

D. Dafarra, P. Micucci,
E. Dassori, G. Solari

Le azioni e gli effetti del vento nell'evoluzione degli edifici alti

La progettazione architettonica e strutturale delle costruzioni costituisce una sintesi organica delle esigenze formali e funzionali dell'opera. Questa memoria studia la dinamica e l'aerodinamica degli edifici alti interpretandone il ruolo in relazione alla forma, alle dimensioni e al materiale. Si dimostra che una scelta bilanciata di questi parametri, integrata da idonei sistemi di controllo meccanico e aerodinamico, ne ottimizza il progetto e il comportamento [1].

L'analisi è svolta parametricamente prendendo in esame varie forme e dimensioni dell'edificio. Le strutture della casistica sono realizzate in cemento armato e in acciaio. La velocità del vento è calibrata a tipici siti urbani europei. I parametri aerodinamici sono assegnati mediante prescrizioni normative o applicando i risultati di prove in galleria del vento. I parametri meccanici sono dedotti da banche dati inerenti campagne di prove al vero. Si tiene conto della presenza di apparecchi di controllo meccanico, incrementando convenzionalmente lo smorzamento.

L'analisi della risposta dinamica al vento della casistica selezionata è svolta mediante criteri aggiornati con lo stato dell'arte nella dinamica aleatoria e nell'ingegneria del vento. Le azioni aerodinamiche sono dovute al profilo medio del vento, alle componenti longitudinali e laterali della turbolenza atmosferica e alla scia vorticoso. La risposta tridimensionale è valutata assumendo la dipendenza, per ciascuna componente del moto, dal corrispondente modo fondamentale. La verifica strutturale è eseguita nei riguardi di stati limite convenzionali di spostamento e di accelerazione alla sommità.

Nell'ambito di risultati comunque qualitativi, emerge un quadro generale che evidenzia il ruolo dei parametri in gioco. Lo studio parallelo dell'evoluzione degli edifici alti testimonia che l'ingegnere e l'architetto hanno spesso utilizzato, magari inconsciamente, i principi e le regole che questa ricerca tenta di codificare in forma sistematica seppur preliminare. Dimostra inoltre che l'incremento ulteriore dell'altezza e soprattutto della snellezza degli edifici non potrà che avvenire attraverso accurati processi di sintesi fra le componenti architettoniche, strutturali e aerodinamiche della costruzione e gli apparecchi di controllo del moto oramai indispensabili per crescere ancora.

AZIONI ED EFFETTI DEL VENTO

Sia x, y, z un sistema di riferimento cartesiano con origine O sul terreno (Figura 1). L'asse z è verticale e diretto verso l'alto. La velocità V del vento indisturbato nel punto M all'altezza z è rappresentata dalla legge vettoriale [2]:

$$\mathbf{V}(M, t) = \bar{\mathbf{V}}(z) + \mathbf{V}'(M, t) \quad (1)$$

dove t è il tempo, $\bar{\mathbf{V}}$ è il valore medio della velocità,

La progettazione architettonica e strutturale delle costruzioni costituisce una sintesi organica delle esigenze formali e funzionali dell'opera. Questa memoria studia la dinamica e l'aerodinamica degli edifici alti sottoposti all'azione del vento, interpretandone il ruolo in relazione alla forma, alle dimensioni e al materiale. Lo svolgimento di un'ampia indagine parametrica dimostra che una scelta bilanciata di questi parametri, integrata dall'uso di opportuni sistemi di controllo meccanico e aerodinamico, ne ottimizza il progetto e il comportamento. Lo studio dell'evoluzione degli edifici alti dimostra che l'ingegnere e l'architetto hanno fatto spesso ricorso, magari inconsciamente, ai principi e alle regole che questa ricerca tenta di evidenziare in forma sistematica seppure preliminare e in buona parte qualitativa.

The action and effects of wind in the evolution of tall buildings

Architectural and structural design of buildings is an organic synthesis of the formal and functional requirements of the work. This paper offers a study of the dynamics and aerodynamics of buildings subjected to the action of the wind, with the interpretation of their role in relation with the form, dimensions and material. A broad ranging examination of the parameters shows that the balanced selection of these parameters, combined with the use of suitable mechanical and aerodynamic control systems, optimises the design and behaviour of the structure. The study of the evolution of tall buildings shows that the engineer and architect often make use, not always deliberately, of the principles and rules that this paper attempts to set out in a systematic, though preliminary and to a certain extent qualitative manner.

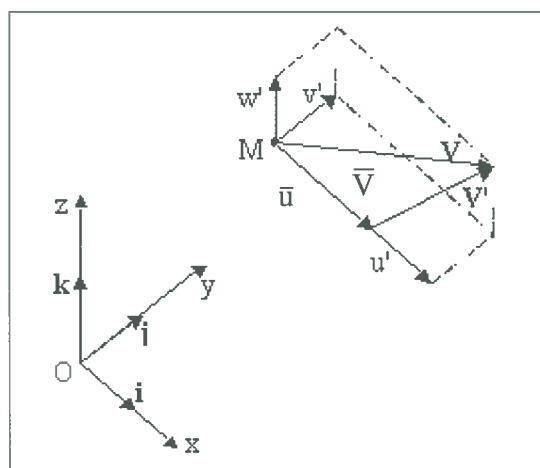


Figura 1
Velocità del vento.

\mathbf{V}' è la fluttuazione turbolenta a media nulla:

$$\bar{\mathbf{V}}(z) = \bar{u}(z) \quad (2)$$

$$\mathbf{V}'(M, t) = iu'(M, t) + jv'(M, t) + kw'(M, t) \quad (3)$$

i, j, k sono i versori degli assi cartesiani x, y, z ; \bar{u} è la velocità media del vento in direzione x alla quale è attribuito un profilo logaritmico funzione della scabrezza del suolo; u', v', w' sono le componenti longitudinale (lungo x), laterale (lungo y) e verticale (lungo z) della turbolenza, schematizzate mediante processi aleatori, stazionari, gaussiani multi-di-

mensionali. La componente verticale della turbolenza è ininfluenza sul comportamento degli edifici e sarà quindi successivamente ignorata; la componente longitudinale e la componente trasversale sono assunte fra loro indipendenti. Si ammette che la turbolenza sia piccola rispetto alla velocità media del vento.

