

Rapporti tecnici

INGV

**Il monitoraggio sismico della
torre degli Asinelli e della Garisenda.
Risultati preliminari dell'analisi dei dati**

284



Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)
Luigi Cucci (INGV - RM1)
Nicola Pagliuca (INGV - RM1)
Umberto Sciacca (INGV - RM1)
Alessandro Settimi (INGV - RM2)
Aldo Winkler (INGV - RM2)
Salvatore Stramondo (INGV - CNT)
Gaetano Zonno (INGV - MI)
Viviana Castelli (INGV - BO)
Marcello Vichi (INGV - BO)
Sara Barsotti (INGV - PI)
Mario Castellano (INGV - NA)
Mauro Di Vito (INGV - NA)
Raffaele Azzaro (INGV - CT)
Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)
Mario Mattia (INGV - CT)
Marcello Liotta (Seconda Università di Napoli, INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano
Tel. +39 06 51860068
Fax +39 06 36915617
Rossella Celi
Tel. +39 095 7165851
redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

IL MONITORAGGIO SISMICO DELLA TORRE DEGLI ASINELLI E DELLA GARISENDA. RISULTATI PRELIMINARI DELL'ANALISI DEI DATI

Riccardo M. Azzara¹, Adriano Cavaliere², Stefania Danesi², Andrea Morelli², Lucia Zaccarelli²

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1)

²INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

284

Indice

1. Introduzione	7
2. Gli apparati strumentali	7
3. Descrizione dell'esperimento	11
4. Analisi dei dati e primi risultati	14
4.1 Analisi delle serie temporali	14
4.2 Analisi nel dominio della frequenza	28
5. Considerazioni finali	37
Ringraziamenti	37
Bibliografia	37

1. Introduzione

La Torre degli Asinelli e la Garisenda rappresentano sicuramente il simbolo stesso di Bologna, esse sono le due torri più note e importanti fra la ventina rimasta delle oltre cento di cui la città si fregiava alla fine del XII secolo.

La Torre degli Asinelli, nota per essere la più alta torre pendente d'Italia, viene costruita tra il 1109 e il 1119 dalla famiglia omonima e passa al Comune già nel secolo successivo per essere destinata a fini militari e a prigione. Alta 97,38 m presenta uno strapiombo di 2,32 metri e una scalinata interna di 498 gradini terminata nel 1684. Il basamento è circondato da una 'rochetta' realizzata nel 1488 per ospitare i soldati di guardia. Oggi sotto il portico sono state ricollocate alcune botteghe di artigianato a ricordo della funzione commerciale svolta dal medievale 'mercato di mezzo'.



Figura 1.1 Una immagine delle Torri alla metà del 1800 tratta da Zuccagni-Orlandini, 1845.

La vicina Torre Garisenda, coeva alla precedente, si differenzia visivamente per la minore altezza di soli 48,6 metri e il forte strapiombo (3,22 m) dovuto ad un precoce e maggiore cedimento del terreno e delle fondamenta. Dante che la vide ancora integra quando misurava circa 60 m, la paragona ad Anteo chinato nel XXXI Canto dell'Inferno. Tra il 1351 e il 1360 si rese necessario l'abbassamento della torre di 12 metri temendo che la forte pendenza la potesse far crollare. Il rivestimento in bugne di selenite alla base risale invece alla fine del XIX secolo.

Nel corso del tempo numerosi sono stati gli episodi che hanno prodotto effetti di danneggiamento sulle Torri, in particolare si ricordano quelli prodotti dai terremoti del 20 luglio 1399 (Mw 5.14, DBM11, [Locati et al., 2011]) nel modenese e del periodo sismico bolognese fra il dicembre 1504 e il maggio 1505 [Guidoboni et al., 2007], quando a causa del terremoto del 3 gennaio 1505 (Me 5.57, DMB11) precipitarono due merli del torresino posto alla sommità della Torre e si determinò la dislocazione della struttura della cella campanaria <http://www.comune.bologna.it/duetorri/servizi/146:10316/10414>

Dalla primavera del 2011 sono stati installati all'interno delle torri apparati di misura per la definizione dello stato di deformazione della muratura, di quello tensionale delle cinture metalliche e, in generale, per valutare la risposta statica delle strutture in relazione agli effetti termici giornalieri e stagionali, dell'azione del vento e, in generale, degli agenti ambientali (informazioni dettagliate su http://www.tecnoinmonitoraggi.it/cms_descrizione_sistema_monitoraggio.html).

A seguito della sequenza sismica dell'Emilia innescata dai terremoti del maggio 2012, sebbene entrambe le torri non abbiano dato segni di aver risentito di sollecitazioni tali da generare allarme sulla loro stabilità, il Comune di Bologna ha sollecitato l'esecuzione di un monitoraggio sismico delle Due Torri.

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha dato la disponibilità a contribuire al monitoraggio dinamico delle due torri attraverso l'installazione di 6 stazioni sismometriche in acquisizione continua: quattro sono state installate all'interno della Torre degli Asinelli, due nella Torre Garisenda. Il monitoraggio ha avuto una durata di circa tre mesi, da metà Giugno a metà Settembre 2012. Il presente rapporto illustra i primi risultati ottenuti dall'analisi dei dati registrati durante l'esecuzione dell'esperimento.

2. Gli apparati strumentali

Le stazioni sismiche utilizzate sono state equipaggiate con sensori sismometrici triassiali Lennart Le3D-5s accoppiati a sistemi di acquisizione Reftek 72A.

Reftek 72A sono acquisitori digitali che risalgono agli anni '90 basati sull'uso della modulazione delta/sigma per ottenere una alta risoluzione della conversione AD. Il segnale viene fisicamente sovracampionato a una frequenza di 8 kHz per poi essere sottoposto a diversi stadi di filtraggio digitale (FIR) e di decimazione per ottenere la frequenza di campionamento richiesta. Nominalmente si tratta di convertitori AD a 24 bit, nella realtà tenendo conto del rumore interno si riesce ad ottenere una risoluzione finale di circa 22 bit. La costante di trasduzione del sistema è pari a 1.907 $\mu\text{V}/\text{count}$.

I sensori sismometrici Le3D-5s sono velocimetri meccanici a trasduzione elettromagnetica il cui periodo proprio è traslato verso le basse frequenze utilizzando il metodo di Lippman o impedenza negativa [Lippman, 1983; Romeo & Braun, 2006, Romeo, 2012].

La frequenza propria del sismometro risulta di 0.2 Hz (pari a un periodo proprio di 5 s), la costante di trasduzione è 400 V/m/s. Ad alta frequenza la risposta del sensore non è più garantita al di sopra di 40 Hz.

La funzione di trasferimento del sismometro, indicata dalla ditta costruttrice, prevede tre zeri nell'origine e presenta tre poli nei punti:

$-0.888 / +0.888j$

$-0.888 / - 0.888j$

$-0.290 / \pm 0.000j$

La strumentazione utilizzata durante il monitoraggio delle Torri di Bologna è stata sottoposta ad “*Huddle test*” in modo da verificare che il comportamento degli apparati fosse comparabile.

Le stazioni sismiche sono state installate all'interno della sede dell'osservatorio sismologico di Arezzo.

I sismometri sono stati posizionati tutti con la stessa orientazione spaziali di circa 40 cm l'uno dall'altro in modo da essere ragionevolmente certi che il segnale di input fosse lo stesso per tutti i sensori (Fig. 3.2).

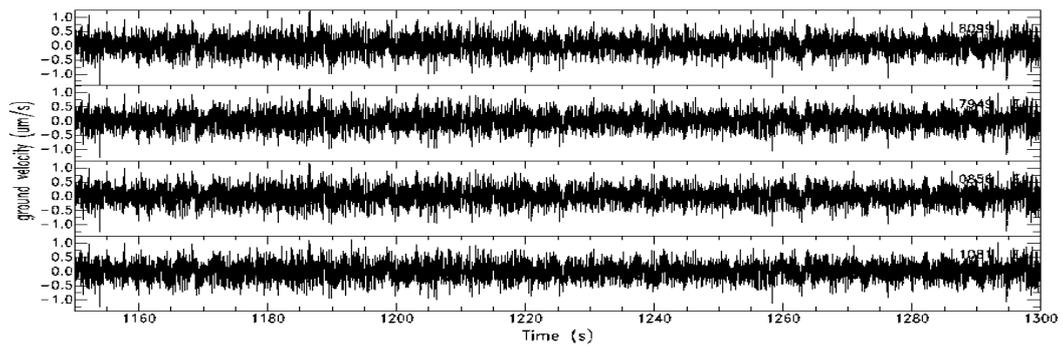


Figura 2.1 Il sistema di digitalizzazione e il sensore utilizzati nella stazione AS03.

