostata in contenuto in frequenza con picco a 0,1 Hz invece che a 0,05 Hz, dato in accordo con ESDU. Come già rilevato in [4], non è possibile trascurare il contenuto di turbolenza di $w(t)$;
- dall'osservazione precedente si può constatare che i coefficienti di pressione, ai quali dovrebbe essere affidato il trasferimento delle DSP dal campo indisturbato delle velocità al campo delle pressioni distribuite sulla superficie della copertura, non possa essere ottenuto, in questi casi, come media temporale;
- dal confronto tra risultati teorici (DSP di spostamento) si può rilevare che non è possibile trascurare il contributo dei termini modali misti nella (7)(fig. 4 a-b);
- nel caso di grandi coperture a struttura leggera (deformabile) si può rilevare, dal confronto dei risultati teorici (ottenuti su DSP sperimentali) e dei risultati sperimentali su modello aeroelastico (fig. 4 c-d), che la funzione di trasferimento strutturale deve essere aggiornata per tenere conto della rigidità e smorzamento aerodinamico.

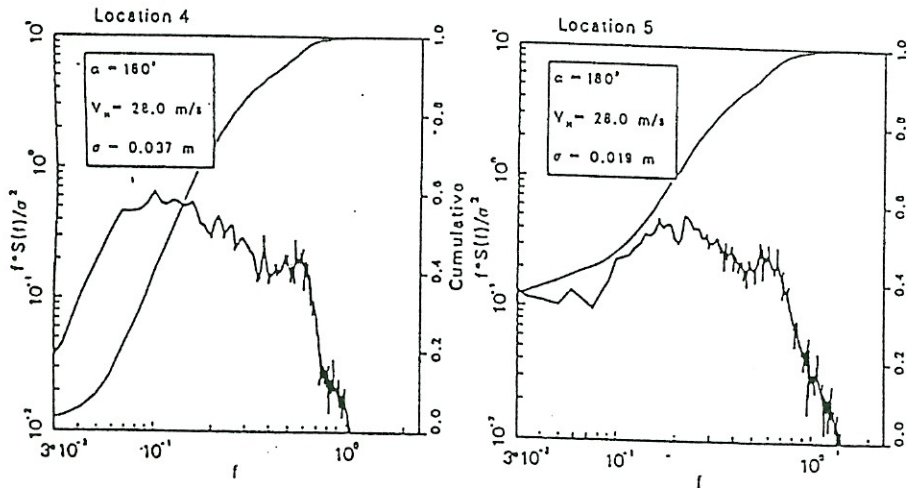
CONCLUSIONI

Allo stato attuale è impossibile condurre l'analisi progettuale completamente per via teorica nel caso di grandi coperture quasi-orizzontali. È indispensabile ottenere, per via sperimentale, la DSP delle pressioni.



a)

b)



c)

d)

Fig. 4.

- a) DSP dello spostamento principale senza considerare i termini modali misti.
 b) DSP dello spostamento considerando il contributo dei termini misti.
 c) d) DSP sperimentali.

Sono auspicabili indagini sperimentali su vera grandezza in modo da poter correlare i risultati ottenuti per via teorica e sperimentale su modelli in scala [5].

BIBLIOGRAFIA

- [1] A.G. Davenport, "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading", Paper No. 6739, University of Western Ontario.
- [2] B.J. Vickery et al. "Wind tunnel study of the proposed roof for the Olympic Stadium - Rome", Final Report, BLWT-SS7-1989, Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, London, Canada.
- [3] M. Corbo, M. Majowiecki, "Analisi dinamica aleatoria degli effetti del vento sulle coperture", Istituto di Tecnica delle Costruzioni, Bologna, 1988.
- [4] G. Solari, D. Stura, "Sulla determinazione della risposta dinamica all'azione del vento della copertura delle tribune dello stadio G. Carlini in Genova", *Costruzioni Metalliche*, n. 3, 1985.
- [5] M. Majowiecki, B. Vickery, "Theoretical and experimental investigation on the dynamic behaviour of long span lightweight structures", in preparazione per la I.C.W.E., London, Canada.