

Interazione Suolo-Struttura e Struttura-Struttura: una lezione dal terremoto di Mirandola del 20.05.2012

Silvia Castellaro¹, Nicola Negri², Marzia Rovere³, Luigi Vigliotti³

¹ Ricercatore, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna

² Geologo, Libero Professionista

³ Ricercatore, Istituto di Scienze Marine, CNR Bologna

1. PREMESSA

Da alcuni anni per il geologo è diventata prassi comune la stima delle frequenze di risonanza dei suoli, ossia delle frequenze alle quali essi vibrano con la massima ampiezza sia in condizioni di microtremore ambientale che durante un terremoto. Come tutti gli oscillatori, anche le strutture hanno le loro frequenze di risonanza ed è noto che la doppia risonanza suolo-struttura vada evitata, o quantomeno tenuta in conto in sede di progettazione in quanto essa comporta un aggravio di accelerazione che la struttura sarà chiamata a sostenere.

Le strutture gemelle, ossia gli edifici costruiti allo stesso modo e con le stesse geometrie, costituiscono casi di studio interessanti quando l'evidenza sperimentale mostra una risposta sismica diversa poiché le ragioni di tali differenze vanno ricercate, ad esempio, nell'interazione suolo-struttura o nell'interazione con strutture adiacenti.

In occasione del recente terremoto di Mirandola (MO) del 20.05.2012, a Bologna, a circa 45 km dall'epicentro, è stata osservata una risposta sismica molto diversa da parte di due edifici apparentemente gemelli. E' di questo caso che parleremo nelle prossime pagine.

1.1 Il caso

Nel settore settentrionale della città di Bologna esistono due strutture, che chiameremo torre A e torre B, caratterizzate da geometria quasi identica e analoga tipologia edilizia, collocate a distanza di 120 m l'una dall'altra (Figura 1). Esse sono circondate da alcune strutture minori disposte in modo simmetrico e, nell'insieme, costituiscono un aggregato residenziale. In pianta le due torri hanno la forma di una porzione di corona circolare, con il centro nello stesso punto. Le torri, aventi stessa altezza totale (56 m) e la stessa dimensione di base (40 m circa) si trovano ad una distanza diversa dal centro, cosa che risulta in una curvatura leggermente diversa (la torre A presenta un raggio di 45 m e la torre B di 75 m, Figura 2 e Figura 3). Le strutture furono progettate a fine anni '90 e la costruzione

ultimata nei primi anni 2000, pertanto secondo normative sulle costruzioni che come carichi orizzontali contemplavano solo il vento e non aggravii indotti dai terremoti.

A seguito del terremoto principale della Pianura Padana Emiliana di $M_L = 5.9$ del 20.05.2012 (44.89°N, 11.23°E), la torre A non ha riportato alcun danno evidente mentre la torre B ha presentato numerosi danni pur solo estetici (cadute di intonaci, fessurazioni sui muri di tramezze) ma abbastanza fastidiosi da richiedere tinteggiature con ristrutturazione delle pareti (Figura 4). Abbiamo pertanto provato a cercare una spiegazione per una tale differenza di comportamento tra due strutture tanto simili attraverso un'analisi dinamica dei corpi di fabbrica e del suolo di fondazione.

2. ANALISI DINAMICA DI STRUTTURE E SOTTOSUOLO

La caratterizzazione dinamica delle strutture e del sottosuolo è stata condotta in modo passivo, ossia sfruttando



Figura 1 – Ubicazione ed orientamento delle torri A e B rispetto all'epicentro del terremoto del 20.05.2012 (esagono giallo). La distanza tra epicentro e torri è di 45 km. Immagine satellitare tratta da Google Earth™.

