

# COLLAUDO DINAMICO per Palazzo Lombardia

Prof. Franco Mola  
Docente del  
Dipartimento di  
Ingegneria strutturale  
del Politecnico di Milano  
e progettista delle  
strutture dell'opera.



Prof. Franco Mola  
Ing. Elena Mola  
ECSD srl Milano  
www.ecsd.it

Prof. Alfredo Cigada  
Marcello Vanali  
Dipart. di Meccanica  
Politecnico di Milano  
misure.mecc.polimi.it

Ing. Gianfranco Stella  
CAD DATACONSULT srl Milano  
www.cad-dc.com  
GT STRUDL®  
is a registered service  
mark of the Georgia Tech  
Research Corporation,  
Atlanta, Georgia USA

## L'OPERA

- Il complesso 'Altra Sede', denominato poi 'Palazzo Lombardia', è stato recentemente portato a termine nel cuore della città di Milano, per accogliere gli uffici amministrativi della Regione Lombardia
- Il nuovo complesso è costituito di 6 edifici, di cui 5 alti circa 40 m ed una Torre che, con un'altezza di 161.20 m, detiene oggi il record di edificio più alto di Milano e d'Italia.
- Il progetto architettonico di 'Palazzo Lombardia', curato da Pei Cobb Freed and Partners, si basa sul principio di morbide linee curve intersecantesi, che creano spazi pubblici interni (una piazza interna coperta di circa 4000m<sup>2</sup>) e richiamano gli elementi tipici del paesaggio lombardo, quali i fiumi, le colline e le valli.

## IL PROGETTO STRUTTURALE

- La progettazione strutturale del complesso è stata affidata al Prof. Franco Mola – Ordinario di Costruzioni in Calcestruzzo Armato e Pre-compresso presso il Politecnico di Milano -, che ha anche rivestito il ruolo di Coordinatore Generale della Progettazione Strutturale.
- Data la complessità architettonica, il vincolo di tempi di esecuzione molto ristretti, le problematiche strutturali e costruttive legate all'altezza dell'edificio Torre, la progettazione strutturale si è basata su una serie di scelte di base, dettate da un raffinato approccio concettuale che si sono tradotte nell' utilizzo sinergico di elementi strutturali caratterizzati da differente comportamento e da tecniche costruttive d'avanguardia.

## LA REALIZZAZIONE

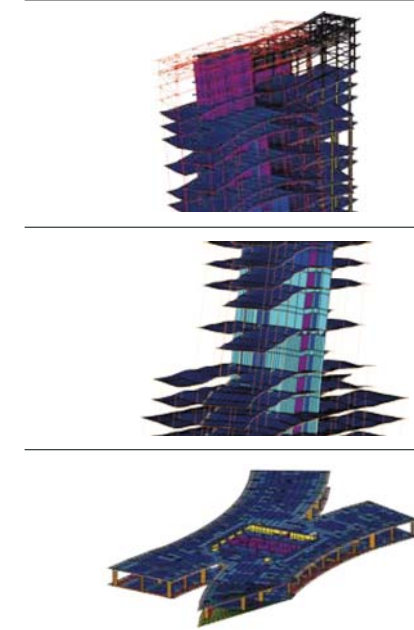
- Le scelte strutturali hanno permesso di progettare una struttura capace di alti livelli prestazionali riducendo drasticamente la durata del periodo di costruzione ridottissimi, che è risultata inferiore a due anni.

## IL COLLAUDO ED IL MONITORAGGIO NEL TEMPO

- Data la tipologia e le dimensioni dell' opera per il collaudo sono state eseguite prove dinamiche – a cura del Politecnico di Milano – i cui risultati, confrontati con quelli derivati da modelli virtuali di calcolo ne hanno consentito la verifica e la validazione.
- Questi modelli costituiscono la base attraverso la quale definire la previsione del comportamento strutturale nell' ambito del progetto di monitoraggio continuo della risposta dell' organismo resistente sotto le azioni di esercizio