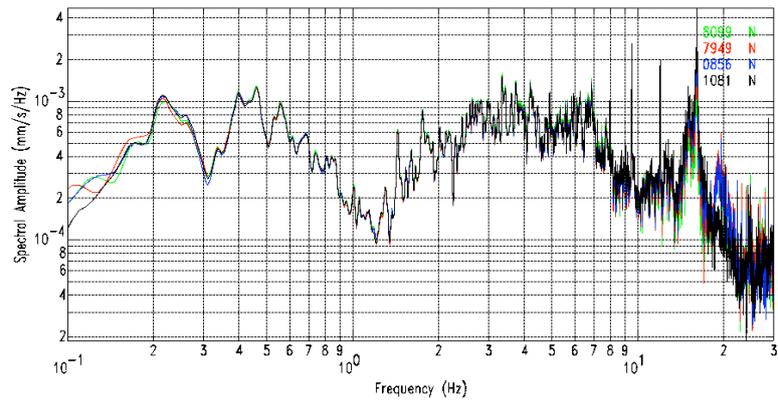


Figura 2.2 Stazioni sismiche durante l' “*Huddle test*” all'interno dell'Osservatorio Sismologico di Arezzo.

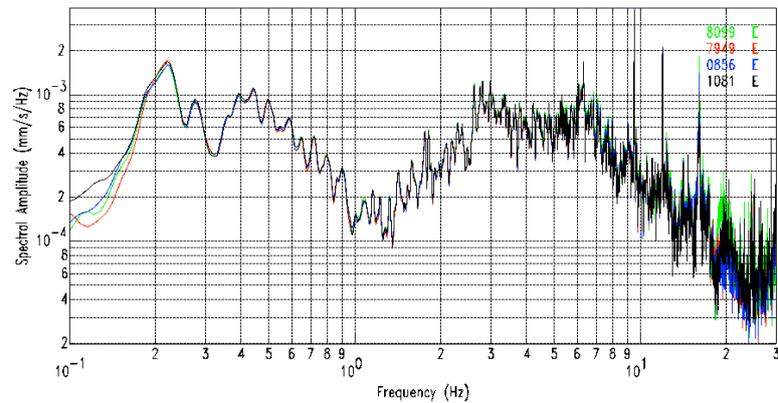
Essendo installate all'interno del fabbricato, le stazioni sismiche non sono state collegate al GPS. La sincronizzazione dei segnali è avvenuta in fase di elaborazione andando a individuare intervalli che mostravano transienti facilmente correlabili su tutte le stazioni sismiche.



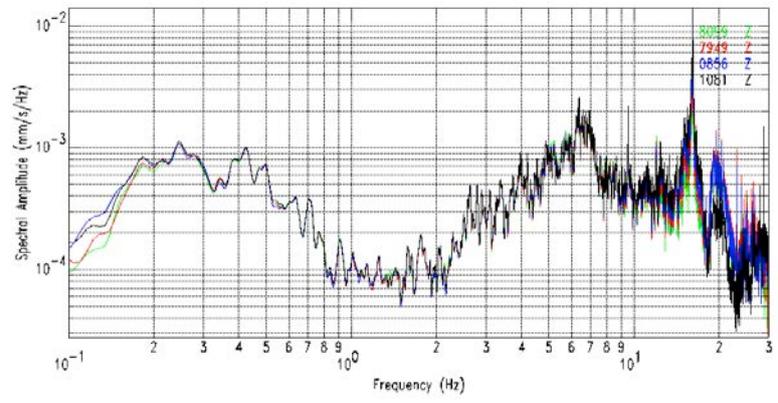
a)



b)



c)



d)

Figura 2.3 Huddle test per le stazioni installate nella Torre degli Asinelli: a) 150 s di registrazione di rumore sismico utilizzato per il calcolo della FFT. Confronto fra gli spettri di Fourier calcolati sugli intervalli di segnale in a): b) NS, c) EW, d) Z.

La Tab. 2.1 elenca gli strumenti sottoposti a test. Le figure 2.3 e 2.4 mostrano rispettivamente i risultati per le stazioni installate all'interno della Torre Asinelli e per quelle della Torre Garisenda.

Tabella 2.1

Stazione	Collocazione	DAS type	DAS SN	Sismometro	Sismometro SN
AS01	Asinelli sommità	Reftek 72A	8099	Lennartz 5s-3d	S375
AS02	Asinelli - 70 m	Reftek 72A	7949	Lennartz 5s-3d	0-282
AS03	Asinelli - 35 m	Reftek 72A	0856	Lennartz 5s-3d	A667
AS04	Asinelli base	Reftek 72A	1078	Lennartz 5s-3d	N0262
GA01	Garisenda sommità	Reftek 72A	1081	Lennartz 5s-3d	P314
GA02	Garisenda base	Reftek 72A	7398	Lennartz 5s-3d	W470

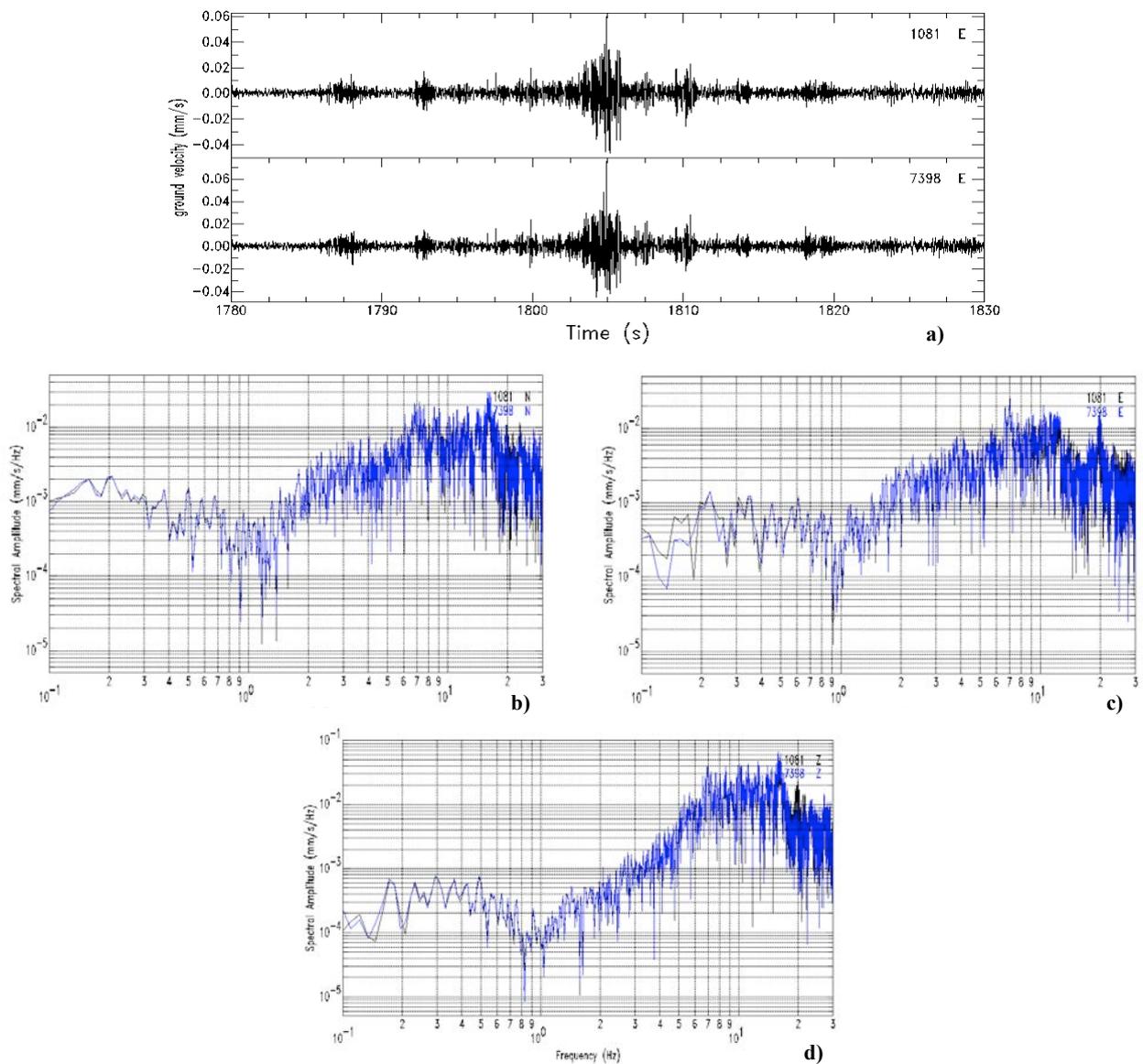


Figura 2.4 Huddle test per le stazioni installate nella Torre Garisenda: a) registrazione di rumore sismico utilizzato per il calcolo della FFT e dei rapporti spettrali HVSr. In basso confronto fra gli spettri di Fourier calcolati sugli intervalli di segnale in a), b) NS, c) EW, d) Z.

