

**LA TORRE HADID NEL QUARTIERE CITYLIFE A MILANO:
UNA GRANDE OPERA CIVILE CHE È OGGETTO DI UN
ARTICOLATO MONITORAGGIO PROGRAMMATO**

**THE HADID TOWER IN CITYLIFE DISTRICT IN MILAN: A
GREAT STRUCTURAL WORK THAT HAS DEVELOPED A
MANIFOLD MONITORING PLAN**

Bruno Finzi
Luca Rossini
CeAS - Centro di Analisi Strutturale Srl
Milano, Italia
bruno.finzi@ceas.it
luca.rossini@ceas.it

ABSTRACT

The Hadid Tower located in the old Exposition area in Milan, is the core of a new place with many services and public facilities in an area characterized by an important process of urban requalification: the “CityLife Project”. In such a context, the skyscraper called “Storto” has 44 above ground levels raising 170 meters from the urban level and 186 meters from the foundation level, with a twisting shape that marks out the tower aesthetically and structurally. It’s for this kind of buildings, with a great importance and complexity, that is important to develop a monitoring plan of significant elements that characterize the structural behavior, both during the construction and in the building lifecycle. This is a practice described also by DM 14/01/2008 at Chap. 9 for testing of structural elements. In this article, the monitoring system that allows to check the project, to evaluate if all the decisions made during the construction phases were correct, to have important information about the global behavior of the construction and to monitor the preservation of the structures, will be described. This is also peculiar to allow for a correct facility management of the building with the aim to guarantee the best performance according to the Project, throughout all the life of the tower.

SOMMARIO

La struttura a torre denominata Torre Hadid, è situata all'interno della zona ex fiera campionaria di Milano, al centro di una nuova concentrazione di servizi e attrezzature pubbliche in uno spazio interessato da un importante processo di riqualificazione urbana: il cosiddetto "Progetto CityLife". In questo contesto si eleva per 170 m sopra il livello della piazza alla base e 186 m sul livello delle fondazioni, per un totale di 44 piani fuori terra e 3 piani interrati, lo "Storto", un grattacielo dalla forma torcente che lo contraddistingue fortemente sia dal punto di vista estetico che strutturale. È per questo tipo di opere, dalla significativa importanza e complessità, che viene largamente riconosciuta la convenienza di condurre un monitoraggio programmato di grandezze significative che caratterizzano il comportamento strutturale, sia durante le fasi di costruzione sia a costruzione ultimata. Le stesse Norme Tecniche 2008, al Cap. 9 dedicato al Collaudo statico, delineano tale eventualità. Nel seguito verranno quindi descritti i controlli che permettono di validare le assunzioni progettuali, di valutare l'efficacia delle azioni intraprese nel corso della realizzazione, di desumere utili informazioni sul comportamento globale della costruzione e di monitorare lo stato di conservazione dell'opera, assicurando maggiore efficacia alle programmate operazioni di manutenzione, a garanzia del mantenimento nel tempo delle prestazioni di base definite a Progetto.

1 INTRODUZIONE

La Torre Hadid è situata all'interno della zona ex fiera campionaria di Milano, nell'ambito del "Progetto CityLife". Grazie ad esso il nuovo landmark per Milano sarà caratterizzato da tre torri a destinazione direzionale, progettate da Zaha Hadid, Arata Isozaki e Daniel Libeskind. L'opera è stata concepita come punto focale dei principali assi viari limitrofi, quali Viale Scarampo, Via Domenichino, Via Michelangelo Buonarroti, Via G. Rossetti e Via Angelo Poliziano.

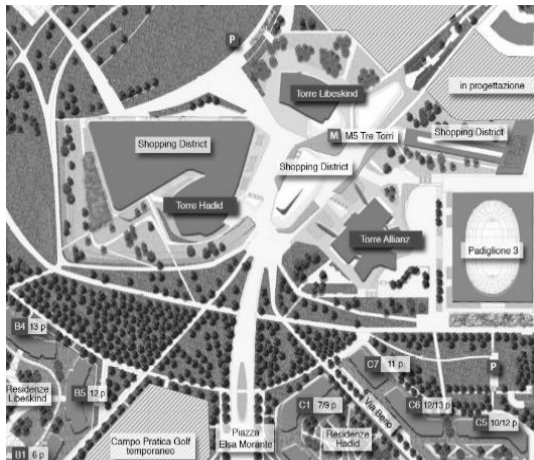


Fig. 1. Pianta generale del "Progetto CityLife"