## LA MODELLAZIONE VIRTUALE

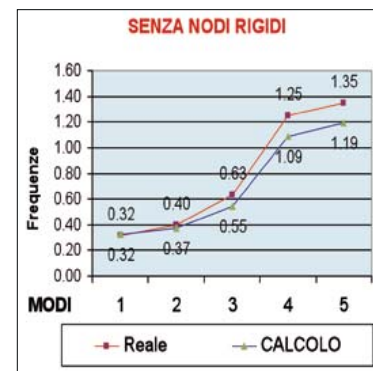
- È stato messo a punto un modello virtuale dell' edificio NUCLEO 1, con l' obiettivo di ottenere risultati numerici il più possibile accurati per il confronto puntuale con quelli sperimentali.
- Le particolari condizioni favorevoli che permettono di conferire elevata affidabilità al modello di previsione sono:
  - Le caratteristiche topologiche e strutturali dell' edificio : in particolare lo schema statico concettualmente ben calibrato, basato sulla ottimizzazione del rapporto di rigidità fra Nucleo e Telaio, sia per quanto concerne la deformabilità trasversale sia relativamente a quella verticale
  - Il conseguente comportamento dinamico che è ben individuato dai primi due modi che risultano disaccoppiati
  - Una procedura di collaudo dinamico accurata ed esaustiva sia nei riguardi della precisione delle frequenze della azione forzante, sia per ciò che concerne le apparecchiature di misura
  - La qualità controllata dei materiali e dell' esecuzione dell' opera, che conferisce attendibilità ai valori dei parametri meccanici dei materiali assunti nel modello e alla stima della rigidità condotta in forma teorica dal software
- In relazione a quanto sopra si è sviluppato un modello ad elementi finiti utilizzando i valori di progetto delle caratteristiche dei materiali e



del terreno di fondazione, simulando accuratamente le caratteristiche statico geometriche della struttura. In particolare i solai realizzati con zone alleggerite mediante inserti sferici in polietilene, sono stati descritti con elementi finiti a lastra-piastra dimensionati in spessore equivalente ai fini del calcolo della rigidità flessionale. Nelle rappresentazioni del modello quelle zone sono evidenziate dal diverso colore. Un altro tema importante ai fini della risposta del modello è quello della simulazione dell' effettiva rigidità delle unioni pilastri-solai, che condizionano in modo significativo la distribuzione relativa di deformabilità strutturale, influenzando in particolare i risultati dell' analisi modale.

- Queste esigenze hanno comportato la compilazione di un modello di rilevanti dimensioni, i

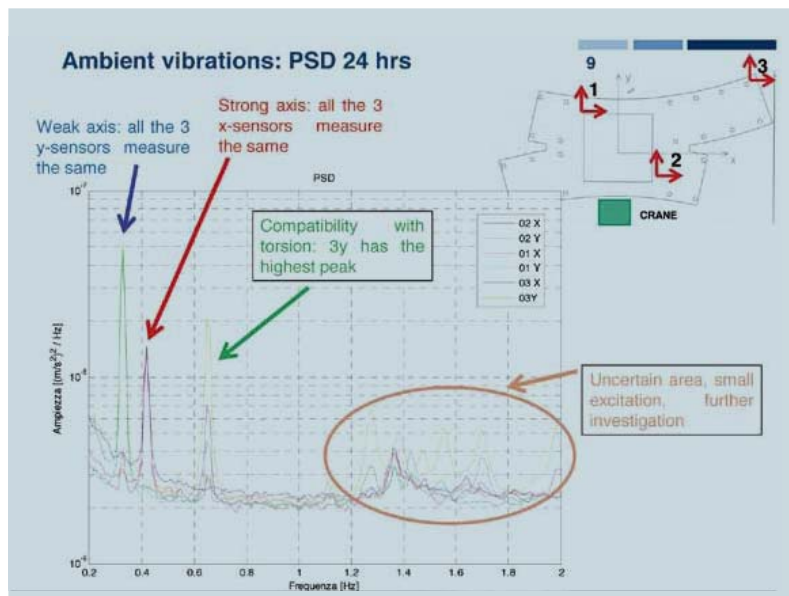
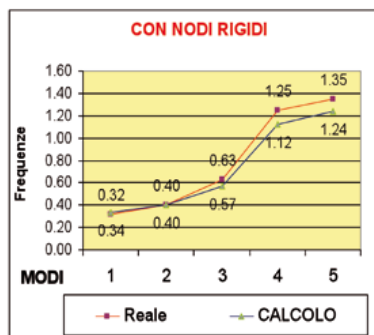
- cui aspetti più significativi possono così riassumersi:
  - 52757 nodi a 6 gradi di libertà per un totale di 316542 g.d.l.
  - 53910 elementi finiti lastra-piastra + 9088 elementi lineari (travi e pilastri)
  - 77171 carichi divisi in 27 condizioni di carico elementari e 5 combinazioni: la suddivisione dei carichi in molteplici condizioni separate è stata operata per poter simulare efficacemente diverse distribuzioni delle masse presenti.
  - Le analisi dinamiche modali sono state effettuate nell' ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali, in accordo alle prescrizioni che hanno governato i tests del collaudo sperimentale durante il quale lo stato di sollecitazione si mantiene all'interno del campo elastico.
  - L' analisi delle frequenze e dei modi di vibrazione della struttura dipendono dalla distribuzione delle rigidità (inerzie e moduli elastici) e delle masse presenti – quelle strutturali altamente certe e quelle stimate dovute ai carichi presenti al momento dei tests.
  - Sono state effettuate, una serie di elaborazioni variando i valori delle grandezze significative in gioco, nell' intorno dei valori di progetto, per valutarne l' influenza sui risultati. Come evidenziato in precedenza questa analisi di "sensività" è significativa in quanto si dispone in questo caso del risultato attuale, rappresentato dai valori sperimentali del collaudo dinamico effettuato.
  - Per la necessità di elaborare i conseguenti numerosi modelli si è scelto di utilizzare il programma GT STRUDL® – uno dei capostipiti dei codici di calcolo strutturale – che, oltre all' affidabilità dei risultati, offre ottime prestazioni sui normali PC : il tempo totale di risposta sul modello è di cinque minuti utilizzando il solutore ottimizzato, di dodici minuti con la versione standard.
  - A conferma della corrispondenza della struttura reale alle ipotesi di progetto, si è verificato che i risultati di calcolo più vicini a quelli sperimentali sono ottenuti assegnando i valori di design: si riportano per concisione nel seguito solo i valori di confronto delle due alternative di calcolo cosiddette a "NODI non RIGIDI" e a "NODI RIGIDI" che come atteso meglio simula il comportamento reale della struttura. In ogni caso lo scostamento reale/virtuale è compreso in limiti considerati molto buoni per questo tipo di problemi. ■