Si consideri un edificio alto H il cui asse verticale coincide con l'asse z del sistema di riferimento. Immerso nel campo di vento sopra descritto, esso è sottoposto a un sistema di forze longitudinali F_x , di forze trasversali F_y e di momenti torcenti F_θ intorno all'asse z [3,4]:

$$F_\alpha(z, t) = \bar{F}_\alpha(z) + F'_\alpha(z, t) \quad (\alpha = x, y, z) \quad (4)$$

$$F'_\alpha(z, t) = F'_{\alpha u}(z, t) + F'_{\alpha v}(z, t) + F'_{\alpha s}(z, t) \quad (\alpha = x, y, z) \quad (5)$$

dove \bar{F}_α è l'azione statica media per unità di lunghezza dovuta alla velocità media del vento; F'_α è la parte fluttuante dell'azione per unità di lunghezza dovuta, in generale, a tre contributi scorrelati: $F'_{\alpha u}$ dipende dalla componente longitudinale della turbolenza, $F'_{\alpha v}$ dipende dalla componente laterale della turbolenza, $F'_{\alpha s}$ è legato alla scia vorticoso. Quest'ultimo termine è generalmente ininfluenza nei riguardi delle azioni nella direzione del vento ($F'_{xs} = 0$) (Figura 2a). Cosiccome la velocità del vento, anche le azioni aerodinamiche sono trattate come processi aleatori stazionari gaussiani multidimensionali.

Nell'ipotesi successivamente adottata in cui l'edificio sia simmetrico rispetto al piano xz, la forza media del vento è parallela all'asse x ($\bar{F}_y = \bar{F}_\theta = 0$). La parte fluttuante della forza longitudinale dipende dalla sola turbolenza longitudinale ($F'_{xy} = F'_{xs} = 0$). Le parti fluttuanti della forza trasversale e del momento torcente dipendono dalla turbolenza laterale e dalla scia vorticoso ($F'_{yu} = F'_{\theta u} = 0$) (Figura 2b). Se la sezione trasversale è circolare, in aggiunta alle precedenti semplificazioni risulta nullo il momento torcente ($F'_\theta = 0$) (Figura 2c).

Si ammette che l'edificio possieda comportamento elastico lineare e dissipazione viscosa. Per effetto delle azioni aerodinamiche sopra illustrate esso è sottoposto a uno stato vibratorio tridimensionale [3]:

$$\alpha(z, t) = \bar{\alpha}(z) + \alpha'(z, t) \quad (\alpha = x, y, z) \quad (6)$$

$$\alpha'(z, t) = \alpha'_u(z, t) + \alpha'_v(z, t) + \alpha'_s(z, t) \quad (\alpha = x, y, z) \quad (7)$$

dove x,y, θ sono nell'ordine lo spostamento longitudinale, lo spostamento trasversale e la rotazione torsionale; $\bar{\alpha}$ è il valore medio dello spostamento (generalizzato), α' è la parte fluttuante dello sposta-

mento somma di tre contributi, $\alpha'_u, \alpha'_v, \alpha'_s$, dovuti rispettivamente alla turbolenza longitudinale, alla turbolenza laterale e alla scia vorticoso. Naturalmente si attivano, a seconda della forma dell'edificio, le componenti dello spostamento a cui corrispondono componenti non nulle dell'azione del vento (Figura 2). Si ammette che le tre componenti del moto x,y, θ siano scorrelate e associate al rispettivo modo fondamentale di vibrazione. Cosiccome la velocità del vento e le azioni aerodinamiche, anche la risposta è un processo aleatorio stazionario gaussiano [3-7].

ANALISI PARAMETRICA

L'analisi parametrica è svolta prendendo in esame edifici prismatici con quattro diverse forme della sezione trasversale: il cerchio, il quadrato, l'esagono e il triangolo equilatero. Per ciascuna di queste si considerano quattro diversi valori A = 900, 2500, 4900, 8100 m² dell'area della sezione trasversale; ad essi corrispondono diversi valori della dimensione caratteristica B, dove B è il diametro del cerchio e il lato del quadrato, dell'esagono e del triangolo. Per ogni forma e dimensione della sezione, l'altezza H è fatta variare con passo costante di 100 m, esplorando valori della snellezza $\lambda = H/B$ compresi fra 2 e 10. Ciascuna struttura è realizzata in cemento armato e in acciaio; nel primo caso la massa per unità di volume (vuoto per pieno) è assunta $\rho_s = 300 \text{ kg/m}^3$; nel secondo caso $\rho_s = 200 \text{ kg/m}^3$.

I parametri meccanici degli edifici sono associati all'altezza H tramite formule empiriche dedotte da banche dati inerenti campagne di prove al vero [8,9]. Le frequenze fondamentali longitudinali e trasversali sono date dalle espressioni [8]:

$$n_x = n_y = \frac{55}{H} \quad \text{per edifici in cemento armato} \quad (8)$$

$$n_x = n_y = \frac{45}{H} \quad \text{per edifici in acciaio} \quad (9)$$

essendo H espresso in metri. La frequenza fondamentale torsionale è data dall'espressione [8]:

$$n_\theta = \frac{72}{H} \quad \text{per qualunque edificio} \quad (10)$$

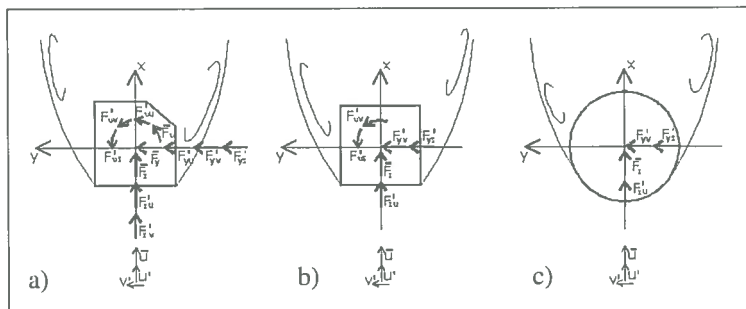
Applicando l'Eurocodice 1 [9], i coefficienti di smorzamento longitudinale e trasversale sono associati alle corrispettive frequenze fondamentali mediante le relazioni:

$$\xi_\alpha = a n_\alpha + b; \quad \xi_\alpha \geq \xi_{\alpha, \min} \quad (11)$$

nelle quali $a = 0.045$, $b = 0.05$, $\xi_{\alpha, \min} = 0.016$ per gli edifici in cemento armato; $a = 0.045$, $b = 0$, $\xi_{\alpha, \min} = 0.008$ per gli edifici in acciaio. Ricordando che la casistica strutturale adottata presuppone altezze H non inferiori di 100 m, l'applicazione congiunta delle Eqq. 8,9,11 fornisce $\xi_x = \xi_y = 0.016$ per gli edifici in cemento armato, $\xi_x = \xi_y = 0.008$ per gli edifici in acciaio. Inoltre si pone $\xi_\theta = 0.01$ [8]. I modi fondamentali di vibrazione nelle tre direzioni del moto sono assunti lineari. In questo modo la meccanica strutturale è implicitamente legata all'altezza e al materiale dell'edificio.