Fig. 2. Torre Hadid e galleria commerciale

L'edificio accoglie tre categorie di spazi diversi: la torre uffici, il parcheggio interrato e la galleria commerciale. Le diverse funzioni sono profondamente integrate e connesse tra loro. Dal punto di vista estetico due profondi tagli nella doppia pelle, diametralmente opposti rispetto al nucleo centrale, individuano gli ingressi della Torre Hadid sottolineandone la rotazione. L'impianto struttu-

rale è tradizionale a nucleo centrale con scale, ascensori, impianti e servizi e corona di pilastri che, posti sul bordo esterno dei solai, seguono l'andamento geometrico della torre. I piani fuori terra, ad eccezione del foyer a doppia altezza del piano terra (quota +129,00 m s.l.m.) e i due livelli di locali tecnici in copertura, sono destinati ad uffici e presentano un'area SLP media pari a circa 1.000 m². I piani interrati costituenti la cosiddetta piastra intorno alla torre, sono destinati prevalentemente a parcheggi.

Il *general contractor* dell'opera è CMB – Cooperativa muratori e braccianti di Carpi SCARL. Il Progetto esecutivo architettonico è stato sviluppato da Planimetro S.t.p., mentre la direzione artistica è svolta dallo studio Zaha Hadid Architects. Il progetto esecutivo strutturale è stato sviluppato in parte dallo studio Redesco Progetti S.r.l. e in parte da Holzner & Bertagnolli Engineering S.r.l.. La Società M.B.M. S.p.a. si è occupata del progetto costruttivo e della realizzazione delle strutture in carpenteria metallica dei piani di sommità della torre e della galleria commerciale. L'impresa Fronduti Lucio si è occupata del progetto costruttivo e della realizzazione delle travi di accoppiamento in acciaio. Le facciate della torre sono ad opera di Shenyang Yuanda Aluminium Industry Engineering Co., Ltd.. La direzione dei lavori è svolta dallo studio In.Pro S.r.l. mentre l'ing. Bruno Finzi è il collaudatore statico delle strutture.

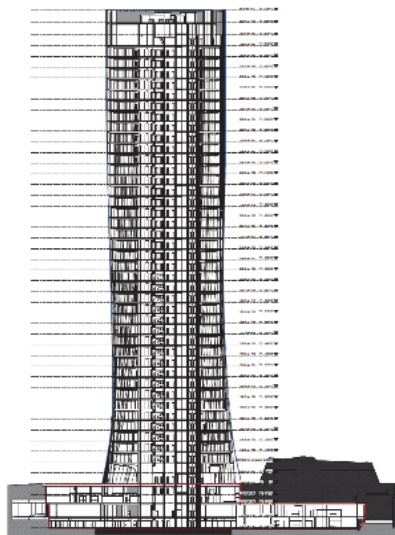


Fig. 3. Sezione della Torre Hadid



Fig. 4. "Effetto torsione" della torre in costruzione

2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA

Il funzionamento globale della struttura è a mensola, ovvero con trasferimento dei carichi orizzontali e dei momenti direttamente in fondazione senza alcun vincolo orizzontale alle strutture della galleria commerciale. Questa si trova in corrispondenza dei primi cinque piani della Torre Hadid, ma è separata da essa mediante giunti strutturali. La struttura presenta una impostazione classica, con sistema resistente verticale costituito dal nucleo e dalle colonne. Per quanto riguarda le azioni orizzontali invece, il sistema resistente è costituito dal nucleo, con una parziale collaborazione delle colonne stesse collegate da un numero elevato di solai in soletta piena in c.a. a com-

portamento bidirezionale. Gli spessori del nucleo ed i diametri delle colonne decrescono, con variazioni discrete, con l'altezza della torre, secondo uno schema a scalini con gruppi di piani omogenei. Nei piani superiori, con l'eliminazione progressiva di alcuni vani ascensore, il nucleo subisce via via riduzioni generalizzate della sezione. La struttura è principalmente in calcestruzzo armato, con alcuni elementi in struttura composita o metallica, in corrispondenza di architravi sul perimetro esterno del nucleo e di travi di accoppiamento del nucleo stesso, nella porzione inferiore della torre.