SENZA NODI pilastri-soletta					NODI RIGIDI pilastri-soletta						
CON massa fondazione		Peso = 109533 tonnellate			CON massa fondazione		Peso = 109533 tonnellate				
	Frequenza cicli/sec	Rapporto reale/calc	Rapporto calc/reale	Scost. %		Frequenza cicli/sec	Rapporto reale/calc	Rapporto calc/reale	Scost. %		
MODI	Reale	Calcolo			MODI	Reale	Calcolo				
1	0.32	0.32	0.97	1.01	-0.93	1	0.32	0.34	0.95	1.05	-5.1
2	0.40	0.37	1.04	0.92	7.60	2	0.40	0.40	0.99	1.01	-1.0
3	0.63	0.55	1.13	0.87	13.22	3	0.63	0.57	1.11	0.90	10.0
4	1.25	1.09	1.13	0.87	12.83	4	1.25	1.12	1.11	0.90	10.2
5	1.35	1.19	1.11	0.89	11.42	5	1.35	1.24	1.08	0.92	7.5

### TEST DINAMICI

- Progettazione e realizzazione di una campagna di misura ad hoc per la valutazione dei principali parametri modali della struttura NU-CLEO 1.
- Un primo set di misure è stato eseguito sfruttando l'eccitazione ambientale. Una struttura snella ed alta come quella in questione vibra naturalmente sotto l'effetto di vento traffico ed eccitazione data dagli occupanti il cantiere.
- I livelli di vibrazione sono in questo caso molto bassi, ma utilizzando trasduttori ad alta sensibilità e basso rumore di fondo è possibile ottenere una stima della risposta dinamica della struttura applicando tecniche di Operational Modal Analysis (analisi modale effettuata senza la misura della forzante).
- Sono stati impiegati trasduttori al quarzo per impieghi di tipo sismico accoppiati ad un si-



stema di acquisizione a 24 bit con controllo remoto via UMTS. La misura è stata effettuata in maniera continuativa per una settimana al fine di ottenere delle stime robuste delle funzioni di densità di potenza spettrale, che servono da ingresso agli algoritmi di stima dei parametri modali.