In modo analogo i parametri aerodinamici sono associati alla forma della sezione adottando le pre-

Figura 2.
Azioni aerodinamiche sugli edifici:
(a) sezione di forma qualsiasi;
(b) sezione simmetrica rispetto all'asse x;
(c) sezione polarsimmetrica.



scrizioni dell'Eurocodice 1 [9] o i dati raccolti in [10-12]. La Tabella 1 riassume i valori selezionati, essendo c_d , c_r , c_m i coefficienti di resistenza, di portanza e di momento torcente:

$$c_d = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2B} \quad (12)$$

$$c_\ell = \frac{\bar{F}_y}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2B} \quad (13)$$

$$c_m = \frac{\bar{F}_\theta}{\frac{1}{2}\rho\bar{u}^2B^2} \quad (14)$$

ρ è la densità dell'aria; c'_ℓ e c'_m sono le derivate prime angolari di c_ℓ e c_m ; $c_{\ell s}$ e c_{ms} sono le deviazioni standard dei coefficienti di portanza e di momento torcente di scia [3,4]; S è il numero di Strouhal definito dalla relazione:

$$S = \frac{n_s B}{\bar{u}} \quad (15)$$

nella quale n_s è la frequenza media del distacco dei vortici. Rappresentazioni più affidabili dell'aerodinamica dell'edificio non possono ovviamente prescindere dallo svolgimento di prove sistematiche in galleria del vento.

La configurazione del vento è assegnata assumendo gli edifici ubicati in aree urbane ($z_0 = 0.7$ m, dove z_0 è la lunghezza di rugosità), attribuendo alla velocità di riferimento del vento - cioè la velocità media in aperta campagna ($z_0 = 0.05$ m), a 10 m di altezza, con 50 anni di periodo medio di ritorno - un valore $v_{ref} = 26$ m/s conforme alla media europea [9].

L'analisi dinamica è svolta mediante il programma di calcolo WROSS (Wind Response Of Slender Structures) che implementa i criteri illustrati in [4-7]. Esso riceve come dati in ingresso le proprietà del vento, la forma e le dimensioni dell'edificio, i parametri meccanici e aerodinamici. Fornisce come risultati in uscita i valori medi, le deviazioni standard e i valori medi del massimo degli spostamenti e delle accelerazioni longitudinali, trasversali e torsionali. I valori risultanti dello spostamento massimo e della deviazione standard dell'accelerazione sono calcolati mediante le regole di combinazione rispettivamente proposte in [13] e [14].

Le soluzioni sono poste a confronto con due stati limite convenzionali. Il primo è uno spostamento massimo in sommità pari a 1/500 dell'altezza H dell'edificio, un tipico valore di riferimento della deformabilità e un indicatore qualitativo dello stato tensionale [15]. Il secondo è un limite della deviazione standard dell'accelerazione in sommità, legato alla destinazione d'uso dell'edificio sulla base di principi ispirati alla tolle-

forma	c_d	c'_ℓ	c'_m	$c_{\ell s}$	c_{ms}	S
cerchio	0.7	0.0	0.0	0.20	0.000	0.20
quadrato	1.2	-3.0	0.5	0.50	0.025	0.10
esagono	1.0	-2.0	0.0	0.50	0.003	0.15
triangolo	1.5	-1.5	0.0	0.35	0.000	0.13

Tabella 1. Parametri aerodinamici delle sezioni selezionate.

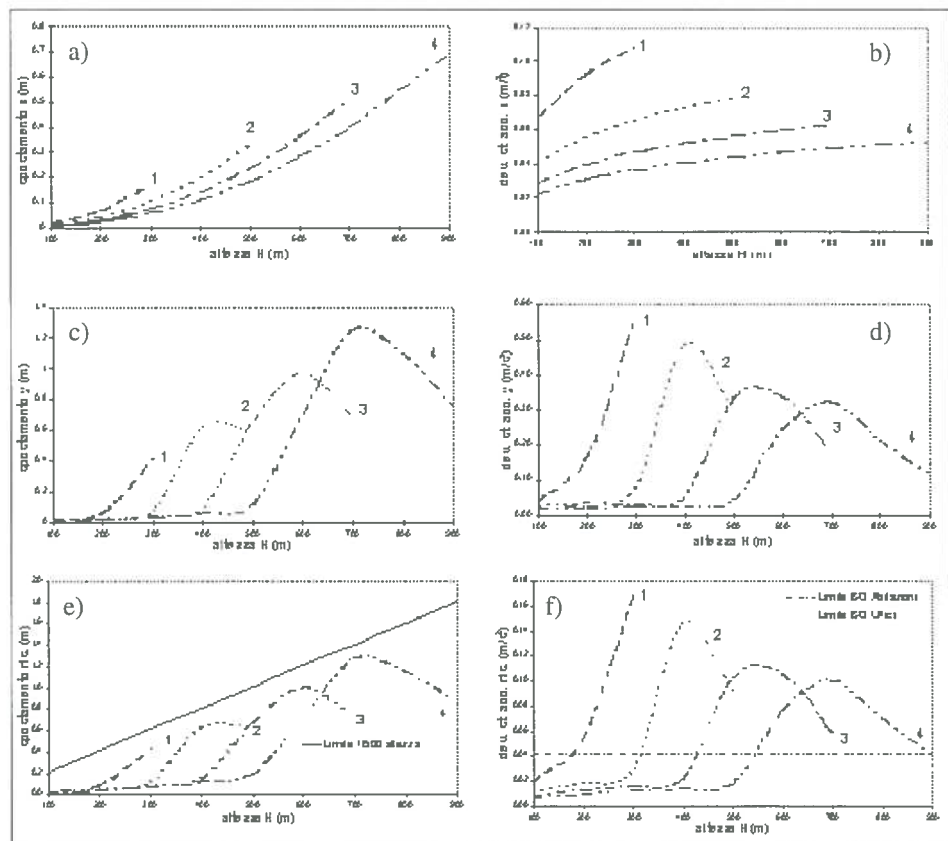
rerabilità fisiologica al moto [14, 16-18]. Applicando la norma ISO [19] tale limite vale 0.042 m/s² per gli edifici adibiti ad appartamenti e 0.070 m/s² per gli edifici adibiti ad uffici. Un'analogia prescrizione, qui non considerata, è fornita dalla norma canadese [15] che stabilisce valori massimi della deviazione standard dell'accelerazione pari a 0.028 m/s² e a 0.085 m/s² per gli edifici adibiti, rispettivamente, ad appartamenti e ad uffici.

