
sintesi di tesi di laurea

**Università degli Studi di Firenze - Facoltà d'Ingegneria - Corso di Laurea in Ingegneria Civile -
Indirizzo Strutture**

**AZIONE DEL VENTO SUGLI EDIFICI A TORRE: INDAGINI SPERIMENTALI IN GALLERIA
DEL VENTO E PROGETTO STRUTTURALE DELLA NUOVA SEDE UNIPOL DI BOLOGNA**

Autore: Antonio ASQUINO

Relatori: Prof. Ing. Claudio BORRI, Prof. Ing. Maurizio ORLANDO, Prof. Ing. Paolo SPINELLI,
Dr. Ing. Stefano PASTÒ, Ing. Lorenzo PROCINO

La Tesi dell' Ing. Asquino ha un doppio importante valore. Da una parte mette in luce un aspetto, quello del comfort dinamico, che è il vero limite di utilizzo nel caso degli edifici alti. In questo argomento la tesi confronta criticamente varie fonti normative e dati sperimentali, arrivando alla fine ad una verifica sintetica che da conto dell'effettivo comfort strutturale.

Dall'altra utilizza in maniera diretta, ai fini del progetto, uno strumento come la galleria del vento che solo recentemente è entrato nella cultura dell'ingegnere dell'architetto progettista.

In questo senso la Tesi delinea la strada operativa con cui un progettista può utilizzare questo nuovo strumento per la progettazione. Dovrà abituarsi il "nuovo" progettista a mettere a fianco del regolo calcolatore o meglio della calcolatrice e del computer anche la galleria del vento come strumento di progettazione.

Prof. Ing. Paolo Spinelli

SOMMARIO

Oggetto dello studio è l'edificio a torre che ospiterà la nuova sede della compagnia di assicurazione Unipol a Bologna. Con i suoi 122.5 metri di altezza sarà la costruzione più alta di Bologna, superando i 97 metri della Torre degli Asinelli. Il progetto si inserisce nel più ampio contesto di riqualificazione di un'area ex industriale che fiancheggia la tangenziale di Bologna con realizzazione, oltre che dell'edificio a torre per uffici, di un albergo, un cinema multi-sala, un'area commerciale e servizi.

Lo studio si articola in tre parti. Nella prima parte sono state analizzate le problematiche tipiche della progettazione di alti edifici. Nella seconda è sta-

to affrontato il problema fondamentale della valutazione degli effetti del vento: per edifici particolari come i grattacieli è necessario procedere con indagini sperimentali nelle gallerie del vento. Per l'edificio in oggetto la campagna sperimentale è stata condotta nella galleria del vento del CRIACIV a Prato. Nella terza parte, a partire dal progetto architettonico, è stata sviluppata la progettazione strutturale dell'edificio. La struttura è stata progettata considerando oltre ai carichi verticali, la spinta orizzontale del vento (utilizzando i dati rilevati sperimentalmente in galleria) e quella del sisma (secondo le indicazioni dell'Ordinanza 3431). Infine è stato anche affrontato il problema della valutazione del comfort interno ad un edificio alto in presenza di oscillazioni indotte dal vento.

PARTE I: ANALISI DEGLI ASPETTI PROGETTUALI PRINCIPALI

Per affrontare nel modo più appropriato lo studio dell'edificio che ospiterà la nuova sede dell'Unipol a Bologna, di cui la Fig. 1 mostra l'inserimento, è stato innanzitutto necessario analizzare le problematiche tipiche della progettazione di edifici alti[1].



È un'idea molto diffusa che il problema principale di un alto edificio sia quello di assorbire carichi verticali crescenti all'aumentare dell'altezza. Al contrario il problema principale è quello di assorbire i carichi orizzontali, che crescono molto più velocemente con l'altezza e questo vale in particolare per l'azione del vento. Il comportamento degli alti edifici sottoposti a carichi laterali è comparabile ad una mensola incastrata al suolo: anche assumendo costante il carico laterale, il momento alla base crescerebbe con il quadrato dell'altezza, ma in realtà il carico stesso cresce con l'altezza e pertanto il momento alla base cresce ancora di più [2].