- La figura riporta un esempio delle densità di potenza spettrale misurate in 3 punti al piano 38 in due direzioni perpendicolari. È possibile osservare 3 picchi principali che stanno ad indicare 3 modi di vibrare e una serie di picchi minori intorno ai 1.2-1.4 Hz
- Questa prima serie di test ha permesso di ottimizzare il set-up di misura per la risposta dell'edificio a vibrazioni forzate.
- È stato deciso di fornire una forzante di tipo stepped sine (Diversi test a frequenza costante per coprire tutto il campo di frequenze di interesse). Vi è la necessità di trasmettere grandi forze a basse frequenze, utilizzando un attuatore di tipo inerziale.

- Assumendo una legge di moto sinusoidale si ha che:

$$F = ma = mx\omega^2$$

Dove:

F = forza trasmessa

a = accelerazione della massa

x = spostamento della massa

$\omega^2$  = pulsazione

- $\omega^2$  È molto piccola, è necessario avere masse importanti (senza superare i carichi ammessi dalla soletta) oppure realizzare corse molto lunghe.

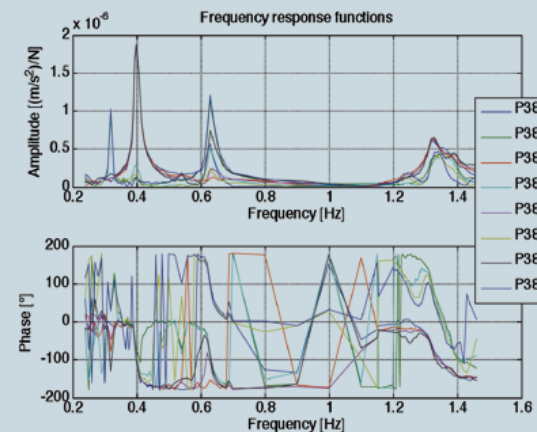
- È stato utilizzato un motore lineare con corsa massima pari a 2 m, che porta una massa variabile fino ad un massimo di 1000 kg, ancorato alla soletta del piano 38. Il forzamento è stato dato in due differenti giornate su due direzioni perpendicolari.

- Misurando l'accelerazione della massa mobile si ha una misura della forza trasmessa al suolo. La risposta dell'edificio è stata misurata su 4 livelli differenti (piani 21, 32, 38, e sul velario esterno).

- Facendo il rapporto tra la misura della forza fornita e l'accelerazione misurata sull'edificio è possibile costruire i diagrammi di risposta in frequenza della struttura. Tali digrammi, rappresentati in termini di modulo e di fase sono il punto di



I telai della struttura sono composti da:  
 - Pilastrini PCM brevettati da CSP per la torre;  
 - Travi PREM della CSP e Pilastrini PCM per i corpi bassi.



	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
<b>Freq [Hz]</b>	0.32	0.4	0.63	1.25	1.35
<b>Damping [%rc]</b>	1.19	1.47	1.43	1.46	1.28

partenza per l'identificazione dei modi di vibrare.

- La presenza di un picco nel modulo della funzione di risposta in frequenza e uno sfasamento di 90° in corrispondenza del picco indicano la presenza di un modo di vibrare. Oltre ad una prima analisi visiva delle funzioni, i dati sono stati processati con un algoritmo di identificazione che opera nel dominio delle frequenze (Polyreference least square frequency domain). I modi identificati in termini di frequenza e smorzamento adimensionale associato sono riassunti in tabella.
- Insieme ai dati di frequenza e smorzamento sono stati identificati i valori degli autovettori corrispondenti ad ogni modo che individuano la deformata corrispondente ad ognuna delle frequenze proprie.
- Il set di dati identificato fotografa il comportamento dinamico della struttura reale, serve come base sia per la validazione del modello numerico sia come confronto a cui riferire i risultati di un successivo monitoraggio. ■

### Il network progettuale e realizzativo

- 1. Committente:**  
Regione Lombardia
- 2. Progetto architettonico:**  
Pai Cobb Freed & Partners Architects con Caputo Partnership e Sistema Duemila a. Responsabile Progetto Architettonico: Arch. Henry N. Cobb
- 3. Progetto strutturale:**  
Prof. Ing. Franco Mola ECSD Srl Engineering Consulting & Structural Design
- 4. Direzione lavori:**  
Infrastrutture Lombarde Spa
- 5. Impresa Appaltatrice:**  
Consorzio Torre Spa
- 6. Impresa Leader del Consorzio:**  
Impregilo Spa a. Presidente e Direttore Generale: Ing. Gaetano Salonia
- 7. Direttore Tecnico:**  
Ing. Vinicio Scerri
- 8. Direttore di Cantiere e Dirigente Sicurezza:**  
Ing. Guglielmo Fariello