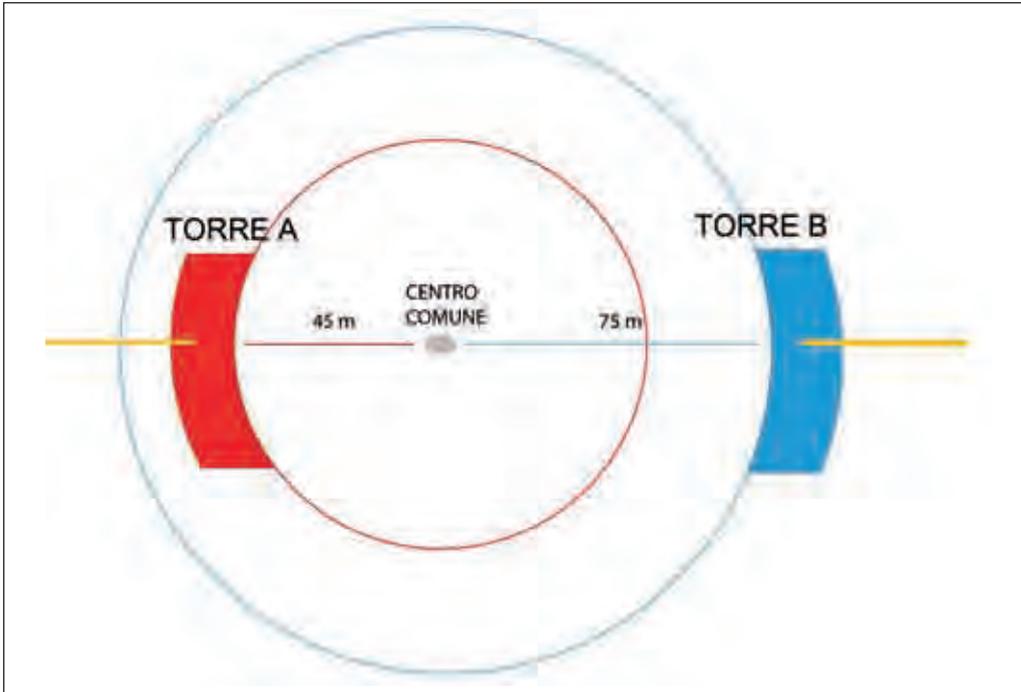


Figura 2 – Pianta schematica delle torri che evidenzia il loro raggio di curvatura. Le fasce gialle laterali indicano la posizione dei punti di misura sul suolo libero.

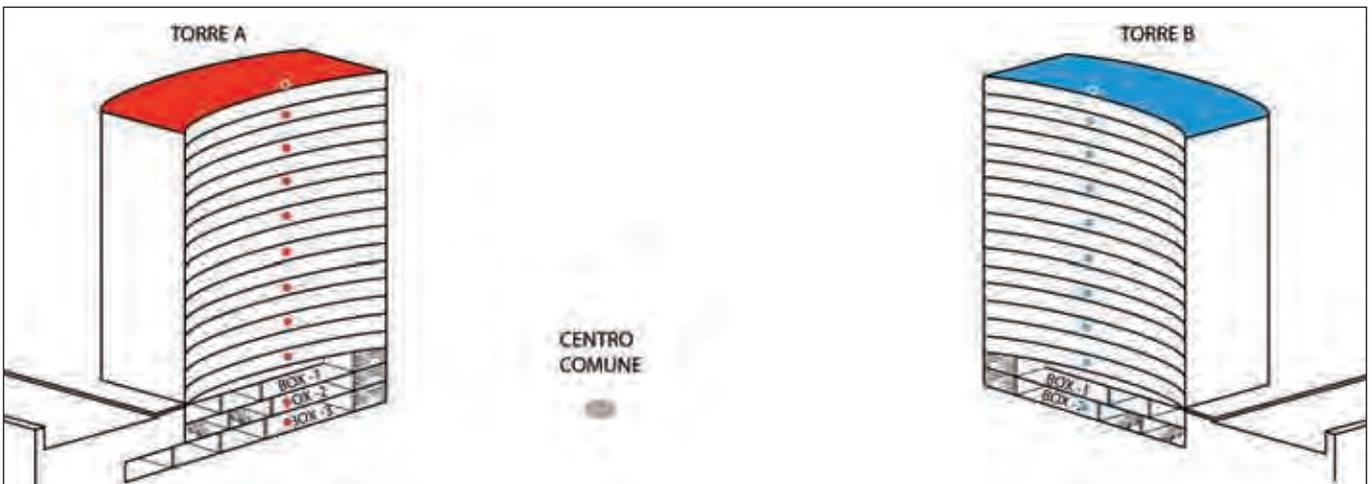


Figura 3 – Posizione dei punti di misura (cerchi colorati) all'interno delle torri A e B. Le dimensioni delle strutture e le loro distanze relative sono alla stessa scala.