Alla luce di quanto osservato si può concludere che tutte le stazioni sismiche sottoposte a test presentano caratteristiche di risposta praticamente identiche nella banda di frequenze 0.2 – 20 Hz. In tale banda pertanto si confida che le misure effettuate nelle postazioni all'interno delle Torri siano effettivamente comparabili.

3. Descrizione dell'esperienza

Il monitoraggio sismico delle due torri ha comportato l'uso di sei stazioni sismiche equipaggiate con acquisitori digitali Reftek 72A (07 e 08) accoppiati a sensori sismometrici Lennartz Le3d5s (inizialmente la stazione installata alla base della Torre Asinelli utilizzava un sensore a larga banda Guralp CMG40T). Quattro delle sei sono state installate all'interno della Torre degli Asinelli (Fig. 3.1). Le stazioni sismiche sono state poste dal basamento (AS04), all'interno del negozio che occupa il portico, alla sommità (AS01) (89 m), Fig. 3.3a. Le due stazioni intermedie sono state installate rispettivamente alle quote 35 m (AS03) e 70 m (AS02), rispettivamente Fig. 3.3b e 3.3c-d, dove si trovano una piattaforma muraria che interrompe la scala lignea interna e una nicchia sulla parete in corrispondenza della finestra.

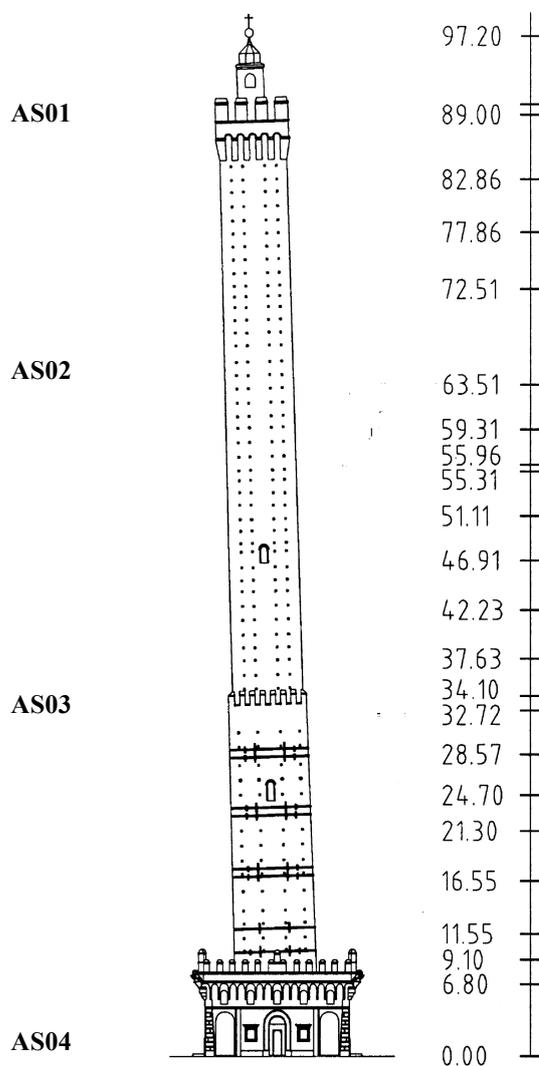


Figura 3.1 Vista frontale della Torre degli Asinelli, da Riva et al, [1998] (modificata). Le sigle indicano la posizione delle stazioni sismiche installate.

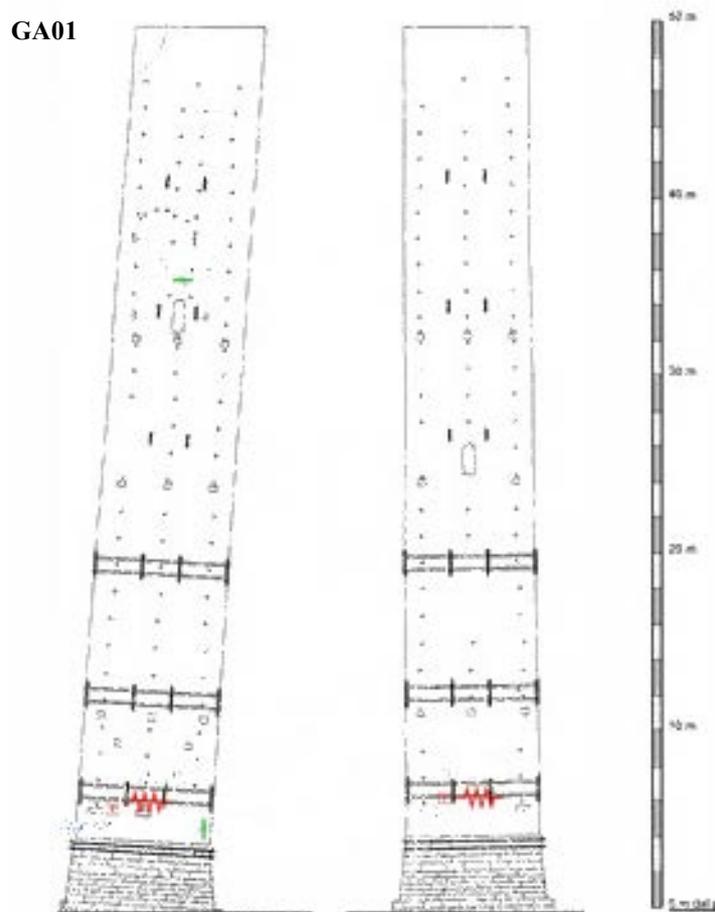


Figura 3.2 Prospetto della Torre Garisenda (a sinistra fronte Nord, a destra fronte Ovest), tratta da http://www.tecnoinmonitoraggi.it/cms_descrizione_sistema_monitoraggio.html (modificata). Le sigle a lato indicano la posizione delle stazioni sismiche installate.

La scelta dei siti di installazione nasce dalle considerazioni scaturite dall'analisi della pendenza della Torre. Dalle misurazioni effettuate dall'Università di Modena e Reggio Emilia nel 2009 risulta infatti che l'asse della torre appare costituito da una spezzata ottenuta con tre tronchi a diversa inclinazione i cui estremi si localizzano proprio alla quota di 35 m e 60 m [Bertacchini et al., 2010 e 2011; Capra et al., 2011; Castagnetti et al., 2011 e 2012; <http://www.comune.bologna.it/duetorri/servizi/146:10316/10417>].

La Garisenda è sostanzialmente una struttura vuota al cui interno è stata realizzata una scalinata metallica che consente di arrivare fino alla sua sommità. È pertanto estremamente difficoltoso trovare una nicchia o un basamento solidale alla struttura dove installare in posizione intermedia un sensore sismometrico. Al suo interno sono quindi state installate soltanto due stazioni sismiche, una alla sommità (GA01) l'altra al piano terra (GA02), posto a circa 2 m dal piano stradale, Figg. 3.2, 3.4.

L'installazione delle stazioni sismiche è avvenuta il 21-22 Giugno 2012, la disinstallazione il 17 Settembre 2012 (Tab. 3.1).

Le stazioni sismiche sono state disposte in modalità di acquisizione continua, a un passo di campionamento di 200 sps.

Tutte le stazioni sono state collegate a un sistema di temporizzazione esterna GPS. Il posizionamento delle antenne GPS ha presentato notevoli criticità, tali da impedire per alcuni periodi la sincronizzazione di alcune stazioni. In particolare, l'antenna GPS della stazione AS03 (quella posta alla quota di circa 70 metri sulla torre degli Asinelli) era inizialmente collocata in una posizione coperta che non consentiva la ricezione del segnale ma successivamente è stata spostata fino a trovare una idonea collocazione.