Per far fronte all'incremento di azione laterale al crescere dell'altezza dell'edificio, sono stati pensati sistemi costruttivi sempre più sofisticati.

L'edificio in esame con i suoi 122.5 metri e dimensioni in pianta dell'ordine dei 50 m, rientra nella tipologia di edifici a torre per i quali è sufficiente introdurre setti di calcestruzzo o controventi d'acciaio per l'assorbimento dei carichi orizzontali [1].

PARTE II: VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DEL VENTO

L'azione del vento su un edificio a torre può essere vista come somma di due contributi: da un lato "un'azione locale" che può essere schematizzata valutando i picchi di pressione sulle pareti della struttura e che determina, ad esempio, il progetto dei vetri delle facciate; dall'altro "un'azione globale" che è sintetizzabile con i valori delle azioni risultanti alla base dell'edificio. In galleria del vento sono state effettuate tre diverse campagne sperimentali: la prima per la determinazione

degli effetti locali, la seconda per definire l'azione globale e la terza per investigare il comportamento delle facciate.

Analisi dell'azione locale e determinazione dei coefficienti di pressione

Il modello utilizzato nella galleria del vento del C.R.I.A.C.I.V. a Prato è in scala 1:350 e comprende oltre all'edificio investigato, la zona circostante per un raggio di circa 100 m in scala reale (Fig. 2). Questa scelta è dettata sia dal diametro della piattaforma rotante su cui è posto il modello in galleria, pari a 2 m, sia dalle caratteristiche di similitudine del flusso, che devono essere mantenute fra modello e struttura reale. Il modello è stato realizzato in PVC per garantire un ridotto peso e al tempo stesso una rigidità sufficientemente elevata per evitare che le misure fossero disturbate dalla frequenza propria del modello stesso.



←
Fig. 1 - La nuova sede Unipol sorgerà in un lotto adiacente alla tangenziale di Bologna per gentile concessione di Open Project.

Fig. 2 - Inserimento del modello in galleria del vento.

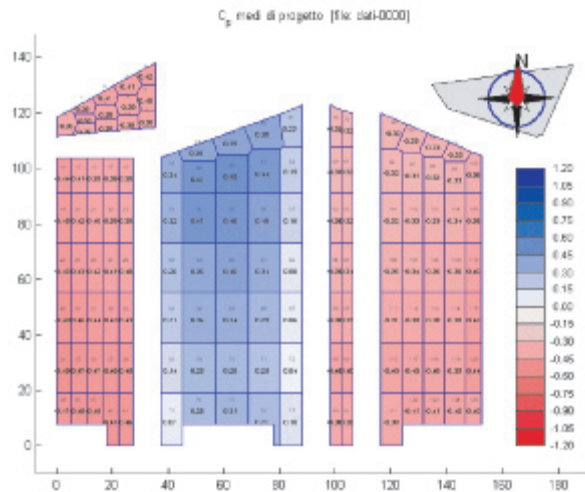
La superficie esterna del modello della torre è stata equipaggiata con 125 prese di pressione, ciascuna delle quali è stata collegata ad un trasduttore piezoelettrico per la misurazione della pressione.

Suddividendo quindi la superficie del modello in 125 aree, ognuna centrata su una presa di pressione, si ottengono una serie di mappe come quelle mostrate in figura 3, dove è mostrato lo sviluppo della superficie dell'edificio con le aree in pressione colorate di blu e quelle in depressione colorate di rosso. Nella stessa Fig. 3 in alto a destra è riportata una pianta dell'edificio con la rosa dei venti. La freccia rossa indica la direzione d'incidenza del vento. Facendo ruotare il modello all'interno della camera di prova della galleria è possibile misurare le pressioni eoliche per vari angoli di incidenza del vento. Per ciascuna presa viene acquisita una storia temporale di 30 s, alla frequenza di 250 Hz; dall'analisi statistica delle storie di pressione si ricavano poi i valori medi, massimi e minimi.