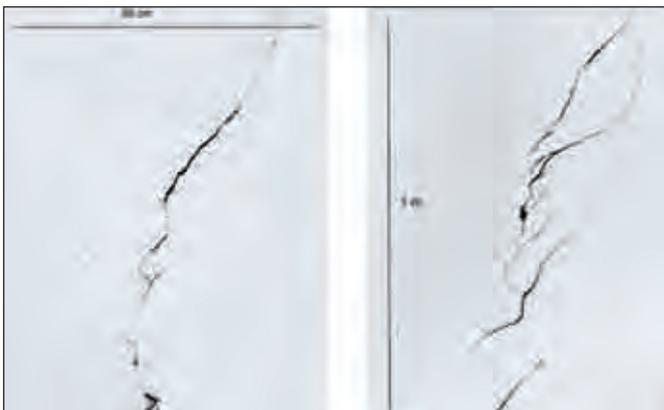


Figura 4 – Esempio di danni fessurativi avvenuti nella torre B a seguito del terremoto del 20.05.2012. La scala orizzontale delle immagini è 0.5 m, la scala verticale copre 1 m. I danni illustrati riguardano due muri di tramezze.

solo il microtremore sismico ambientale, secondo i metodi ormai ben consolidati della sismica a onde di superficie per i suoli e della NIMA (Noise Input Modal Analysis) per le strutture (Snieder e Safak, 2006; Castellaro e Mulargia, 2010).

2.1 Caratterizzazione delle strutture

Le strutture in esame presentano due pareti di confinamento laterale che sono setti in calcestruzzo, come i due vani scale-ascensore mentre gli altri elementi portanti sono costituiti da colonne verticali in acciaio.

Entrambe le strutture sono fondate su platea di circa 1 m di spessore impostata a -9 m di profondità rispetto al piano campagna sotto la struttura A, e a -7 m sotto la struttura B. In pratica in profondità la struttura A differisce dalla B per il fatto di avere un piano interrato in più, sebbene le quote assolute di fondazione differiscano solo di 2 m.

In altezza le strutture toccano entrambe i 56 m e il rapporto altezza/base è di circa 1.4.

L'analisi modale è stata effettuata posizionando per ciascuna torre un tomografo Tromino® di riferimento sul piano di fondazione e spostando un altro tomografo lungo la stessa verticale, corrispondente ad uno dei due vani scale, alle quote indicate in Figura 3, con gli assi orizzontali dello strumento paralleli agli assi longitudinale e trasversale della struttura. Le misure sono state effettuate nel mese di luglio, in un arco di tempo molto limitato (< 2 h) al fine di garantire la stazionarietà della forzante esterna. In aggiunta, al fine di garantire un riferimento comune, su ciascuna torre è stato mantenuto uno strumento di riferimento in azione durante tutta la campagna di indagine e i risultati in termini di spostamento ai vari piani verranno rapportati agli strumenti di riferimento.

L'analisi ha permesso di ottenere: 1) le frequenze dei modi di vibrare, 2) le deformate modali, 3) gli smorzamenti.

Dalla Figura 5 si può osservare che la torre A presenta il primo modo flessionale a 1.1 Hz in direzione trasversale e a 1.2 Hz in direzione longitudinale. La deformata del primo modo flessionale (qui ottenuta dalla deconvoluzione degli spettri di velocità ai vari piani per quello del piano di riferimento-fondazione), mostra un rapporto massimo tra tetto e base della struttura pari a 45 in senso trasversale e circa 40 in senso longitudinale (Figura 6). Questa torre era stata analizzata anche 3 anni prima (Castellaro e Mulargia, 2010) e le frequenze modali e le deformate ottenute nell'indagine del 2012 coincidono perfettamente con quelle ottenute in precedenza, a ulteriore conferma del fatto che la torre non ha subito danni strutturali a seguito del terremoto. La differenza di ampiezza delle deformate tra i due rilievi effettuati in anni diversi è solo apparente e legata al fatto che in occasione dello studio del 2009 era stato preso come piano di riferimento la quota del pia-

no campagna anziché quella del piano di fondazione. La semplice correzione per la diversa quota di riferimento tra le due campagne di indagine porterebbe ad ottenere gli stessi valori.