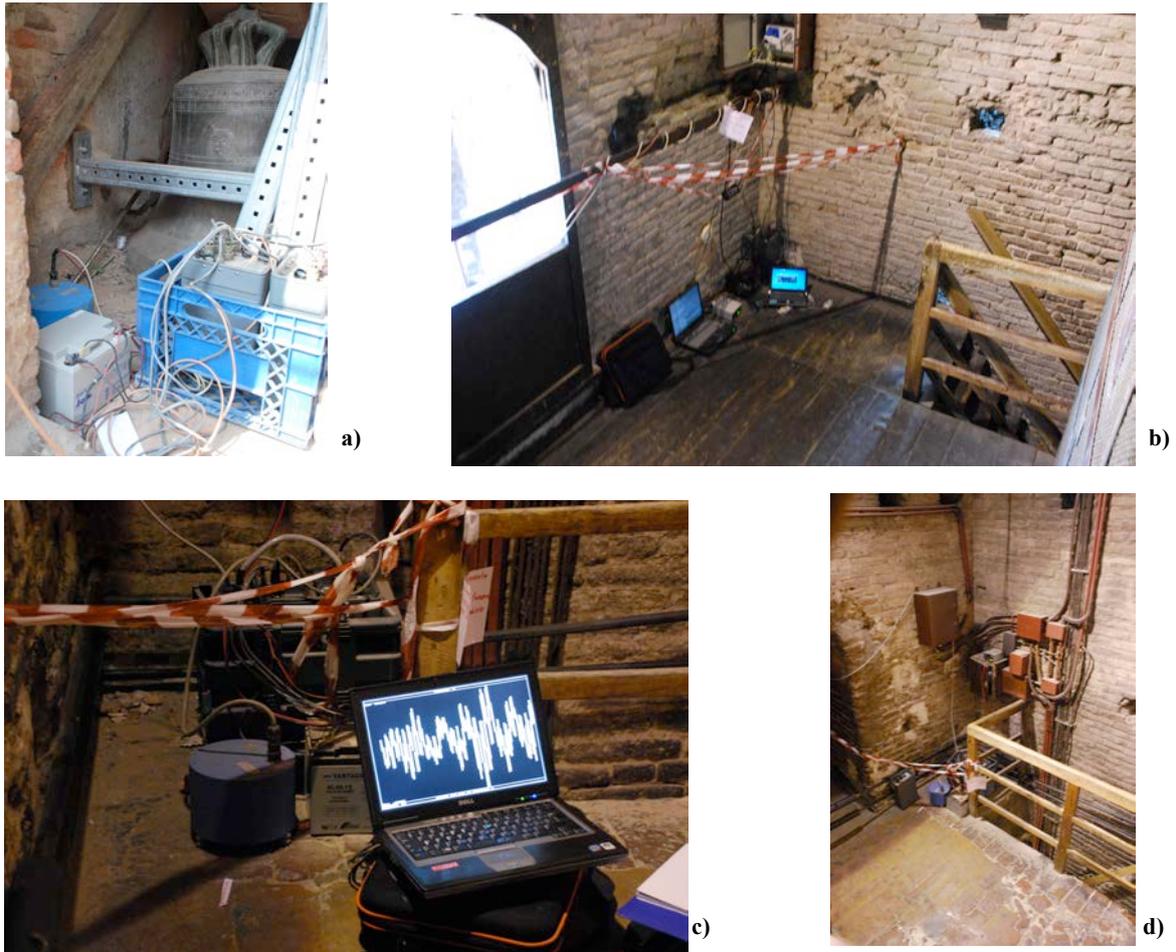


Figura 3.3 Immagini di alcune delle stazioni sismiche installate all'interno della Torre degli Asinelli, a) la stazione alla sommità, AS01, b) la stazione a 70 m (AS02), c) e d) a 35 m (AS03).

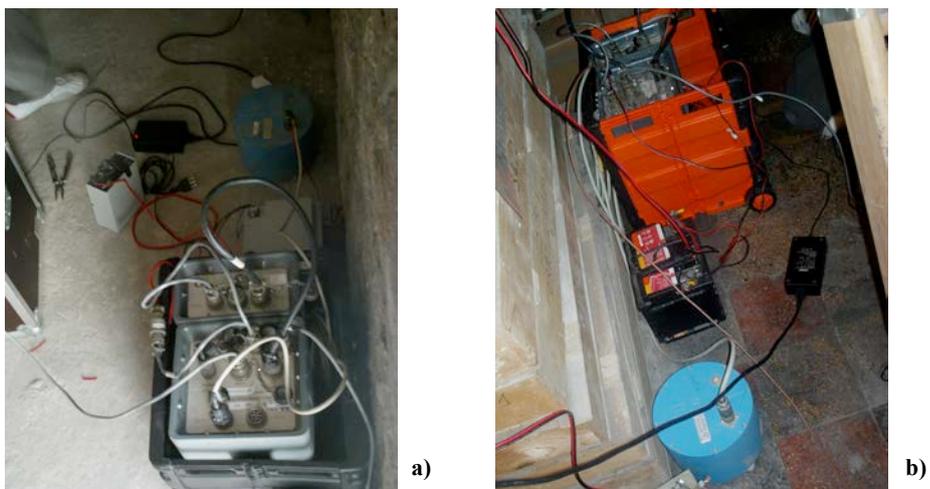


Figura 3.4 Le stazioni sismiche installate all'interno della Torre Garisenda, a) la stazione alla sommità (GA01), b) la stazione al basamento (GA02).

La Tab. 3.1 mostra in blu i periodi di funzionamento delle stazioni sismiche, in rosso quelli di interruzione dell'acquisizione per problemi tecnici temporanei.

I giorni indicati in bianco indicano assenza di dati, quelli in rosso corrispondono ai dati sicuramente non sincronizzati, quelli blu sono i dati disponibili e sincronizzati, anche se la valutazione del livello qualitativo della sincronizzazione rientra nelle azioni da compiere in futuro per poter utilizzare i dati per modellare la propagazione dell'oscillazione lungo la torre.

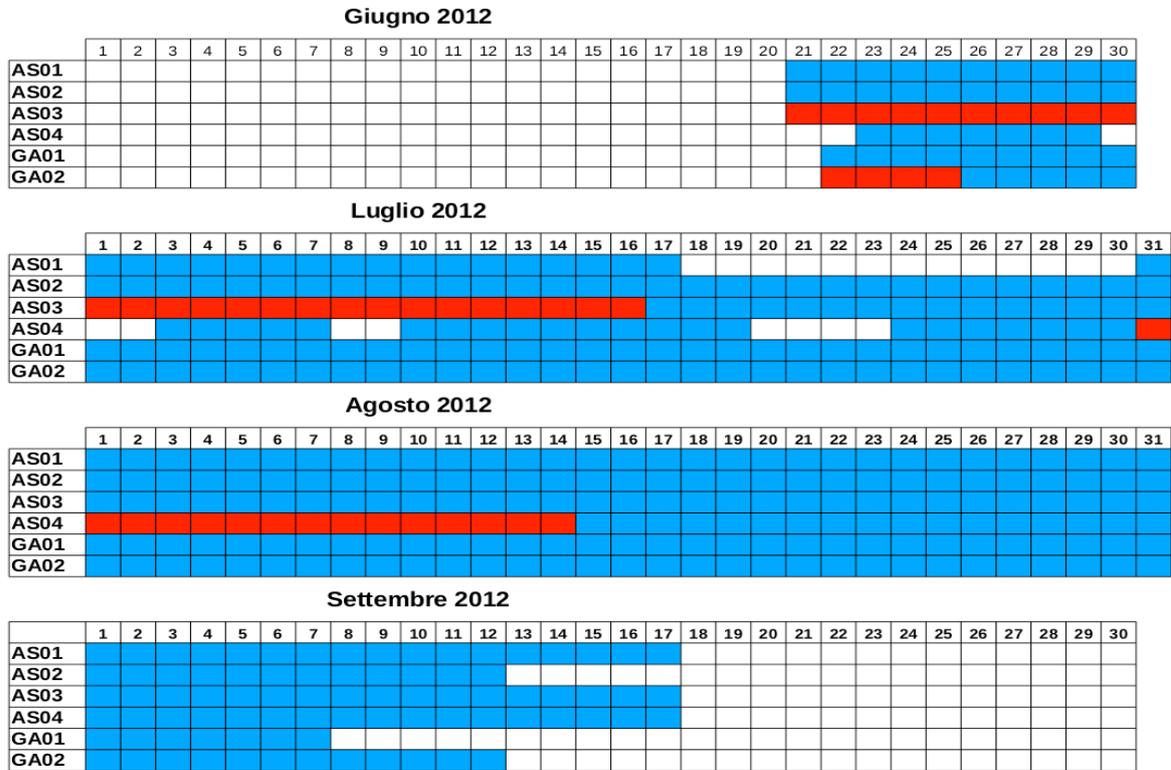


Tabella 3.1 Periodi di funzionamento delle stazioni sismiche, in blu i dati disponibili e sincronizzati, in rosso dati con problemi di sincronizzazione, in bianco periodi di assenza di dati.

I sensori sono stati orientati secondo il Nord magnetico piuttosto che secondo gli assi delle Torri, in modo da poter confrontare direttamente i segnali registrati sulle due Torri. È ovviamente possibile, conoscendo la posizione dei sensori, correggere l'orientazione lungo l'asse principale della torre, se si ritenesse necessario usare questo riferimento piuttosto che quello geografico.