Entrambi gli stati limite prescelti per l'analisi sono verosimilmente prudenziali. Eccedere il limite imposto allo spostamento in sommità non necessariamente è nocivo alla sicurezza dell'edificio. Inoltre, gli studi moderni di fisiologia dimostrano che l'accelerazione tollerabile aumenta quanto più bassa è la frequenza del moto [17,18] e quindi maggiore è l'altezza dell'edificio (Eqq. 8-10). Per contro le analisi non tengono conto dei fenomeni di accoppiamento delle componenti longitudinali, trasversali e torsionali delle vibrazioni che in particolari organismi strutturali esaltano il moto risultante [20]. Si ribadisce pertanto il carattere preliminare e qualitativo dello studio.

RISULTATI DELL'ANALISI

La Figura 3 mostra i risultati delle analisi svolte su

Figura 3. Edifici a sezione circolare in cemento armato; massimo spostamento longitudinale (a), trasversale (c) e risultante (e) in sommità; deviazione standard dell'accelerazione longitudinale (b), trasversale (d) e risultante (f) in sommità.



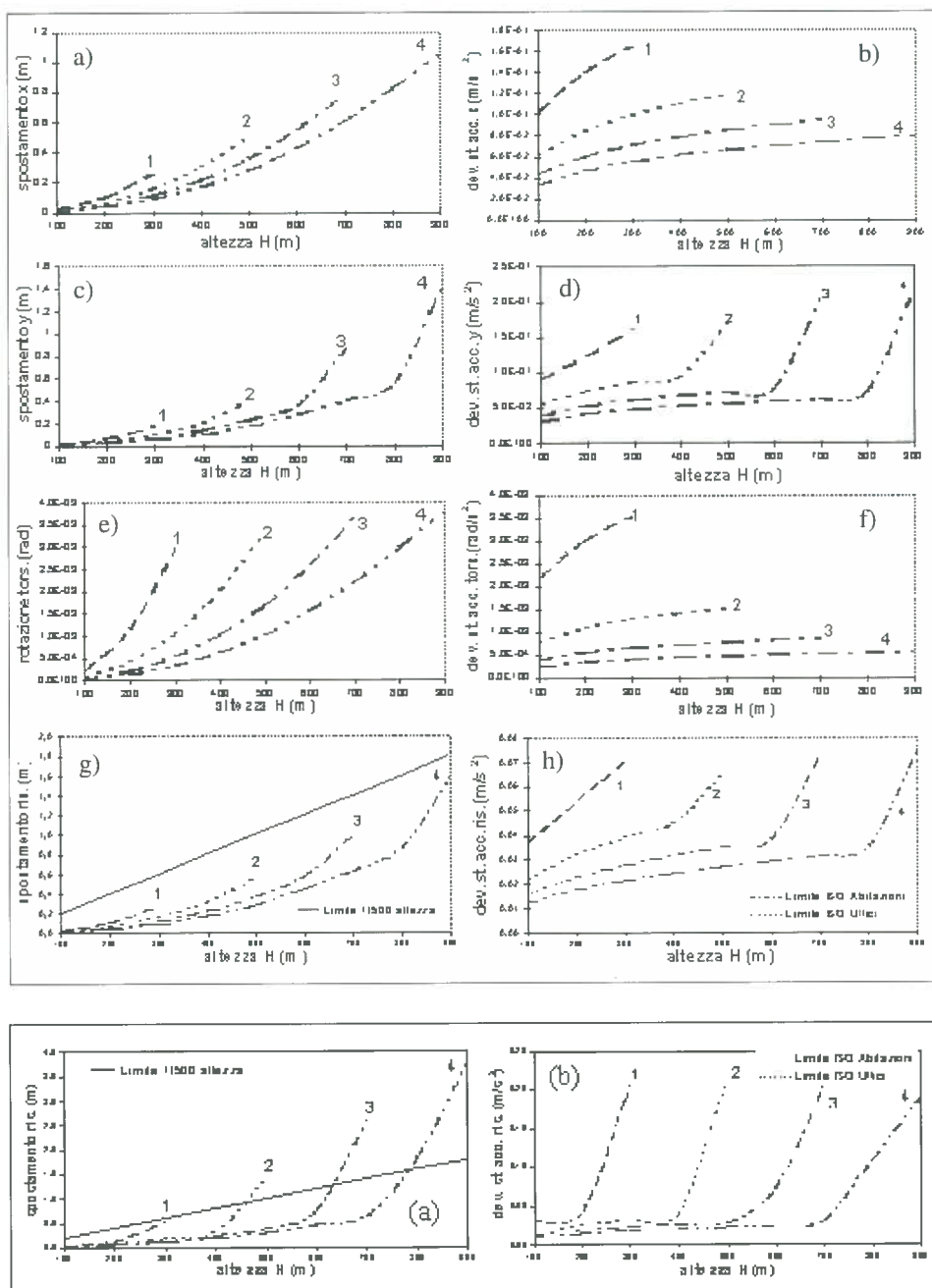


Figura 4. Edifici a sezione quadrata in cemento armato: massimo spostamento longitudinale (a), trasversale (c), torsionale (e) e risultante (g) in sommità; deviazione standard dell'accelerazione longitudinale (b), trasversale (d), torsionale (f) e risultante (h) in sommità.

Figura 5. Edifici a sezione esagonale in cemento armato: (a) massimo spostamento risultante in sommità; (b) deviazione standard dell'accelerazione risultante in sommità.

edifici in cemento armato a sezione circolare; i diversi diagrammi corrispondono a edifici la cui sezione trasversale ha area $A = 900$ (1), 2500 (2), 4900 (3), 8100 (4) m^2 . Gli spostamenti e le accelerazioni longitudinali aumentano con la superficie esposta in quanto dovuti alle azioni di raffica. Gli spostamenti e le accelerazioni trasversali hanno un massimo in corrispondenza della frequenza (Eq. 15), e quindi dell'altezza dell'edificio (Eq. 8-10), che produce il distacco risonante dei vortici; studi ulteriori documentati in [1] dimostrano che l'ampiezza del ramo decrescente delle curve è lievemente sottostimata poiché valori ridotti della velocità media del vento causano, in questo dominio, risposte trasversali maggiori; ciò è ininfluenza per gli obiettivi della ricerca. Crescendo l'altezza dell'edificio la risposta trasversale prevale sulla risposta longitudinale come evidenziato dai valori risultanti degli spostamenti e delle accelerazioni. Quale che sia la dimensione della sezione dell'edificio, l'uso congiunto della forma circolare e del cemento

armato consente, nei riguardi degli stati limite fissati, il raggiungimento di snellezze pari a circa 5.5.