Per quanto riguarda la torre B, si osserva la frequenza del primo modo flessionale trasversale a 0.9 Hz e del primo longitudinale a 1.1 Hz. La deformata mostra un rapporto massimo tra tetto e base della struttura pari a circa 65 in senso trasversale e 40 in senso longitudinale.

In pratica il confronto tra le torri mostra che la dinamica secondo l'asse longitudinale è identica (sia per le frequenze modali che per l'ampiezza delle deformate) mentre in senso trasversale la torre A ha una frequenza del primo modo flessionale del 20% superiore rispetto alla torre B. La frequenza di risonanza di una struttura dipende dalla sua rigidezza e dalla distribuzione della massa. Indicativamente ed in prima approssimazione, all'aumentare della rigidezza la frequenza aumenta e all'aumentare della massa la frequenza diminuisce. Considerato che la distribuzione delle masse secondo l'altezza della struttura è praticamente identica tra le due torri, responsabile di questa differenza è una minor rigidezza della torre B rispetto alla torre A. La leggermente diversa curvatura dei raggi delle due torri (Figura 3) può essere una concausa ma la differenza misurata è eccessiva per essere spiegata solo in termini di geometria. Una modellazione specifica mostra infatti che quest'ultima può spiegare una differenza di frequenze solo entro il 3%, contro il 20% osservato (Castellaro et al., 2013).

Per quanto riguarda la differenza nell'ampiezza delle deformate tra torre A e torre B, si osserva che in condizioni di tremore ambientale la torre B ha una escursione che è il 40% maggiore rispetto alla torre A in senso trasversale (in senso longitudinale le dinamiche come già accennato sono identiche). Questa differenza si può spiegare in diversi modi: da un lato conferma l'evidenza che la torre B è meno rigida della torre A (come suggerivano le diverse frequenze modali), dall'altro può derivare anche dal fatto che entrambe le torri sono in contatto laterale con due serie di palazzine molto più basse. Nel caso della torre A queste palazzine arrivano fino a 6 piani di altezza mentre nel caso della torre B le palazzine immediatamente in appoggio alla torre toccano solo i 4 piani. Ulteriore elemento che può spiegare le diverse ampiezze delle deformate è il fatto che la torre B ha una quota di fondazione di 2 m più superficiale rispetto alla torre A, risultando quindi meno incastonata nel sottosuolo. La torre B risulta però in appoggio, in direzione trasversale, anche ad un'altra struttura di circa 7 m di altezza, per cui questo compensa abbondantemente gli effetti legati alla differenza di quota di fondazione tra le due torri. Anche in questo caso una modellazione specifica (Castellaro et al., 2013) mostra che la diversa rigidezza delle strutture e l'effetto delle costruzioni circostanti non sono sufficienti a spiegare le differenze nelle deformate

osservate sperimentalmente. Per queste verrà fornita una ulteriore possibile spiegazione più avanti nel testo.

Va notato che l'aumentata ampiezza della deformata nella torre B rispetto alla torre A riguarda anche il secondo modo flessionale in misura maggiore del 50%.

La causa principale della differenza nella frequenza flessionale tra le torri appare dunque una minor rigidezza della torre B, unita probabilmente alla minor curvatura. La causa principale della diversa ampiezza della deformata delle torri appare invece spiegabile sia con la diversa rigidezza delle torri che con una interazione con le strutture adiacenti minore per la torre B (circondata appunto di palazzine di 4 piani) rispetto alla torre A (circondata da strutture di 6 piani fuori terra).