4. Analisi dei dati e primi risultati

4.1 Analisi delle serie temporali

Durante il periodo di esecuzione dell'esperimento era in atto la sequenza sismica dell'Emilia Romagna, iniziata il 20 Maggio 2012 con il luttuoso evento di magnitudo M_L 5.9, seguito a distanza di qualche giorno, il 29 Maggio, da un magnitudo M_L pari a 5.8. L'idea era quella di poter utilizzare sismogrammi degli eventi di maggior magnitudo registrati sulle Torri, in modo da analizzare la loro risposta al passaggio di un'onda sismica prodotta da un evento a distanza ravvicinata. Durante il periodo di funzionamento delle stazioni sismiche in un'area di raggio 50 km intorno a Bologna sono stati registrati 7 eventi sismici di magnitudo maggiore o uguale a 3.0, la massima magnitudo registrata nell'intero periodo è stata pari a 3.2 (Database ISIDE, INGV 2010). L'ampiezza del rumore sismico ambientale all'interno del centro storico di Bologna è risultata essere troppo elevata per distinguere nella forma d'onda lo scuotimento del terreno prodotto da tali eventi. Ci si è quindi concentrati sull'analisi del rumore sismico ambientale, cioè del tremore indotto da agenti naturali e antropici.

Già in fase di installazione, in particolare sulle componenti orizzontali delle stazioni sommitali, è stato possibile osservare che sulle forme d'onda era evidente la presenza di un segnale quasi monocromatico a una frequenza che si presentava in ottimo accordo con quella che le modellazioni ingegneristiche individuano come la frequenza principale di oscillazione delle due torri [Dallavalle e Trombetti personal communication], pari a circa 0.3 Hz per la torre degli Asinelli e circa 0.7 Hz per la Garisenda (Fig. 4.1).

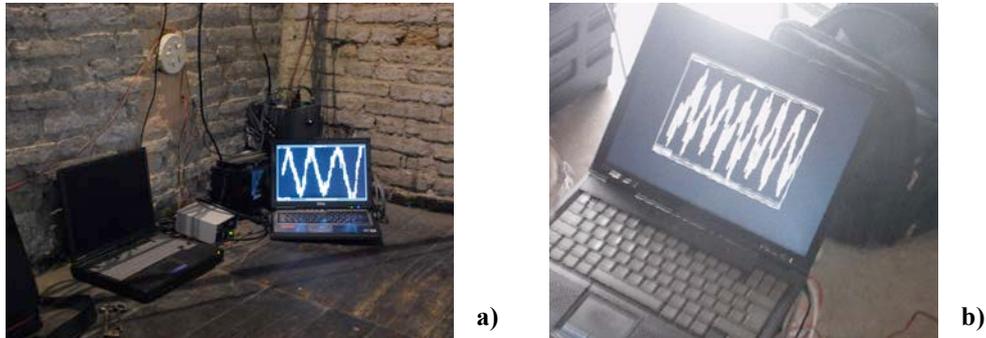


Figura 4.1 Visualizzazione delle forme d'onda durante la fase di controllo delle stazioni sismiche, a) Torre degli Asinelli, b) Torre Garisenda. È chiaramente visibile la frequenza di risonanza principale delle due torri, la schermata sul monitor corrisponde a 10 s di registrazione.

L'analisi della registrazione dei segnali ha confermato quanto osservato sul campo. Le componenti orizzontali delle stazioni poste all'interno delle Torri, mostrano una continua oscillazione sulle frequenze aspettate, la cui ampiezza varia nel tempo.

L'oscillazione è evidente anche sulle componenti verticali appena il segnale è filtrato in una banda di frequenze centrata sulla frequenza propria di oscillazione aspettata (0.1 – 0.5 Hz per la Torre degli Asinelli, 0.5 – 0.9 Hz per la Garisenda). L'ampiezza del segnale sulle componenti verticali è di almeno due ordini di grandezza minore di quella orizzontale (Figg. 4.2 e 4.3).

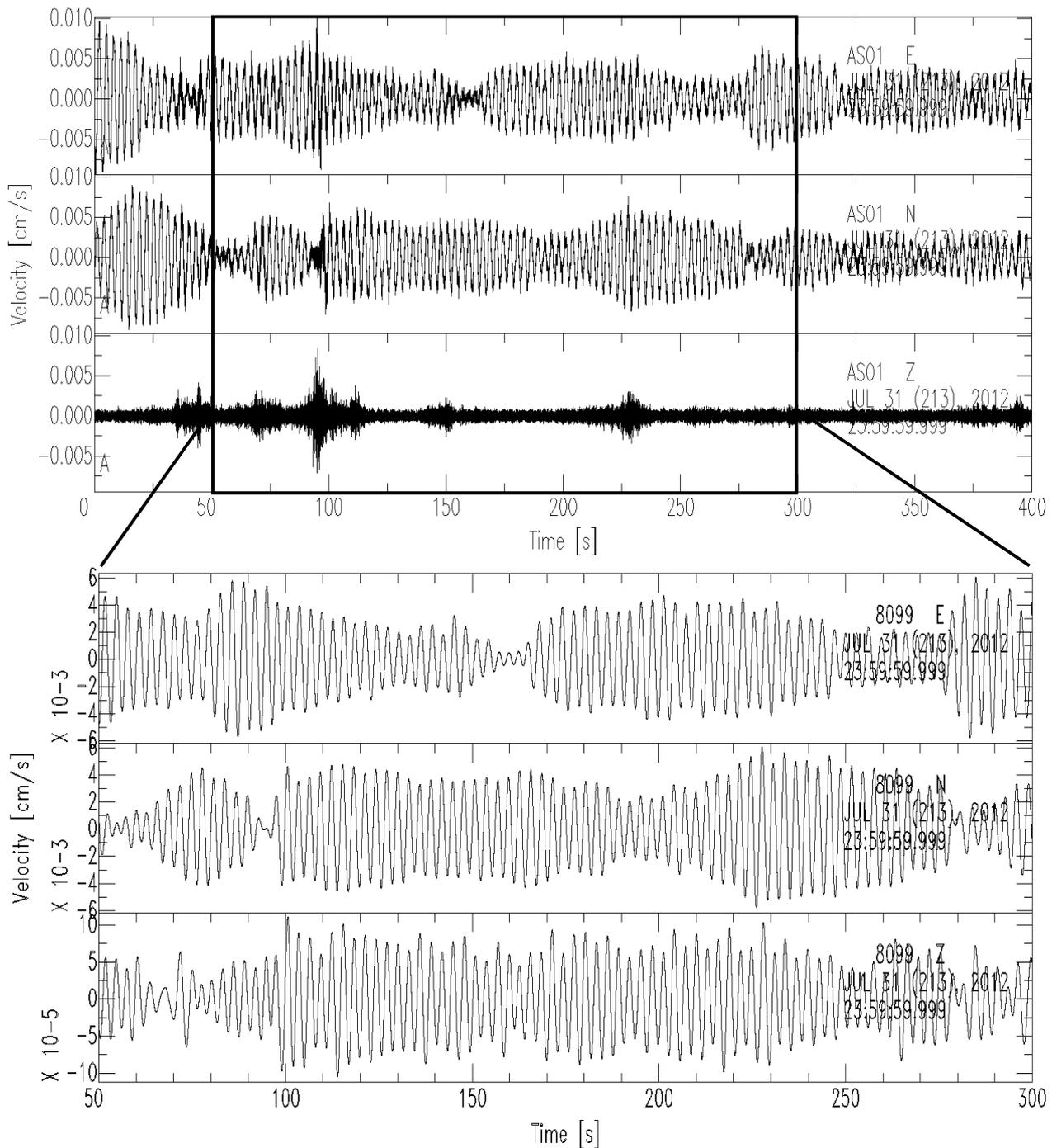


Figura 4.2 Traccia registrata dalla stazione sismica installata sulla sommità della Torre degli Asinelli. In basso, il segnale, filtrato nella banda 0.1 – 0.5 Hz, mostra chiaramente l’evidenza dell’oscillazione anche sulla componente verticale, che presenta una ampiezza di almeno due ordini di grandezza minore delle orizzontali.