Queste travi (si vedano le Figure 5 e 6), realizzate in acciaio S355 e post tese con barre tipo Dywidag, sono dette *coupling beam* e ricoprono un ruolo fondamentale per permettere ai due semi-nuclei un comportamento accoppiato. Così facendo è stata garantita la necessaria duttilità della struttura ed un sistema resistente a mensola.

Il vincolo di collegamento tra solette e nucleo è di tipo a cerniera, ovvero dimensionato per la trasmissione di tutte le azioni membranali e di taglio, senza trasmissione di momenti flettenti. Le strutture orizzontali dei livelli interrati sono costituite da piastre piene in c.a. a comportamento bidirezionale supportate dal nucleo posto al centro degli impalcati e da pilastri. I solai dei livelli interrati, a differenza di quelli in elevazione fuori terra, sono incastrati nel nucleo. Il solaio di quota +129 m riveste un ruolo fondamentale per il funzionamento strutturale della torre in quanto mantiene in equilibrio la torsione totale del nucleo generata dalle componenti orizzontali delle azioni assiali nei pilastri inclinati. Infatti, al di sotto della quota +129 m i pilastri hanno giacitura verticale e si annulla la torsione nel nucleo. Per tale ragione questo impalcato è impegnato in modo importante dalle azioni membranali rispetto ai solai dei piani sottostanti. Infine, le fondazioni sono del tipo misto a platea su pali riduttori di spostamento. Si tratta di una platea continua in calcestruzzo, senza giunti strutturali, di dimensione in pianta 56,60 m per 54,15 m e spessore tipico costante pari a 2,50 m e quota estradosso rustico pari a +113,10 m. Al di sotto della platea si sviluppano pali trivellati in c.a. con funzione di riduzione di spostamento, disposti nelle posizioni più idonee ad una corretta distribuzione delle azioni nella platea ed alla omogeneizzazione dei cedimenti.

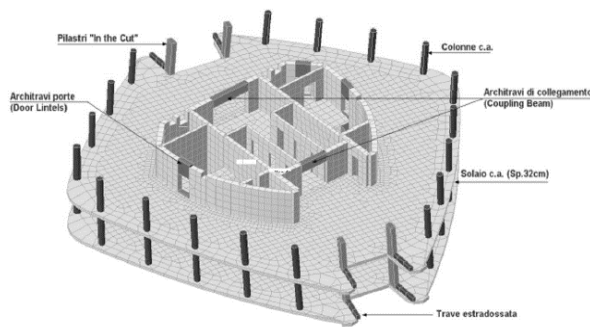


Fig. 5. Principali elementi strutturali



Fig. 6. *Coupling beam*, estremità da annegare nel setto

Le caratteristiche geometriche fondamentali della torre sono di seguito elencate:

- nucleo scale / ascensori / cavedi della torre di dimensione massima in pianta pari a circa 23 x 19 m, con spessori muri variabili da un massimo di 90 cm a un minimo di 30 cm, da quota +113,10 m a quota +298,85 m;

- 3 impalcati attribuiti alla parte interrata della torre di dimensione massima in pianta pari a circa 50 x 52 m;
- 40 impalcati della torre, di forma variabile romboidale, di dimensione massima in pianta pari a circa 50 m;
- 2 impalcati metallici a livello 42 e 43;
- 24 pilastri di bordo all'interrato di dimensione variabile da un massimo di 150 x 100 cm a un minimo di 50 x 70 cm, da quota +113,10 m a quota impalcato +128,50 m;
- 18 pilastri circolari della torre di dimensione variabile da un diametro massimo di 110 cm a un diametro minimo di 50 cm, verticali da quota +113,10 m a quota impalcato +128,50 m, **inclinati di un angolo massimo rispetto alla verticale di circa 13,5°** da quota impalcato +128,50 m in su;
- 4 pilastri rettangolari della torre di dimensione variabile da un massimo di 120 x 80 cm a un minimo di 75 x 50 cm, verticali e prolungati con setti in c.a. di spessore 50 cm da quota +113,10 m a quota impalcato +128,50 m, **inclinati di un angolo massimo rispetto alla verticale di circa 13,5°** da quota impalcato +128,50 m in su;
- 26 pilastri metallici della torre in profili tubolari diametro 406,2 mm, verticali da quota +286,35 m a quota +298,42.