Per le torri è stato stimato anche lo smorzamento attraverso una tecnica non parametrica (Mucciarelli e Gallipoli, 2007). La tecnica consiste, dopo le procedure di rito di correzione ed equalizzazione del segnale, nell'integrazione dello stesso per ottenere serie temporali in termini di spostamento. Successivamente si cercano i massimi locali e si costruisce una matrice di ampiezze dei massimi $x(t_i)$ vs. istante di occorrenza t_i . Per ciascuna coppia di dati si verifica se $x(t_i) > x(t_i + 1)$ e in caso positivo si calcola la pseudofrequenza e lo smorzamento. Si ottengono così diagrammi come quelli di Figura 7 da cui si leggono le frequenze dei modi principali e lo smorzamento associato. Questa tecnica è meno precisa della RandomDec classica ma più rapida e permette di ottenere un'informazione di larga massa sullo smorzamento anche da registrazioni di microtremore brevi, come quelle effettuate in questo studio. Lo smorzamento calcolato per la torre A è risultato in un valore medio di 4.2% mentre per la torre B in un valore medio di 3.7%, andamento in linea con le consi-

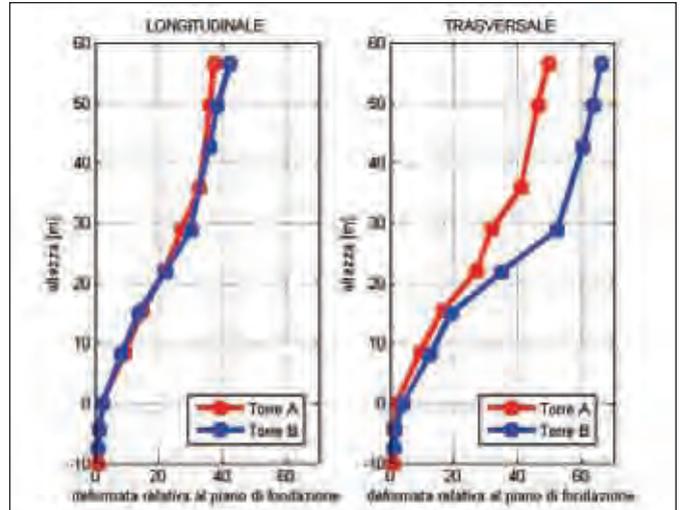


Figura 6 – Deformate relative (rispetto al piano di fondazione) delle torri A e B in senso longitudinale e trasversale per il primo modo flessionale. Si osserva un comportamento del tutto sovrapponibile in senso longitudinale ed una ampiezza della deformata molto maggiore per la torre B in senso trasversale.

derazioni effettuate in precedenza.

A questo punto risulta interessante studiare il sottosuolo per capire se anche la risposta sismica locale possa avere avuto un ruolo nelle differenze di comportamento (e di danno) subito dalle due torri.

2.2 Caratterizzazione del sottosuolo

Il sottosuolo di fondazione delle torri è stato analizzato ripetutamente negli anni e presenta valori di velocità delle onde di taglio (V_s) attorno a 200 m/s ed una frequenza di risonanza caratteristica di tutto questo tratto della Pianura Padana di 0.8 Hz. L'esito delle indagini multicanale a onde di superficie, delle prove H/V ed il loro fit congiunto risultante in un profilo di V_s è dato in Figura 8.

La prima osservazione riguarda il fatto che la torre B risulta in doppia risonanza col sottosuolo non solo per il primo ma anche per il secondo modo flessionale mentre la torre A non risulta in doppia risonanza (Figura 9).

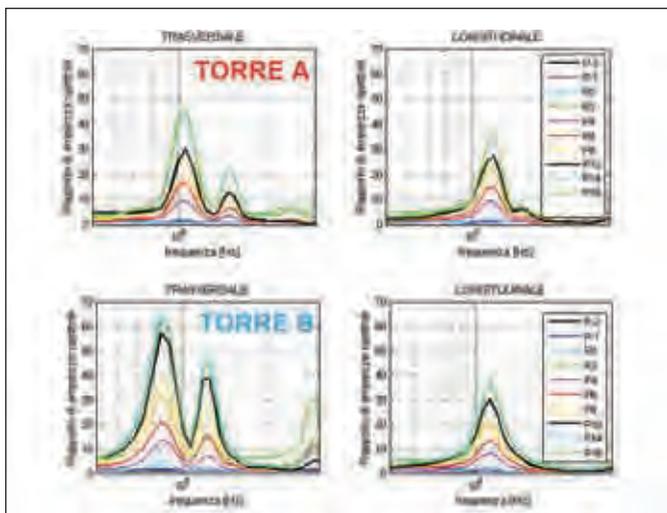


Figura 5 – Frequenze modali delle torri A e B ottenute dalla deconvoluzione degli spettri registrati ai vari piani per quelli registrati al piano di fondazione (riferimento). Si osserva un comportamento identico secondo l'asse longitudinale e una sostanziale differenza (per frequenza e ampiezza, a parità di riferimento) secondo l'asse trasversale.