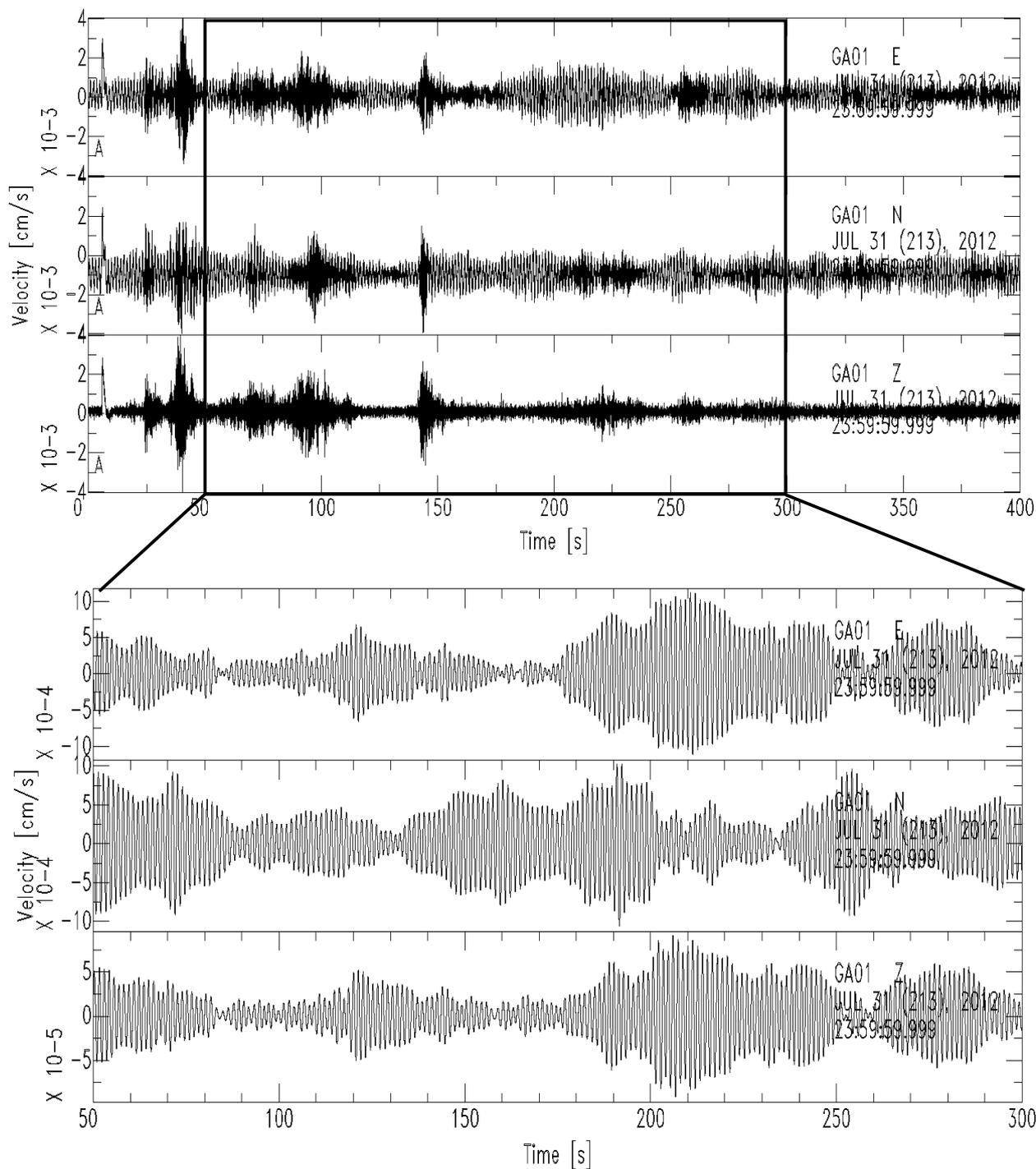


Figura 4.3 Traccia registrata dalla stazione sismica installata sulla sommità della Torre Garisenda, in basso il segnale, filtrato nella banda 0.5 – 0.9 Hz, mostra chiaramente l’evidenza dell’oscillazione anche sulla componente verticale, che presenta una ampiezza di circa un ordine di grandezza minore delle orizzontali.

La visualizzazione delle forme d'onda su tutta la durata del periodo di monitoraggio ha consentito di individuare alcune peculiarità nel comportamento delle Torri, che sembrerebbero evidenziare una possibile correlazione fra l'attività antropica circostante e la variazione del livello di rumorosità delle stazioni sismiche installate all'interno.

Da un punto di vista qualitativo, lasciando l'approfondimento a uno specifico lavoro successivo, si può osservare che, prendendo a riferimento la stazione di sommità della Torre degli Asinelli, quella che, almeno in linea di principio, dovrebbe essere la meno sensibile all'attività antropica che si svolge in superficie, sembra essere abbastanza evidente una sorta di regolarità settimanale nell'andamento delle registrazioni. La porzione ad alta frequenza del segnale ($F > 1$ Hz) mostra infatti una marcata regolarità giornaliera (Fig. 4.4): l'ampiezza del segnale comincia generalmente a crescere intorno alle prime ore della mattina (all'incirca intorno alle 5, ora locale) per mantenersi praticamente costante fino alla sera (intorno alle 21, ora locale), quando comunque rimane la presenza di numerosi transienti fino a notte fonda (all'incirca intorno all'una di notte). Sembrerebbe quindi abbastanza plausibile l'esistenza di una correlazione dell'andamento del rumore con la presenza di attività antropica nei dintorni della Torre.

Una osservazione interessante che potrebbe fornire indizi utili per la identificazione delle sorgenti di rumore che induce l'oscillazione ad alta frequenza, proviene dal confronto delle forme d'onda registrate durante giorni feriali e durante quelli festivi o il fine settimana (Fig. 4.4). In tali giorni è infatti chiarissimo un andamento giornaliero tipico che vede l'ampiezza del rumore sismico ridursi di intensità rispetto ai giorni feriali fino alle 10 della mattina e dopo le 18. Le forme d'onda registrate durante i giorni festivi e il fine settimana mettono in evidenza la presenza di un andamento che induce marcate oscillazioni sul piano orizzontale e che si mantiene praticamente costante per la parte centrale della giornata.

Considerazioni analoghe a quelle fatte per la Torre degli Asinelli si possono fare per la Garisenda. La Fig. 4.5 mostra in maniera abbastanza evidente come anche in questo caso sia possibile riconoscere una regolarità giornaliera e settimanale negli andamenti delle forme d'onda. Ciò sembrerebbe confermare l'ipotesi di una influenza dell'effetto del rumore antropico sull'oscillazione delle Torri, che andrà approfondita e meglio chiarita da un punto di vista quantitativo. In particolare è possibile notare che le forme d'onda registrate su entrambi le Torri nei giorni feriali mostrano una notevole somiglianza, mentre diverso è per le registrazioni effettuate durante i giorni festivi. A differenza di quanto osservato finora, la differenza individuata sembrerebbe indicare che in questo caso l'andamento evidenziato sia legato a qualche causa specifica che ha sede all'interno della Torre degli Asinelli e non produce effetti sulla torre adiacente, non è da escludere che l'effetto sia dovuto proprio alla presenza dei visitatori che sono ammessi solo sulla Torre degli Asinelli fra le 9 e le 18 in orario estivo e durante il periodo di monitoraggio solo nel fine settimana.