L'opera è soggetta ad un controllo geometrico e topografico delle strutture, oltre ad una valutazione dello stato di sforzo reale di alcuni elementi significativi. Queste attività si svolgono basandosi sui dati del monitoraggio che è stato messo in atto fin dalle prime fasi di costruzione **con frequenza di elaborazione mensile**. Nei capitoli successivi si riporta una descrizione del monitoraggio tuttora in atto.

3 MONITORAGGIO STRUMENTALE

Il monitoraggio strumentale è mirato alla valutazione dello stato tensionale di alcuni elementi strutturali, particolarmente importanti per la costruzione. L'impianto di monitoraggio acquisisce una parte di dati in modo automatico da trasduttori elettrici (spostamento, sforzo, pressione) e una parte di dati in modo manuale (misure inclinometriche nei pali di fondazione).

3.1 Pali di fondazione riduttori di cedimento

Durante l'attività di esecuzione delle fondazioni indirette, è stata installata la strumentazione per il monitoraggio dei seguenti parametri:

- variazioni di sforzo lungo il fusto del palo: per singolo palo, n.7 sezioni costituite da tre strain gauges a corda vibrante disposte a 120° altresì dette terne estensimetriche solidarizzate alla gabbia di armatura;
- variazioni della lunghezza di singole sezioni di palo: per singolo palo, estensimetri multibase a 5 basi di misura;
- variazioni del carico a fondo palo: per singolo palo, n.1 cella di pressione a fondo palo (a circa 1 m da fondo palo);
- variazioni del carico in testa palo: per singolo palo, n.1 cella di pressione in testa palo;
- variazioni di inclinazione del fusto del palo: tubazione inclinometrica a 4 guide.

In totale sono stati strumentati n.8 pali di fondazione.

In Figura 7 si riportano a titolo di esempio gli accorciamenti rilevati nel palo P20 posto sotto il nucleo e nel palo P29 posto nell'angolo della platea, per i quali si sottolinea la coerenza con le

valutazioni teoriche in funzione della loro posizione in pianta. In Figura 8 le registrazioni effettuate lungo il fusto del palo P20 confermano una riduzione degli spostamenti, a partire dalla data di ultimazione delle strutture.

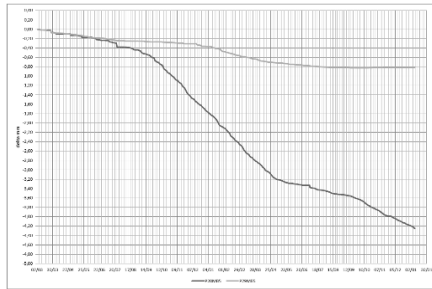


Fig. 7. Accorciamenti palo P20 e P29 in funzione del tempo

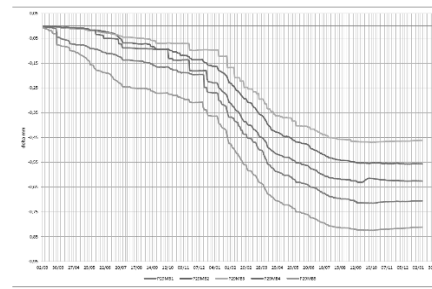


Fig. 8. Accorciamenti singoli spezzoni palo P20 in funzione del tempo

3.2 Colonne

Per la valutazione delle azioni assiali lungo alcuni pilastri della torre, sono state installate terne estensimetriche (n.3 strain gauges a corda vibrante disposti a 120°) ad un'altezza pari a metà interpiano. Il monitoraggio è condotto su 2 pilastri rettangolari e su 3 pilastri circolari; complessivamente i rilievi vengono effettuati su 11 livelli a partire dai piani interrati fino al quarantesimo con frequenza pari a 5 livelli. I valori rilevati permettono di analizzare l'incremento dello stato deformativo e quindi tensionale nelle strutture di elevazione, confermando una proporzionalità diretta rispetto all'incremento dei carichi durante la costruzione.