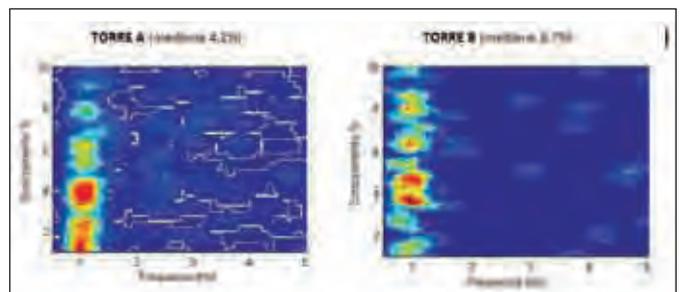


Figura 7 – Smorzamento stimato per il primo modo flessionale in senso trasversale per le torri A (sinistra) e B (destra).

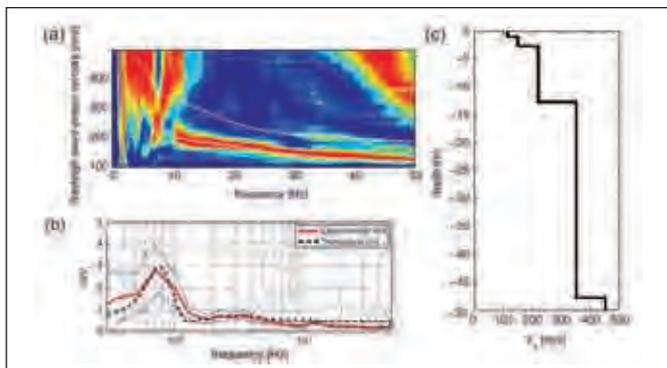


Figura 8 – A) spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh registrati sul suolo libero circostante le torri, B) curva H/V tipica del sito. Il fit congiunto delle prove A) e B) ha permesso di ottenere il modello di sottosuolo in termini di Vs indicato in C). La curva di dispersione teorica nei primi 2 modi è illustrata dai pallini bianchi nel pannello A) e dal tratteggio nero nel pannello B). La profondità di penetrazione della prova A) è limitata a 15 m, il resto del modello è ottenuto dal fit congiunto di A) e B).

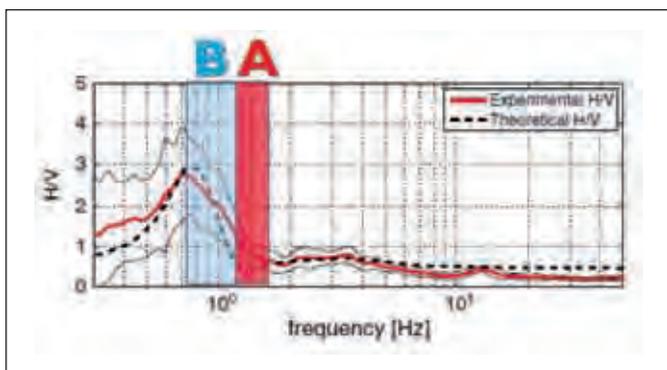


Figura 9 – Area in cui ricadono il primo e il secondo modo flessionale della torre B (azzurro) e della torre A (rosso) sovrapposti alla frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo (curva rossa media con deviazione standard a tratto nero continuo).

2.3 Altri fenomeni di interazione suolo-struttura

Lo studio precedente (*ibid.*) che riguardava l'interazione tra edifici grandi e sottosuolo, concludeva che la radiazione della struttura si percepisce al suolo in un modo che decade come l'inverso della distanza (trattandosi di onde di superficie) e che è maggiormente visibile in condizioni di coincidenza di risonanze tra suolo e struttura.