La Figura 4 mostra i risultati delle analisi svolte su edifici in cemento armato a sezione quadrata. Tutte le componenti dello spostamento e dell'accelerazione crescono all'aumentare della superficie esposta. A parità di superficie esposta, la risposta longitudinale è maggiore di quella relativa agli edifici a sezione circolare, a causa dell'aumento del coefficiente di resistenza (Tabella 1). Per contro il quadrato ha un numero di Strouhal minore del cerchio (Tabella 1); pertanto il distacco risonante dei vortici (Eq. 15), e quindi il massimo della risposta, si realizzano per altezze tendenzialmente maggiori (Eq. 8-10). Per questa sua prerogativa la forma quadrata consente di raggiungere, a parità di materiale, snellezze maggiori, d'ordine 8.5, rispetto a quelle permesse dalla forma circolare. Anche in questo caso il valore limite della snellezza è debolmente influenzato (con la parziale eccezione del caso (1)) dalla dimensione della sezione dell'edificio.

Gli edifici a sezione esagonale hanno comportamenti intermedi fra quelli degli edifici a sezione circolare e quelli degli edifici a sezione quadrata (Figura 5). Gli edifici a sezione triangolare (Figura 6) subiscono una risposta longitudinale maggiore di quella trasversale, soprattutto a causa della maggiore superficie esposta a parità di sezione; ciò ne determina il rendimento peggiore.

L'impiego dell'acciaio consente di realizzare organismi resistenti più articolati e quindi mirati al corretto sfruttamento delle proprietà del materiale. Rende inoltre l'edificio meno pesante e come tale favorisce la realizzazione di strutture di fondazione meno onerose. Per contro la maggiore leggerezza, unita all'aumento della flessibilità e alla riduzione dello smorzamento, incrementa lo stato deformativo e vibratorio dell'edificio. Pertanto, a parità di geometria, ne limita la capacità di elevazione. La Figura 7 mostra i risultati delle analisi svolte sugli edifici in acciaio a sezione quadrata, evidenziando il raggiungimento degli stati limite prefissati per altezze sistematicamente minori di quelle permesse dall'uso del cemento armato (Figura 4). È interessante osservare come in questo caso la de-

stinazione d'uso dell'edificio giochi un ruolo particolarmente importante. Nell'ambito dell'edilizia residenziale è già molto difficile conseguire snellezze d'ordine 2.0; adibendo l'edificio ad uffici, è possibile raggiungere snellezza pari a circa 5.5.

La Tabella 2 riassume i risultati dello studio [1] fornendo, per ogni forma e materiale, i valori limite indicativi della snellezza conseguibile. Con la parziale eccezione delle sezioni più piccole, essi appaiono debolmente influenzati dalle dimensioni dell'edificio. È inoltre abbastanza generale la tendenza (le eccezioni riguardano la forma triangolare in cemento armato) secondo la quale la realizzazione degli edifici alti è critica nei riguardi dell'accelerazione.

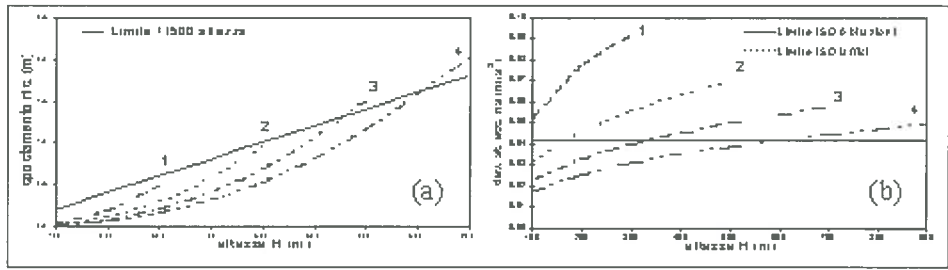


Figura 6. Edifici a sezione triangolare in cemento armato: (a) massimo spostamento risultante in sommità; (b) deviazione standard dell'accelerazione risultante in sommità.

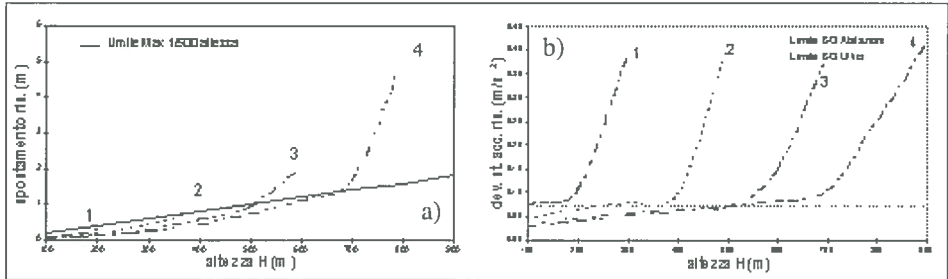


Figura 7. Edifici a sezione quadrata in acciaio: (a) massimo spostamento risultante in sommità; (b) deviazione standard dell'accelerazione risultante in sommità.

IL RUOLO DEL CONTROLLO

Il conseguimento di altezze e snellezze maggiori di quelle valutate nel precedente paragrafo non può eludere l'impiego di opportuni accorgimenti. Essi sono riconducibili a due classi fondamentali [21,22]: il controllo aerodinamico e il controllo meccanico.

Il controllo aerodinamico si ispira a tre diversi criteri. Il primo consiste nella smussatura o nella sagomatura degli spigoli dell'edificio per modificarne i parametri aerodinamici. Il secondo criterio limita l'effetto del distacco dei vortici impedendo che questi si organizzino in modo sincrono lungo tutta l'altezza dell'edificio, ad esempio creando forme rastremate o comunque variabili in elevazione. Il terzo criterio adotta aperture che consentono la circolazione del vento entro canali interni all'edificio; opportunamente progettati, essi aumentano la componente aerodinamica dello smorzamento.

Il controllo meccanico usa congegni passivi o congegni attivi per incrementare la dissipazione. Senza entrare nel merito degli apparecchi attualmente più usati [21,22], l'analisi parametrica degli edifici campione è stata ripetuta in due casi limite per indagare l'efficienza del controllo nei riguardi della forma e del materiale.

Il primo caso esaminato si riferisce al controllo passivo più diffuso negli edifici: l'uso di smorzatori a massa accordata (Tuned Mass Dampers, TMD). Adottando il criterio proposto in [22], lo smorzamento complessivo conseguibile in un edificio dotato di TMD è fornito dalla relazione:

$$\xi_{t\alpha} = \frac{\sqrt{\mu}}{4} + 0.8\xi_{\alpha}; \quad \xi_{t\alpha} \geq \xi_{\alpha} \quad (16)$$

dove μ è il rapporto fra la massa accordata e la massa totale dell'edificio, ξ_{α} è lo smorzamento dell'edificio privo di TMD. Assumendo come è prassi $\mu = 0.01$, si ottiene un valore $\xi_{t\alpha} = 0.025 + 0.8\xi_{\alpha}$ tipico delle proprietà dissipative degli edifici con controllo passivo tradizionale (TMD, dissipatori ad attrito e viscoelastici, "sloshing dampers").

materiale destinazione	cemento armato		acciaio	
	abitazioni	uffici	abitazioni	uffici
cerchio	5.3	6.0	3.6	4.0
quadrato	7.5	10.1	2.1	5.5
esagono	6.2	6.6	3.3	5.2
triangolo	2.6	6.0	1.0	1.9

Tabella 2. Valori limite indicativi della snellezza conseguibile in assenza di controllo.