4 MONITORAGGIO TOPOGRAFICO

Questa attività consiste nella verifica delle quote altimetriche e planimetriche degli orizzontamenti, delle colonne e della verticalità del nucleo per mezzo di stazione topografica totale e livello digitale.

4.1 Fondazioni

La deformazione delle strutture di fondazione viene monitorata periodicamente in n.13 punti significativi all'estradosso della platea. La lettura "zero" è stata effettuata immediatamente prima della partenza del getto della fondazione. Dai dati rilevati si osserva che la platea si è abbassata proporzionalmente alle fasi di costruzione, con una deformata che si è mantenuta sempre simmetrica rispetto al centro della torre. In alcuni casi, le letture hanno mostrato che, a seguito della prevalente distribuzione dei carichi nella parte centrale, i punti perimetrali tendono a sollevarsi leggermente mentre la parte sottostante il nucleo scende. Nel punto di maggior deformazione al centro della platea, l'abbassamento netto tra la zona perimetrale e quella al di sotto del nucleo è di circa 20 mm.

4.2 Interfaccia tra torre e piastra

Al fine di tenere sotto controllo lo spostamento differenziale della torre rispetto ai piani interrati della piastra circostante, si monitorano gli abbassamenti della campata di compensazione di bordo

solaio della torre. Tale analisi è indispensabile per evitare che gli spostamenti differenziali eccedano il limite progettuale fissato a 20 mm. Vengono monitorate n.35 borchie al livello a quota +177 m e n.24 al livello di quota +122 m (di cui 12 poste in corrispondenza delle strutture di MM) che rilevano spostamenti verticali entro tali limiti.

4.3 Solai

Viene rilevato lo spostamento verticale dei solai della torre, in n.12 punti in modo da valutare le frecce lungo le quattro luci maggiori ai livelli 2-5-7-10-15-20-25-30-35-40.

In corrispondenza di questi livelli, vengono monitorati anche gli spostamenti nel piano orizzontale di n.6 punti disposti lungo il perimetro esterno del solaio. Tali indicazioni permettono di valutare gli effetti della torsione lungo l'asse verticale della torre. Si riporta in proposito nella figura sottostante, il confronto tra lo spostamento in forma vettoriale rilevato e quello atteso dall'analisi progettuale FEM, sia a fine struttura senza carichi permanenti che a fine cantiere:

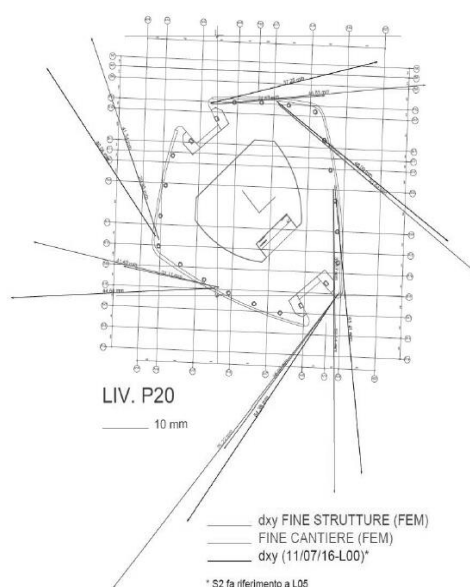


Fig. 9. Spostamenti orizzontali del piano a livello 20

Il movimento del solaio a liv. 20 analizzato durante la costruzione della torre appare continuo e coerente con quanto atteso. Gli spostamenti sono nel complesso vicini a quelli stimati tramite le analisi FEM. Anche la loro intensità risulta soddisfacente in quanto compresa tra le grandezze delle deformazioni previste a completamento della sola struttura ed a fine cantiere.

4.4 Nucleo

Analogamente, il comportamento nel piano orizzontale viene monitorato anche per il nucleo centrale. In particolare vengono individuati n.8 punti in pianta e le misure vengono replicate ai livelli 2-5-7-10-15-20-25-30-35-40 al fine di analizzare la deformazione a torsione per effetto della componente orizzontale trasmessa tramite i solai dalle colonne inclinate.