Ad esempio, nel caso della Torre di Pisa (1° modo flessionale a 1 Hz, che coincide con una frequenza secondaria del sottosuolo), l'effetto della radiazione della torre sul suolo si percepisce fino a 12-14 m dalla stessa.

Nel caso della Torre degli Asinelli di Bologna il primo modo flessionale (≈ 0.3 Hz) si percepisce entro pochissimi metri dalla torre mentre il secondo modo (≈ 0.8 Hz) sul sottosuolo si osserva 'paradossalmente' fino alla stessa distanza del primo perché coincide con la risonanza del sottosuolo stesso.

Nel caso del campanile di San Marco a Venezia, che pure è una struttura molto massiccia, il primo modo flessionale (≈ 0.7 Hz) di fatto non si percepisce nelle misure effettuate sul suolo di piazza San Marco, suolo che presenta i modi propri di vibrare a 0.25 e 4 Hz.

Nel caso delle torri oggetto di questo studio ci aspetteremmo pertanto che il moto della torre A, che non è in risonanza col sottosuolo, sia molto meno percettibile nelle misure effettuate a terra a distanza crescente dalla torre rispetto al moto della torre B. Questo è in effetti quanto emerge: già a 7 m di distanza dal perimetro della fondazione (misura C in Figura 10, distanza assoluta dal centro della torre A: 16.5 m) l'effetto della radiazione della struttura A sul suolo è trascurabile.

Nel caso della torre B in cui invece sono in risonanza col suolo sia il primo che il secondo modo flessionale, l'effetto della torre è risultato misurabile fino a 40 m dal centro della torre stessa (Figura 10).

Si ricorda che l'effetto della radiazione di una struttura al suolo si riconosce come un picco netto nello spettro misurato sul sottosuolo alla frequenza propria della struttura. Tale picco compare prevalentemente sulle componenti orizzontali (ed è assente sulla verticale solo in assenza di rocking della struttura) e svanisce allontanandosi dalla struttura stessa. Esso non può essere confuso con le risonanze del sottosuolo perché nelle registrazioni del microtremore queste ultime a livello spettrale sono identificate da un minimo locale nella componente verticale mentre le componenti orizzontali normalmente non mostrano picco o, quando lo mostrano (effetto delle onde S e di Love) a) non decresce in ampiezza allontanandosi dalla struttura e b) ha la forma di un leggero rigonfiamento e non di un picco aguzzo come quelli tipici delle strutture (Castellaro e Mulargia, 2010).

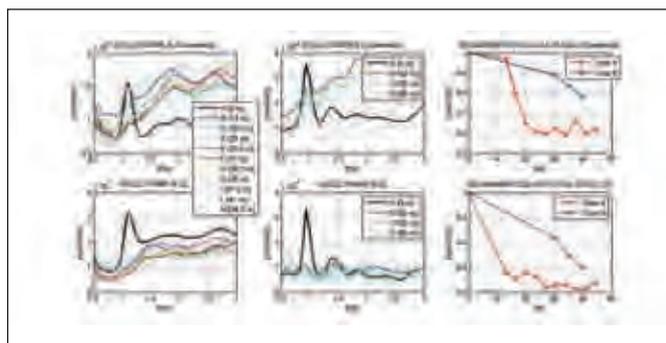


Figura 10 – Sinistra: spettri orizzontali (trasversali) e verticali registrati sul suolo a diverse distanze dalle torri lungo le fasce gialle indicate in Figura 2. Le distanze sono calcolate dal centro della torre (0 m, punto A) e crescono verso l'esterno. Il primo punto di misura fuori fondazione per la torre A è il punto C, a 16.5 m di distanza dal centro della torre. Il primo punto fuori dalla fondazione per la torre B è il punto B, a 30 m di distanza dal centro della torre. Destra: decadimento in ampiezza spettrale del picco indotto dalla torre sul suolo alla frequenza del primo modo flessionale. Si osserva un effetto molto più marcato sul sottosuolo per la torre B rispetto alla torre A.