Il secondo caso di studio prevede un coefficiente di smorzamento, $\xi_{t\alpha} = 0.20$, tale da eliminare quasi del tutto la componente risonante della risposta. Ciò è possibile ricorrendo a sofisticati congegni di controllo attivo, oppure a sistemi passivi innovativi, quali ad esempio le pareti a smorzamento viscoso (Viscous Damping Walls, VDW) [24], cioè pareti multi-strato con interposto un fluido ad alta viscosità.

L'analisi dei risultati dimostra che l'incremento dello smorzamento è particolarmente efficace nei riguardi degli edifici a sezione circolare, gli unici che ammettono un distacco risonante dei vortici per altezze e snellezze tecnicamente attuabili. In tutti gli altri casi la risonanza si manifesta oltre le altezze e le snellezze significative, e il vantaggio di aumentare lo smorzamento risulta, per quanto ancora effettivo, meno sostanziale. Le Figure 8 e 9 chiariscono la situazione confrontando il comportamento di due edifici, rispettivamente in cemento armato e in acciaio, con dimensione $B = 70$ m e sezioni rispettivamente circolare e quadrata; i diversi diagrammi corrispondono a edifici privi di controllo (A), con TMD (B) e con apparecchi di controllo altamente dissipativi (C).

Le Tabelle 3 e 4 riassumono i risultati principali dello studio [1] fornendo, per ogni forma e materiale, i valori limite indicativi della snellezza conseguibile utilizzando, rispettivamente, TMD e apparecchi di controllo altamente dissipativi. Si nota in particolare come l'impiego di tecnologie altamente dissipative esalti il rendimento della sezione

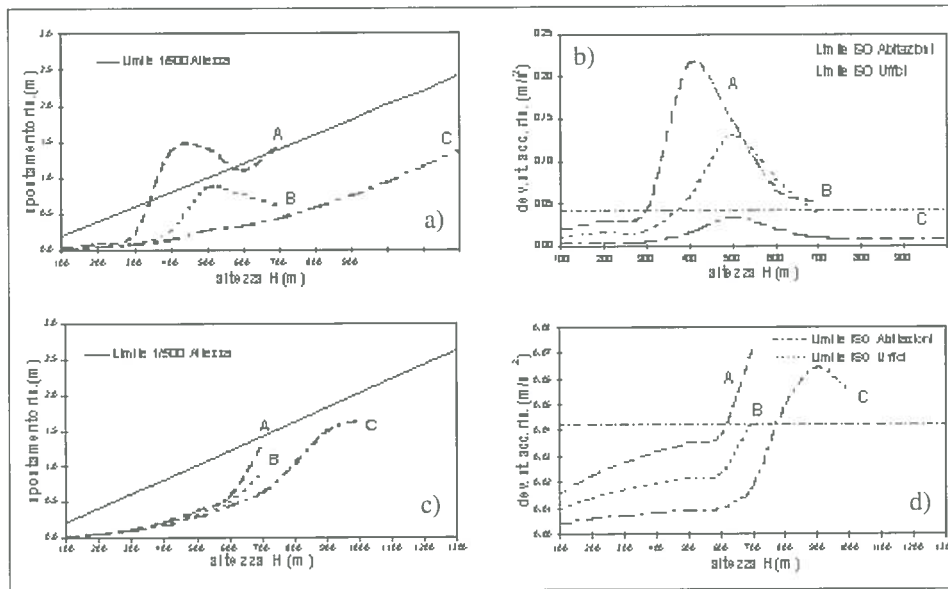


Figura 8. Edifici in cemento armato con dimensione $B = 70$ m: massimo spostamento risultante in sommità per sezione circolare (a) e quadrata (c); deviazione standard dell'accelerazione risultante in sommità per sezione circolare (b) e quadrata (d).

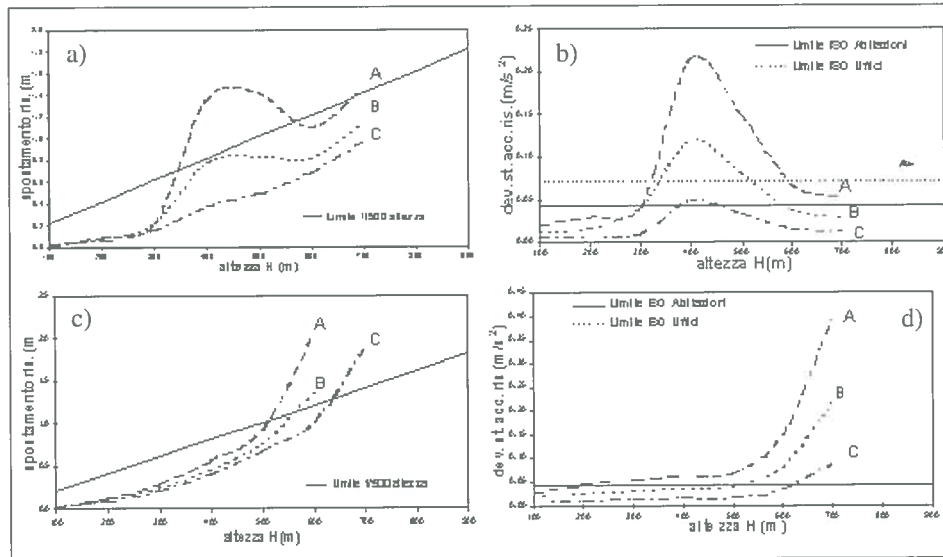


Figura 9. Edifici in acciaio con dimensione $B = 70$ m: massimo spostamento risultante in sommità per sezione circolare (a) e quadrata (c); deviazione standard dell'accelerazione risultante in sommità per sezione circolare (b) e quadrata (d).