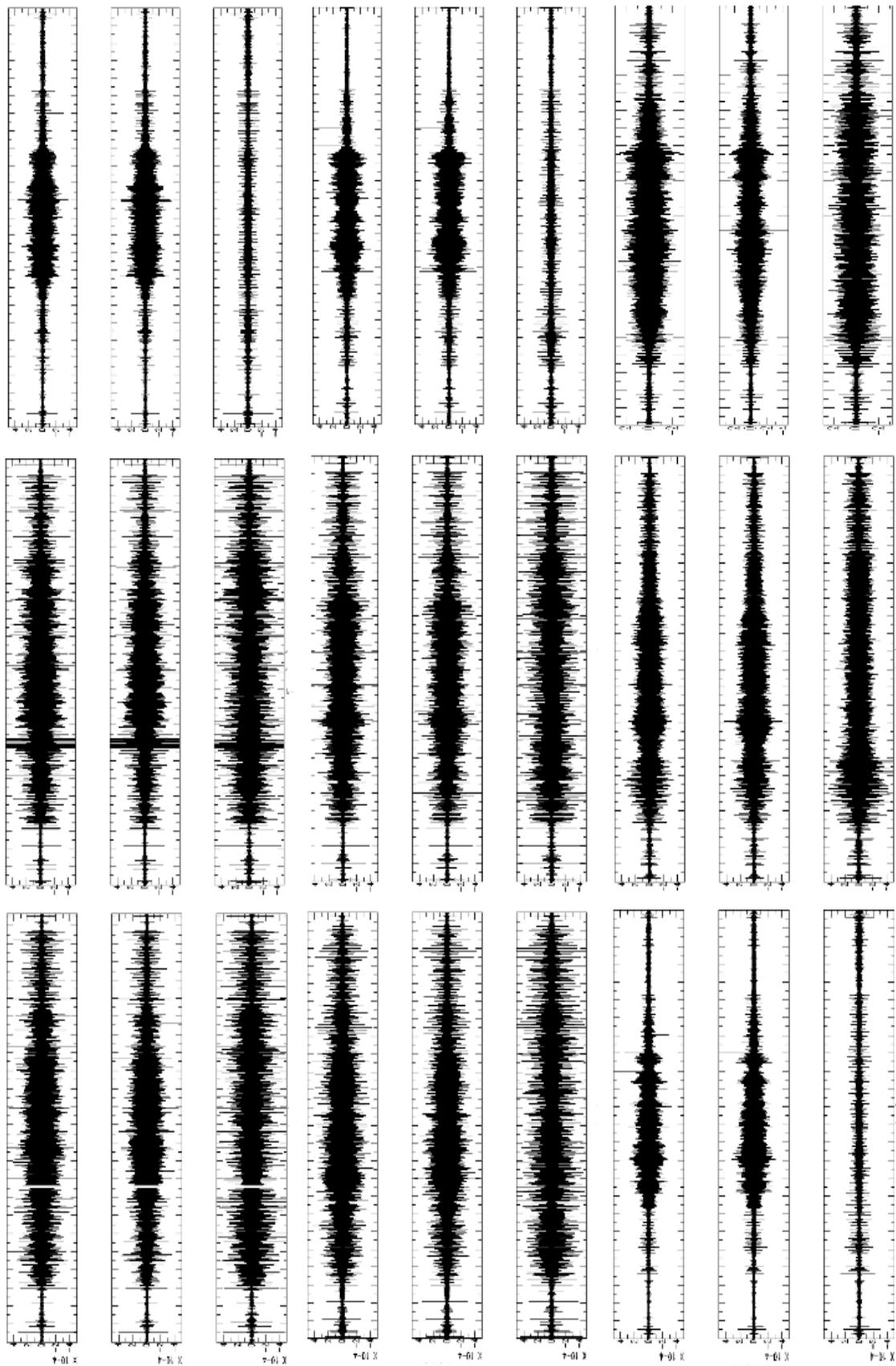


Figura 4.4 Esempi di Andamento giornaliero del rumore sismico ambientale registrato dalla stazione sommitale della Torre degli Asinelli. Il segnale è stato filtrato per evidenziare il contenuto al di sopra di 1 Hz. Ogni tema di forme d'onda mostra le tre componenti del moto (dal basso verso l'alto Verticale, NS, EW). Gli andamenti sono relativi al periodo 13/8/2012 (Lunedì), in alto a sinistra, al 21/8/2012 (Martedì), in basso a destra.

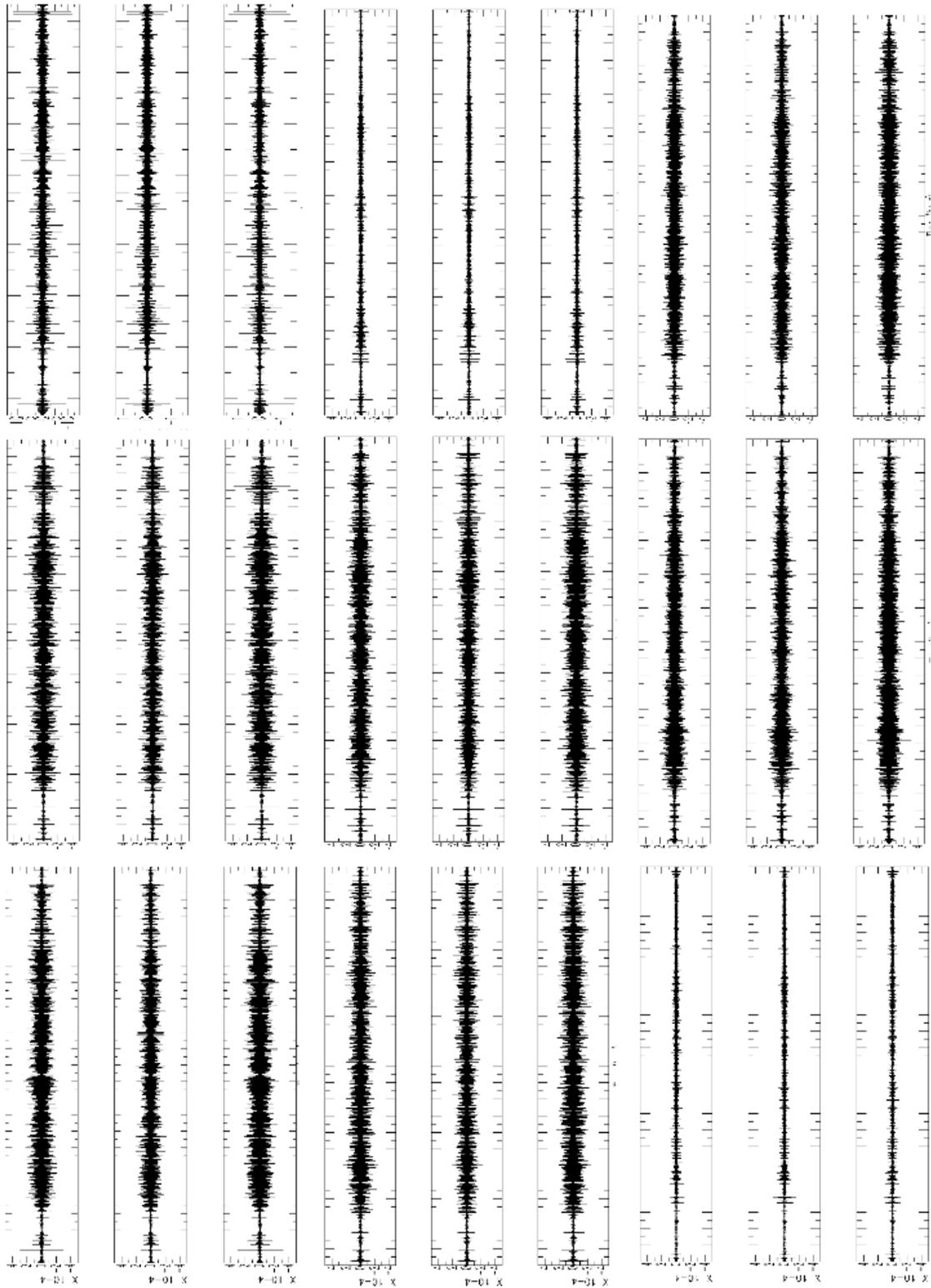


Figura 4.5 Esempi di Andamento giornaliero del rumore sismico ambientale registrato dalla stazione sommitale della Torre arisenda. Il segnale è stato filtrato per evidenziare il contenuto al di sopra di 1 Hz. Ogni terna di forme d'onda mostra le tre componenti del moto (dal basso verso l'alto Verticale, NS, EW). Gli andamenti sono relativi al periodo 13/8/2012 (Lunedì), in alto a sinistra, al 21/8/2012 (Martedì), in basso a destra.

La Fig. 4.6 mostra alcuni esempi di andamenti giornalieri registrati nella banda di frequenza al di sotto di 1 Hz. Pur senza una assoluta regolarità giornaliera, è comunque possibile riscontrare come l'ampiezza del segnale mostri i valori più elevati nella seconda parte della giornata, anche quando il livello di rumore nelle ore centrali mostra un incremento probabilmente correlato all'attività antropica nei dintorni della Torre. Una intrigante correlazione che sarà più approfonditamente trattata, è quella legata a un possibile effetto di rilascio termico dovuto al riscaldamento giornaliero delle Torri che potrebbe influire sull'oscillazione.

Giusto a titolo di indicazione qualitativa si può cercare di correlare visivamente l'andamento giornaliero dell'oscillazione a bassa frequenza con le serie temporali della temperatura misurata all'interno della Torre degli Asinelli. I sensori posti all'interno della Torre alla quota di 10 m campionano la temperatura ogni 15 minuti, la descrizione del sistema di monitoraggio delle Torri è disponibile al sito http://www.tecnoinmonitoraggi.it/cms_descrizione_sistema_monitoraggio.html, le serie temporali sono disponibili in rete sul sito http://www.tecnoinmonitoraggi.it/cms_dati.htm.