Su alcune porzioni della superficie dell'edificio è stato registrato un valore della pressione quasi quattro volte superiore a quello che si ottiene se-

guendo le indicazioni della normativa [3]. Questo fatto mostra come la corretta valutazione degli effetti del vento su edifici alti richieda necessariamente la realizzazione di prove sperimentali in galleria del vento. Peraltro nel passato le vetrate di alcuni edifici alti, progettate senza l'ausilio della galleria del vento, utilizzando valutazioni poco accurate delle pressioni eoliche, sono andate completamente in frantumi sotto l'azione del vento (celebre il caso della John Hancock Tower di Boston nel 1968).

Fig. 3 - Esempio di mappa dei coefficienti di pressione.



Analisi dell'azione globale

Per la valutazione degli effetti globali del vento alla base dell'edificio è stato collegato il modello precedentemente descritto ad un sofisticato strumento, chiamato "bilancia aerodinamica a cinque componenti", che restituisce direttamente il valore delle cinque risultanti alla base. Per ciascun angolo di incidenza del vento, è stata registrata la storia di carico, ovvero il valore delle azioni alla base in un opportuno intervallo di tempo. Con gli strumenti a disposizione, e tenendo presente la scala del modello, è stato ritenuto sufficiente la misurazione di 90000 istanti di tempo (90 s alla frequenza di 1000 Hz). Per ciascun angolo di incidenza si hanno quindi 90000 valori di ognuna delle cinque risultanti alla base.

Il problema diventa quello di estrarre da questa gran mole di dati, per ogni angolo di incidenza del vento, un numero limitato di combinazioni di carico che lo strutturista possa utilizzare per il progetto dei setti e delle fondazioni. Superficialmente si potrebbe dire che prendendo il valore massimo di tutte e cinque le componenti si è a favore di sicurezza. In realtà in certi casi questa considerazione può diventare economicamente molto svantaggiosa. Inoltre è anche estremamente improbabile che tutte e 5 le risultanti raggiungano contemporaneamente il massimo valore.

È necessario sottolineare come questo tema sia un vivace ambito di ricerca nel campo dell'in-

gegneria del vento. In questo studio è stata proposta una soluzione basata su considerazioni statistiche [4]. È infatti possibile considerare le cinque risultanti come cinque variabili aleatorie. Queste cinque variabili aleatorie risultano tra loro poco correlate ovvero il valore di ciascuna variabile dipende poco dal valore che assumono le altre variabili. Si può dimostrare che se due o più variabili aleatorie sono scorrelate, quando una attinge il suo valore massimo è lecito assumere per le altre il valore medio. Con questo tipo di considerazioni è possibile passare da 90000 a soltanto 3 combinazioni di carico per ogni angolo di incidenza del vento.

La sperimentazione in galleria del vento per la valutazione degli effetti globali è molto importante perché solitamente vengono registrati valori delle risultanti inferiori a quelli suggeriti dalle normative.

Analisi del comportamento delle facciate

Infine la terza campagna sperimentale ha riguardato lo studio del comportamento delle facciate. A quote elevate è impossibile pensare a serramenti di tipo tradizionale a causa della forte azione del vento.

La ventilazione naturale è rara negli alti edifici fin'ora realizzati, ma rappresenta una tendenza sempre più diffusa. Per assicurare il ricambio d'aria fresca dall'esterno, l'edificio in esame è stato dotato di una facciata detta "a doppia pelle". La pelle esterna è una vetrata omogenea con funzione protettiva, la pelle interna è dotata di serramenti apribili. Fra le due pelli c'è un'intercapedine vuota all'interno della quale è necessario che i flussi d'aria abbiano precise caratteristiche in termini di direzione, velocità e pressione.

La Fig.4 mostra la foto del modello in scala 1:75 che riproduce una porzione di edificio pari a cinque piani e il suo inserimento in galleria per l'esecuzione della prova. È stata misurata direzione, velocità dei flussi e pressioni all'interno delle intercapedini. Con i dati raccolti, i progettisti degli impianti possono dimensionare le macchine per la regolazione e correzione delle caratteristiche dei flussi.

Fig. 4 - Inserimento del modello in galleria del vento.



PARTE III: PROGETTO STRUTTURALE

La torre Unipol con i suoi 122.5 metri è una torre di medie dimensioni ed è quindi possibile analizzare separatamente il comportamento degli elementi resistenti ai carichi verticali e il comportamento delle strutture che devono assorbire le azioni orizzontali [1]. La presenza di ben tre robusti vani scala-ascensori suggerisce di affidare ai setti che costituiscono tali nuclei il compito di resistere alla spinta del vento e a quella del sisma.