Tabella 3. Valori limite indicativi della snellezza conseguibile con tecniche di controllo passivo tradizionale (TMD).

materiale destinazione	cemento armato		acciaio	
	abitazioni	uffici	abitazioni	uffici
cerchio	5.7	6.6	4.2	4.9
quadrato	10.0	13.6	6.4	8.1
esagono	6.6	7.2	4.9	5.7
triangolo	5.0	7.3	1.4	4.7

Tabella 4. Valori limite indicativi della snellezza conseguibile con tecniche di controllo altamente dissipative (VDWattivo).

materiale destinazione	cemento armato		acciaio	
	abitazioni	uffici	abitazioni	uffici
cerchio	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$ (5)*	$\rightarrow \infty$ (6)*
quadrato	10.5	>12.0	8.5	9.1
esagono	7.6	>9.0	6.0	6.6
triangolo	7.4	8.1	4.6	4.6

(*) Nota: Il valore fra parentesi corrisponde alle sezioni di piccole dimensioni.

circolare. Con l'eccezione delle sezioni più piccole realizzate in acciaio, essa consente il raggiungimento di altezze e snellezze in linea di principio pressoché illimitate.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

La letteratura sul comportamento delle costruzioni nel vento è ricca di valutazioni sul ruolo della geometria, dell'aerodinamica, della dinamica e del materiale trattati come parametri indipendenti. Gli edifici alti presentano proprietà peculiari che rendono molti di questi parametri reciprocamente interrelati. Uno studio realistico del loro comportamento non può quindi prescindere dai vincoli esistenti fra i vari parametri. Operando in tal senso, seppure nello spirito di valutazioni sostanzialmente qualitative e comunque preliminari, questa memoria dimostra l'esistenza di due parametri fondamentali, la forma della sezione e il materiale strutturale, dai quali in gran parte dipende la possibilità di conseguire altezze e snellezze sempre maggiori.

Senza ricorrere a forme di controllo, gli edifici di forma quadrata offrono i maggiori vantaggi. L'impiego di opportuni accorgimenti aerodinamici o meccanici rende gli edifici di forma circolare tendenzialmente più vantaggiosi. In ogni caso l'impiego del cemento armato consente di raggiungere altezze e snellezze normalmente precluse alle costruzioni in acciaio. Ovviamente ciò prescinde da qualunque considerazione inerente le strutture di fondazione e l'uso degli spazi interni. Altrettanto non tiene conto delle complesse e diverse problematiche causate dall'eventuale occorrenza di terremoti.

Lo studio dell'evoluzione degli edifici alti [25] dimostra che l'ingegnere e l'architetto hanno fatto spesso ricorso, magari inconsciamente, ai principi e alle regole che questa ricerca ha tentato di evidenziare. Addirittura si potrebbe giungere a dire che la corsa intrapresa dall'uomo per realizzare spazi vitali sempre più alti è stata dettata dal vento e dalle sue problematiche.

I grattacieli simbolo degli Stati Uniti di metà novecento, primi

fra tutti Empire State Building (ESB, New York, 1931, $H = 381$ m, $\lambda = 5.5$, Figura 10), World Trade Center (WTC, New York, 1972, $H = 417$ m, $\lambda = 6.5$, Figura 11) e Sears Tower (ST, Chicago, 1974, $H = 442$ m, $\lambda = 6.5$, Figura 12), hanno struttura d'acciaio con sezione quadrata (WTC, ST) o moderatamente rettangolare (ESB). ESB e ST presentano una forma rastremata che li protegge dal distacco dei vortici con la stessa frequenza lungo tutta l'altezza. WTC mitiga le oscillazioni mediante una tecnica di controllo passivo oramai definita "tradizionale"; usa infatti 10000 dissipatori visco-elastici distribuiti in ciascuna torre; essi realizzano uno smorzamento additivo del 2% che consente di contenere l'accelerazione entro limiti fisiologicamente tollerabili.

I grattacieli di fine e inizio millennio, in particolare Jin Mao Building (JMB, Shanghai, 1998, $H = 421$ m, $\lambda = 7.5$, Figura 13), Petronas Towers (PT, Kuala Lumpur, 1998, $H = 452$ m, $\lambda = 7$, Figura 14), World Financial Center (WFC, Shanghai, 2001, $H = 460$ m, $\lambda = 6.5$, Figura 15) e Suyong Bay Landmark Tower (SBLT, Pusan, 2002, $H = 462$ m, $\lambda = 5$, Figura 16) testimoniano il nuovo potere economico e tecnologico dell'estremo oriente. Si avvalgono di strutture miste acciaio - cemento armato con forme tendenzialmente circolari (SBLT) o sfaccettate (JMB, PT). Laddove l'edificio conserva angoli marcati (WFC), esso muta il proprio profilo con l'altezza e si avvale di accorgimenti per il controllo aerodinamico (il grande foro in sommità, Figura 15).

Uno sguardo alla progettazione degli edifici super-alti del futuro mostra due tendenze antitetiche.

La prima, perseguita ad esempio da Grollo Tower (GT, Melbourne, $H = 560$ m, $\lambda = 9$, Figura 17) e Miglin-Beitler Tower (MBT, Chicago, $H = 610$ m compresa l'antenna metallica in sommità, $\lambda = 10.5$ relativamente all'edificio, Figura 18), conferma ed estremizza tutti i principi sopra enunciati. GT e MBT impiegano entrambi forma rastremata, struttura mista acciaio - cemento armato, sofisticati apparecchi di controllo passivo. GT ha sezione quadrata con angoli arrotondati; MBT ha sezione cruciforme. E' un'impostazione che manifesta limiti comunque difficilmente superabili. Esiste certamente un'altezza e una snellezza oltre le quali l'appesantimento dell'edificio renderà inattuabili le fondazioni.

La seconda tendenza, di cui Millenium Tower (MT, Tokyo, $H = 800$ m, $\lambda = 6$, Figura 19) e 200-Story Dynamic Intelligent Super-High Building (200-SDISHB, Kajima Corporation, $H = 870$ m, $\lambda = 6$, Figura 20) sono esempi straordinari, rimuove questo limite attraverso il ritorno all'acciaio nel contesto di organismi di nuova forma e concezione. MT è un cono dove coesistono sistemi integrati di controllo attivo e passivo. 200-SDISHB è il risultato



Figura 10. Empire State Building, New York, USA.

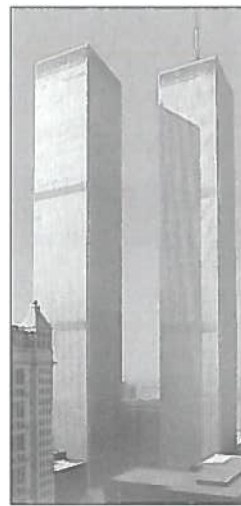


Figura 11. World Trade Center, New York, USA.

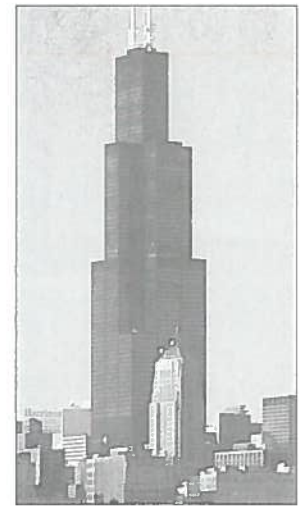


Figura 12. Sears Tower, Chicago, USA.