4.5 Colonne

Delle colonne viene monitorato lo spostamento verticale, relativo rispetto al nucleo. In questo modo se ne valuta l'accorciamento differenziale dovuto ai carichi e agli effetti reologici del calcestruzzo. Tali valori sono rilevati lungo le 4 direttrici di piano ai livelli 2-5-7-10-15-20-25-30-35-40.

5 MONITORAGGIO AMBIENTALE

La principale finalità del monitoraggio ambientale è la definizione del comportamento strutturale dell'intera torre, per mezzo della valutazione sperimentale di una serie di parametri utili a studiare la risposta dinamica, come la frequenza e la forma dei modi propri di vibrare.

Le attività di caratterizzazione dinamica si sono sviluppate mediante la misura delle **vibrazioni ambientali**, in cui l'eccitazione è data da fattori quali vento, traffico, microtremori, ecc. È stata quindi misurata la risposta dell'edificio, in due differenti finestre temporali che verranno descritte nei paragrafi successivi. Successivamente, attraverso tecniche di analisi modale è stata portata a termine la stima degli autovalori di frequenza di vibrazione e delle forme modali.

Al fine di correlare le ampiezze di oscillazione dell'edificio con le condizioni meteorologiche sono stati installati sensori atti a misurare intensità e direzione del vento durante l'intera durata di acquisizione dei dati. In particolare è stata misurata l'azione del vento in termini di intensità (velocità) e direzione.

Il monitoraggio della risposta dinamica è stato effettuato con accelerometri posti in n.6 punti per ognuno dei seguenti livelli: 10-21-31-40. Sono stati installati per ogni livello:

- n.4 accelerometri (lungo il perimetro) ciascuno con tre assi di misura (x-y-z);
- n.2 accelerometri (sui lati opposti del nucleo) ciascuno con due assi di misura (x-y).

Complessivamente sono quindi presenti 64 assi di misura su 16 (4 x 4) posizioni triassiali e 8 (2 x 4) posizioni biassiali (solo assi orizzontali).

La predisposizione di un sistema di misura su un edificio di considerevoli dimensioni, soprattutto in termini di sviluppo verticale, ha dovuto considerare i seguenti aspetti:

- lunghezza cavi di segnale:
 - distanza da condizionatore di segnale e sensore con conseguente rischio di assorbimento del segnale;
 - sviluppo complessivo dei cavi e rischio di "effetto antenna";
- protezione delle postazioni di misura e delle linee di cavo, soprattutto per le analisi a cantiere aperto e quindi nelle peggiori condizioni dal punto di vista di protezione di tutto il sistema;
- necessità di un sistema di acquisizione a timing unico per la valutazione non solo dei picchi in frequenza ma anche della fase del segnale accelerometrico.

Inoltre, dal momento che le due finestre temporali di acquisizione sono state messe in atto a diversi mesi di distanza e poiché sono richieste predisposizioni per futuri monitoraggi, è stata prevista una catena di misura acquisizione, condizionamento, cavi, sensori che possa essere in futuro configurata come sistema stabile di misura.

5.1 Analisi dinamica della struttura "a nudo" (Fase 1)

La prima finestra temporale di acquisizione dei dati ha previsto sessioni di misura nei giorni tra il 21 maggio e il 1 giugno 2016 su intervalli temporali distinti e consecutivi (adiacenti) in continuo sulle 24 ore. La struttura in esame al momento del rilievo presenta le seguenti differenze rispetto alla struttura definitiva:

- mancanza delle strutture oltre P41;

- presenza di facciate peraltro non continue sino a P17 elevazione (con conseguente notevole decremento e difformità della forza applicata dal vento alla struttura);
- presenza di alcuni punti di vincolo esterni legati alla presenza delle due gru (ancorate su n.4 posizioni lungo l'elevazione sui lati Nord e Sud della torre).