3. CONSIDERAZIONI FINALI

A seguito dell'evento sismico della Pianura Padana Emiliana del 20.05.2012 è emerso un comportamento dinamico ed uno stato di danno molto diverso tra due torri residenziali ubicate nel settore nord di Bologna, praticamente gemelle per geometria e tipologia edilizia. A dispetto dell'apparenza, che le farebbe appunto definire identiche, devono esserci delle ragioni importanti per una tale differenza di comportamento. Abbiamo cercato di identificarle attraverso un'analisi modale delle strutture e del rispettivo suolo di fondazione.

E' emerso che le torri esaminate differiscono del 20% nella frequenza del modo fondamentale flessionale in senso trasversale e fino a oltre il 50% nell'ampiezza delle deformate del primo e del secondo modo flessionale trasversale. In particolare la torre che non ha subito danno risulta più rigida (frequenze modali maggiori, deformata meno ampia) e risulta non essere in doppia-risonanza col sottosuolo. La torre che ha subito danni risulta invece in doppia risonanza col sottosuolo sia per il primo che per il secondo modo flessionale trasversale.

Le torri esaminate sono in appoggio laterale ad altre strutture molto più basse e la torre che ha subito danni risulta a contatto con palazzine generalmente di altezza inferiore rispetto alla struttura che non ha subito danno. Questa differenza può spiegare in parte la maggior escursione delle deformate della torre che ha subito danno rispetto all'altra torre, anche in condizioni di semplice vibrazione ambientale. La torre che ha subito danno, tuttavia, è in appoggio ad altre strutture anche sul lato che inibisce la deformazione trasversale e questo dovrebbe limitare l'escursione della deformata, cosa che invece non si verifica.

Una conferma del fatto che il ruolo del sottosuolo non sia marginale nel caso esaminato, è il fatto che la torre non danneggiata praticamente non dà effetti di radiazione del suo moto proprio sul sottosuolo circostante mentre questi sono ben misurabili sul terreno circostante la torre danneggiata. In effetti la radiazione del moto della struttura al sottosuolo è un fenomeno atteso particolarmente nel caso della coincidenza di risonanze tra suolo e struttura.

In conclusione, siamo di fronte all'evidenza sperimentale di un comportamento dinamico molto diverso tra due strutture apparentemente uguali, che ha portato una a

subire danni pur solo estetici ma comunque economicamente non trascurabili. Le ragioni di tale differenza risultano essere in una intrinseca minor rigidità della struttura non danneggiata rispetto all'altra, in un diverso contributo alla dinamica dell'intero sistema offerto dalle strutture minori circostanti le torri in esame (comportamento dinamico di un aggregato) nonché nel fatto che la diversa rigidità porta una delle due torri ad essere in risonanza col sottosuolo sia nel primo che nel secondo modo flessionale, con conseguente aumentata ampiezza del moto che la torre meno rigida deve sostenere a parità di input sismico. Ulteriore evidenza del fatto che la coincidenza di risonanze tra suolo e struttura vada debitamente tenuta in considerazione in fase di progettazione edilizia.

Ci sembra che questo sia un caso molto didattico. Strutture apparentemente identiche possono comportarsi in modo nettamente diverso in ragione di almeno 3 fattori

- a) fattore costitutivo (es. rigidità intrinseca, a parità di distribuzione della massa),
- b) effetti di interazione con le strutture circostanti e ultimo, ma non meno importante,
- c) interazione suolo-struttura (esistenza di doppie risonanze).

Non si tratta di dettagli, dunque, ma di elementi da prendere in seria considerazione poiché nel nostro caso una delle due torri ha subito danni per un semplice terremoto medio a 45 km di distanza.

4. BIBLIOGRAFIA

CASTELLARO S. E MULARGIA F., 2010. How far from a building does the ground motion free field start? The cases of three famous towers and of a modern building, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2080-2094.

CASTELLARO S., MULARGIA F., PADRON HERNANDEZ L.A., 2013. *Structure-structure and soil-structure interaction: a lesson from the Mirandola 20th May 2012 earthquake*, *Bull. Earthq. Eng.*, sottomesso

MUCCIARELLI M. E GALLIPOLI M. R., 2007. Non-parametric analysis of a single seismometric recording to obtain building dynamic parameters, *Annals of Geophysics*, 50, 259-266.

SNIEDER R. E SAFAK E., 2006. Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, 586-598.