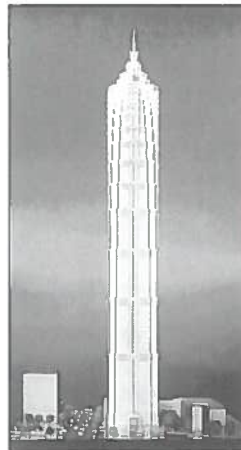


Figura 13. Jin Mao Building, Shanghai, Cina.

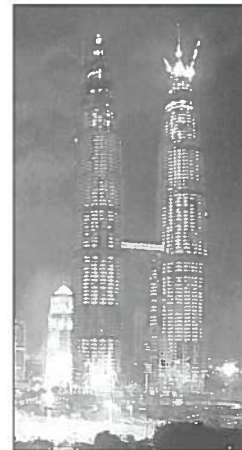


Figura 14. Petronas Tower, Kuala Lumpur, Malesia.



Figura 15. World Financial Center, Shanghai, Cina.



Figura 16. Suyong Bay Landmark Tower, Pusan, Corea.



Figura 17. Grollo Tower, Melbourne, Australia.

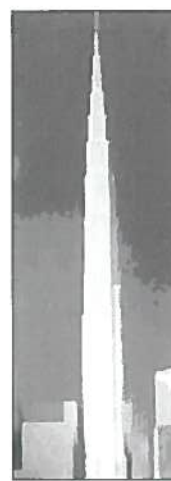


Figura 18. Miglin-Beitler Tower, Chicago, USA.



Figura 19. Millenium Tower, Tokyo, Giappone.

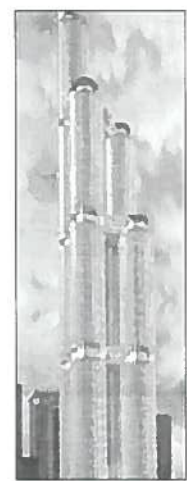


Figura 20. 200-Story Dynamic Intelligent Super-High Building, Kajima Corporation, Giappone.

dell'assemblaggio di corpi cilindrici le cui connessioni hanno rigidità controllata attivamente. Al di là delle scelte costruttive che il futuro ci riserva, soltanto un'armonizzazione perfetta della con-

cezione strutturale e architettonica, delle tecnologie meccaniche e della cultura aerodinamica potrà consentire evoluzioni ulteriori dell'altezza e della snellezza degli edifici.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] D. Daffarra, P. Micucci, (1997). Il ruolo della dinamica e dell'aerodinamica nel progetto delle strutture alte investite dal vento. Tesi di laurea, DISEG, Università di Genova.
- [2] G. Solari, G. Piccardo (2001). Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures. *Prob. Engng. Mech.*, 16, 73-86.
- [3] G. Solari (1994). Gust-excited vibrations. In *Wind-excited vibrations of structures*, H. Sockel (Ed.). Springer-Verlag, Wien, 195-291.
- [4] G. Piccardo, G. Solari (1996). A refined model for calculating 3-D equivalent static wind forces on structures. *J. Wind Engng. Ind. Aerod.*, 65, 21-30.
- [5] G. Solari (1993). Gust buffeting. I: peak wind velocity and equivalent pressure; II: dynamic alongwind response. *J. Struct. Engng.*, ASCE, 119, 365-382; 383-398.
- [6] G. Piccardo, G. Solari (1998). Closed form prediction of 3-D wind-excited response of slender structures. *J. Wind Engng. Ind. Aerod.*, 74-76, 697-708.
- [7] G. Piccardo, G. Solari (2000). 3-D wind-excited response of slender structures: Closed form solution. *J. Struct. Engng.*, ASCE, 126, 936-943.
- [8] S. Lagomarsino, L.C. Pagnini (1995). Criteria for modelling and predicting dynamic parameters of buildings. DISEG Report, University of Genova, Series II, I.
- [9] European Committee for Standardization (1994). Basis of design and actions on structures. Eurocode 1: Part 2-4: Wind actions. ENV 1991-2-4.
- [10] G. Solari (1985). Mathematical model to predict 3-D wind loading on buildings. *J. Struct. Div.*, ASCE, 111, 254-276.
- [11] Engineering Sciences Data Unit (1980). Mean fluid forces and moments on cylindrical structures: polygonal sections with rounded corners including elliptical shapes. ESDU Item 79026, London, UK.
- [12] Engineering Sciences Data Unit (1996). Response of structures to vortex shedding. Structures of circular or polygonal section. ESDU Item 96030, London, UK.
- [13] G. Solari, T.A. Reinhold, F. Livesey, (1998). Investigation of wind actions and effects on the Leaning Tower of Pisa. *Wind & Struct.*, 1, 1-23.
- [14] R.J. Hansen, J.W. Reed, E.H. Vanmarcke, (1973). Human response to wind-induced motion of buildings. *J. Struct. Div.*, ASCE, 99, 1589-1605.
- [15] National Building Code of Canada (1995). Wind loads. National Research Council of Canada.
- [16] P.W. Chen, L.E. Robertson (1972). Human response to motions in tall buildings. *J. Struct. Div.*, ASCE, 97, 1681-1695.
- [17] A.W. Irwin (1981). Perception, comfort and performance criteria for human beings exposed to whole body pure yaw vibration and vibration containing yaw and translational components. *J. Sound Vibr.*, 76, 481-497.
- [18] W.H. Melbourne, T.R. Palmer (1992). Acceleration criteria for buildings undergoing complex motions. *J. Wind Engng. Ind. Aerod.*, 41-44, 105-116.
- [19] International Standard Organization (1990). Wind loads on structures. ISO/TC 98/SC 3, Berlin, Germany.
- [20] G. Solari (1986). 3-D response of buildings to wind action. *J. Wind Engng. Ind. Aerod.*, 23, 379-393.
- [21] Y. Tamura (1998). Application of damping devices to suppress wind-induced responses of buildings. *J. Wind Engng. Ind. Aerod.*, 74-76, 49-72.
- [22] A. Kareem, T. Kijewski, Y. Tamura (1999). Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications. *Wind & Struct.*, 2, 201-251.
- [23] R.W. Luft (1979). Optimal tuned mass dampers for buildings. *J. Struct. Div.*, ASCE, 105, 2766-2772.
- [24] N. Yeung, A.D.E. Pan (1997). Viscous-damping wall and cladding as passive control for high-rise buildings. Proc., 2nd European & African Conf. on Wind Engineering, Genova, 2, 1643-1650.
- [25] Council on Tall Buildings and Urban Habitat (1998). 100 of the world's tallest buildings. Hazar, London.

Dr. Daniela Daffarra, dr. ing. Paolo Micucci,
OVE ARUP, London, United Kingdom

Prof. dr. ing. Enrico Dassori, Prof. dr. ing. Giovanni Solari,
DISEG, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Genova