Tra i tre nuclei sono stati inseriti pilastri tubolari e un sistema di travi miste acciaio e calcestruzzo incernierate ai pilastri. Il solaio è costituito da una soletta di calcestruzzo.

Per alti edifici l'azione del vento supera quella del sisma anche allo stato limite ultimo. La torre Unipol non è però troppo alta né snella e pertanto allo stato limite ultimo l'azione sismica è risultata superiore. L'azione del vento è stata comunque determinante per la valutazione del comportamento dell'edificio in esercizio. Infatti, solitamente i grattacieli devono essere progettati non solo per resistere alle sollecitazioni ultime, ma devono avere un buon comportamento in esercizio, cercando di limitare le oscillazioni.

Comfort design

Certi movimenti di una struttura, che in altre circostanze (per esempio su un ponte) potrebbero essere accettabili, possono indurre negli occupanti un alto edificio una vasta gamma di reazioni dal fastidio fino a giramenti di testa e nausea. I movimenti che hanno effetti fisici e psicologici possono far sì, nella migliore delle ipotesi, che i piani più alti dell'edificio perdano gran parte del loro valore. Non è quindi sufficiente pensare una struttura capace di resistere ai carichi ultimi di progetto e con rigidità sufficiente per limitare gli spostamenti che possono danneggiare gli elementi non-strutturali; la progettazione deve assicurare anche che non ci siano movimenti percepibili con fastidio dagli occupanti [5]. L'argomento è oggetto di ricerca in campo internazionale, pertanto sono stati raccolti gli ultimi studi nel campo della definizione dei livelli di comfort degli inquilini, redigendo uno stato dell'arte.

Secondo le indicazioni dei ricercatori è possibile rappresentare il livello di comfort stimando l'accelerazione dell'ultimo piano dell'edificio per un vento di progetto con tempo di ritorno di 10 anni. Un valore di 5 millesimi dell'accelerazione di gravità (5 milli-g) è considerato il limite oltre il quale il moto si comincia a percepire; 25 millesimi della gravità è invece il limite suggerito dai ricercatori per un a torre adibita ad uffici [7]. Oltre questo limite la sensazione di fastidio o di malessere è considerata inaccettabile. In caso di superamento è necessario modificare opportunamente le proprietà di massa e di rigidità della struttura [8]. È stato quindi necessario stimare il valore dell'accelerazione per il nostro edificio adottando una procedura proposta dall'Università di Notre Dame (www.nd.edu/~nathaz/) che consente di sfruttare le registrazioni svolte in galleria del vento mediante la bilancia aerodinamica [6]. Attraverso questa procedura sperimentale il valore stimato dell'accelerazione è di circa 4.2 milli-g che garantisce un adeguato livello di comfort interno e oscillazioni contenute.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] COULL A., SMITH B.S., *Tall Building Structures. Analysis and Design*. John Wiley and Sons. 1991.
- [2] EISEL J., KLOFT. E., *High rise manual*. Birkhauser.2003.
- [3] SIMIU E., SCANLAN R.H., 1996. *Wind effects on structures : An introduction to wind engineering* (3rd Edition), John Wiley & Sons: N.Y.
- [4] DYRBYE C., HANSEN S.O. *Wind loads on structures*. John Wiley and Sons. 1996.
- [5] KILPATRICK J., *The Influence of Wind-Induced Motions on the Performance of Tall Buildings*. Faculty of Graduate Studies The University of Western Ontario London, Ontario May, 1996.
- [6] KAREEM A., KIJEWski T., ZHOU Y., Member, *Aerodynamic Loads On Tall Buildings: An Interactive Database* ASCE 2000.
- [7] KAREEM A., KIJEWski T., *Dynamic Wind Effects: A Comparative Study of Provisions in Codes and Standards with Wind Tunnel Data*. 1998.
- [8] KAREEM A., KIJEWski T., TAMURA Y., *Mitigation of motions of Tall Buildings with specific examples of recent applications*. 1999.