5.2 Analisi dinamica della struttura con la facciata (Fase 2)

La seconda finestra temporale è ha avuto come oggetto la struttura finita, a montaggio delle facciate concluso. Ciò ha permesso di valutare gli effetti delle eccitazioni ambientali nelle condizioni il più simili possibile a quelle di esercizio. Le sessioni di misura sono state svolte nei giorni tra il 14 aprile e il 6 maggio 2017 su intervalli temporali distinti e consecutivi (adiacenti) in continuo sulle 24 ore. Si riporta nella tabella sottostante un riepilogo delle frequenze stimate a progetto e di quelle derivanti dall'analisi sperimentale delle due fasi:

Tabella 1. Confronto tra frequenze di progetto e sperimentali

Modo	Frequenza di Progetto[Hz]	Finestre in frequenza - Fase 1[Hz]	Finestre in frequenza - Fase 2[Hz]
1	0,2053	0,32	0,22
2	0,216	0,33	0,27
3	0,7022	0,51-0,61	0,55

Si osserva che i modi di eccitazione a frequenza minore (Modo 1 e Modo 2) della fase 2 risultano essere di 0,10 Hz minori rispetto i valori sperimentali della fase 1 e di 0,02 Hz - 0,05 Hz superiori rispetto i valori di progetto. Inoltre il modo di eccitazione 3 di fase 1 risulta essere di 0,20 Hz circa inferiore rispetto il modello di progetto, mentre presenta gli stessi valori identificati con il modello sperimentale della fase 2.

Per quanto riguarda le forme modali, si riportano nelle figure seguenti rispettivamente i grafici in asse x e in asse y ottenuti a progetto (Fig. 10) e con l'analisi sperimentale nelle due fasi (Fig. 11 e 12). L'andamento di progetto risulta replicato in buona approssimazione in fase 2, mentre sono evidenti le differenze tra fase 1 e fase 2.

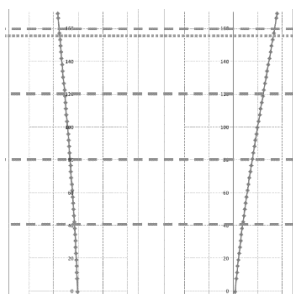


Fig. 10. Modo 1 di progetto – lungo asse x e asse y

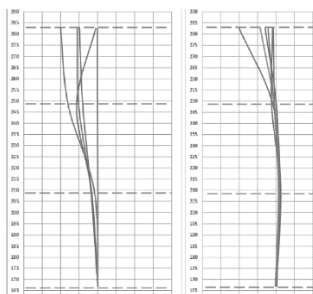


Fig. 11. Modo 1 di fase 1 – lungo asse x e asse y

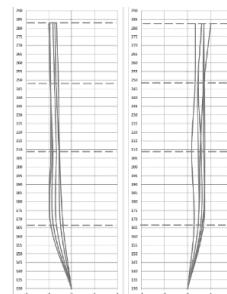


Fig. 12. Modo 1 di fase 2 – lungo asse x e asse y

6 CONCLUSIONI

L'attività di monitoraggio della Torre Hadid è tuttora in corso e i risultati fino a qui ottenuti hanno permesso di validare le scelte progettuali intraprese prima e durante la costruzione.

Dall'analisi dei dati rilevati dagli strumenti posti sugli elementi di fondazione si è potuto evidenziare che gli abbassamenti sono sempre stati proporzionali agli incrementi di carico dovuti agli stati di avanzamento della torre. Inoltre l'entità della deformazione in testa ai pali posti sotto la torre è dell'ordine della deformazione attesa allo stato limite di esercizio di progetto ed è coerente con i cedimenti rilevati topograficamente. Ciò conferma la validità degli abbassamenti rilevati all'interfaccia con la piastra circostante la torre, che rientrano pienamente nelle assunzioni imposte. In generale i risultati analizzati descrivono una struttura più rigida del previsto, come confermato dai primi due modi di vibrare ottenuti dalle analisi dinamiche. Tale tendenza si è evidenziata anche a livello locale, dall'analisi del comportamento deformativo "a freccia" dei singoli solai, e a livello globale dal monitoraggio topografico. In questo caso è risultato particolarmente significativo il rilievo nel piano orizzontale dei solai, che sta confermando l'ordine di grandezza degli spostamenti previsti a progetto e la direzione del fenomeno deformativo. Per il nucleo inoltre, le letture suggeriscono che la torre sia ruotata meno di quanto previsto evidenziando una rigidità torsionale maggiore delle attese.

Infine l'attività di monitoraggio è risultata fondamentale ai fini della collaudabilità delle strutture.

PAROLE CHIAVE

Monitoraggio strumentale, monitoraggio topografico, deformazioni, monitoraggio ambientale, analisi dinamica, forme modali.