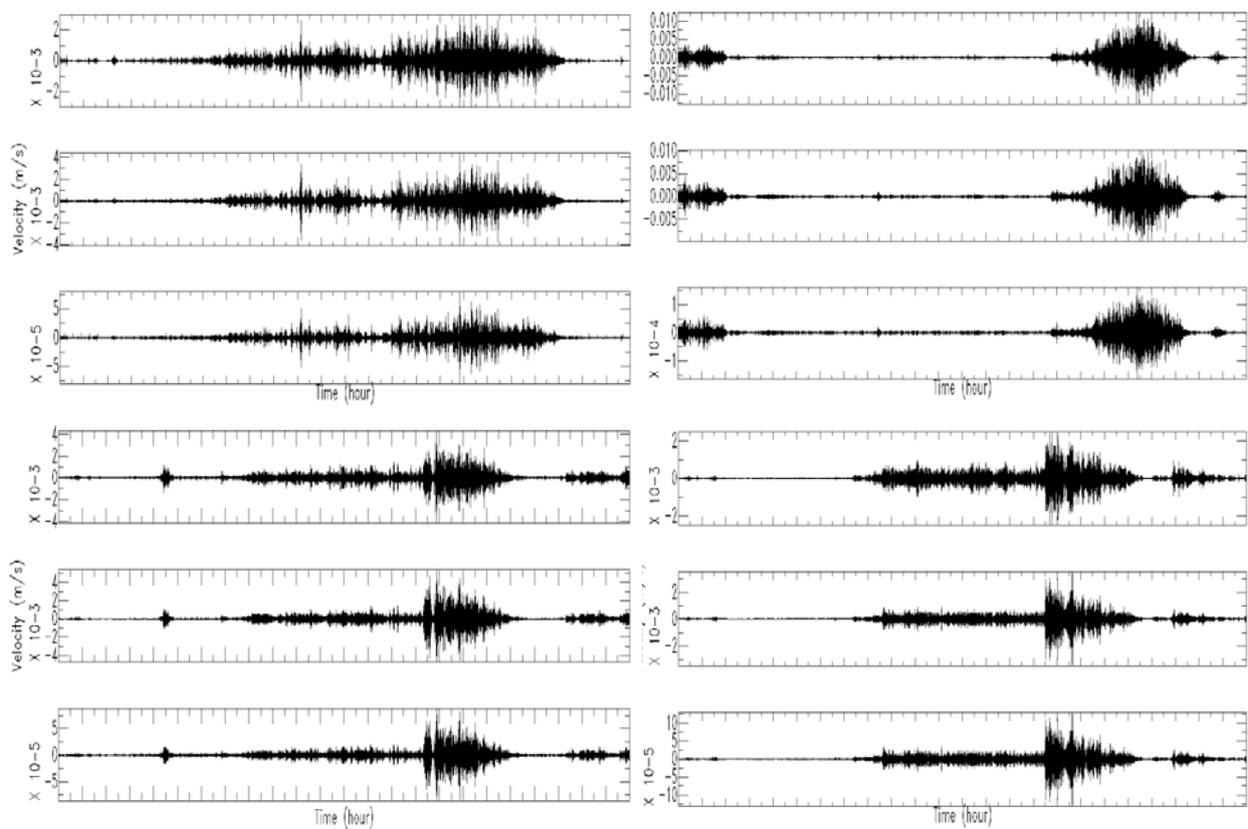


Figura 4.6 Esempi di andamento giornaliero del rumore sismico ambientale registrato dalla stazione sommitale della Torre degli Asinelli. Il segnale è stato filtrato per evidenziare il contenuto al di sotto di 1 Hz. In ogni riquadro l'ordine delle componenti dal basso verso l'alto è Verticale, Nord-Sud, Est-Ovest. a 27/6/2012; b 10/7/2012; c 7/8/2012; d 15/8/2012.

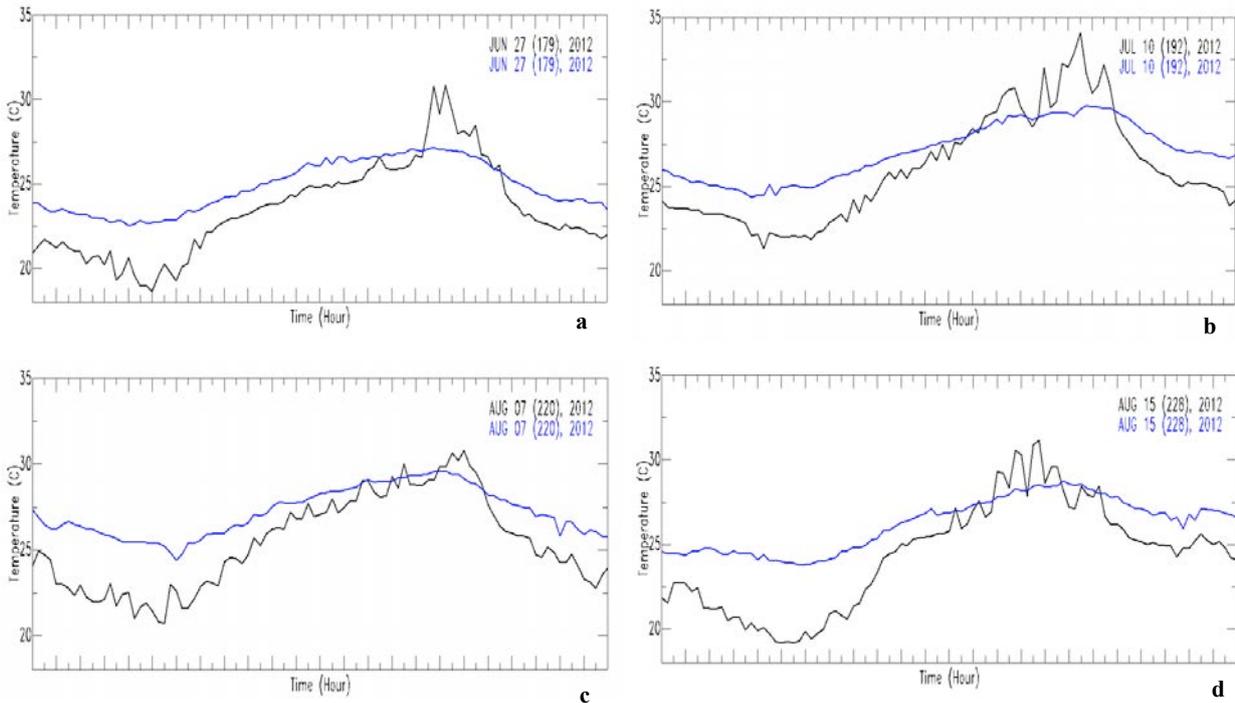


Figura 4.7 Andamento giornaliero della temperatura misurata dai due sensori posti all'interno della Torre degli Asinelli negli stessi giorni di Fig. 4.5 a 27/6/2012; b 10/7/2012; c 7/8/2012; d 15/8/2012. La curva nera è relativa al sensore T1, quella blu al T2.

Le figure 4.7 mostrano la variazione oraria della temperatura nei giorni corrispondenti ai sismogrammi della Fig. 4.6. Le Figg. 4.8 (a e b) mostrano la sovrapposizione degli andamenti temporali della temperatura all'involuppo del segnale a bassa frequenza ($f < 1$ Hz). Anche tenendo conto del fatto che il campione non può essere considerato completamente rappresentativo, almeno da un punto di vista qualitativo non sembrerebbe potersi del tutto escludere che un effetto termico possa influenzare l'oscillazione delle Torri. Tali tipi di effetti sono ad esempio riportati in letteratura in Froli & Ulivieri, [2001 e 2006] e Froli & Formichi, [2002].

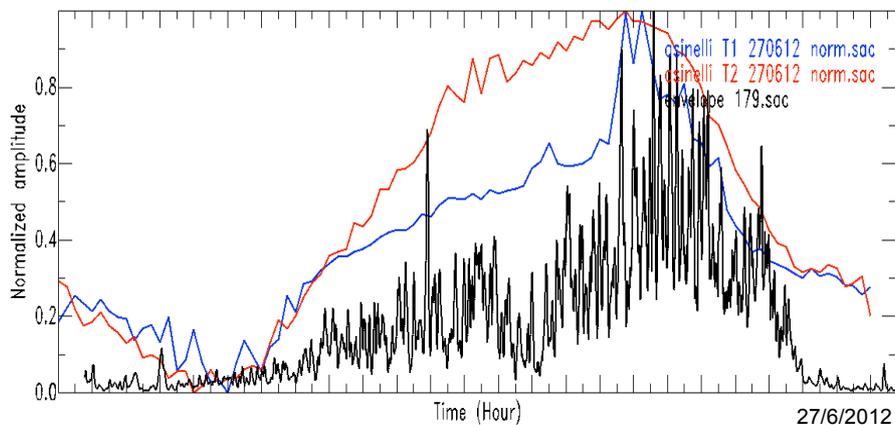


Figura 4.8a Andamento giornaliero della temperatura misurata nella Torre degli Asinelli (blu, T1; rosso T2) e involuppo a bassa frequenza, < 1 Hz, (curva nera) della forma d'onda di una componente orizzontale dalla stazione sommitale.

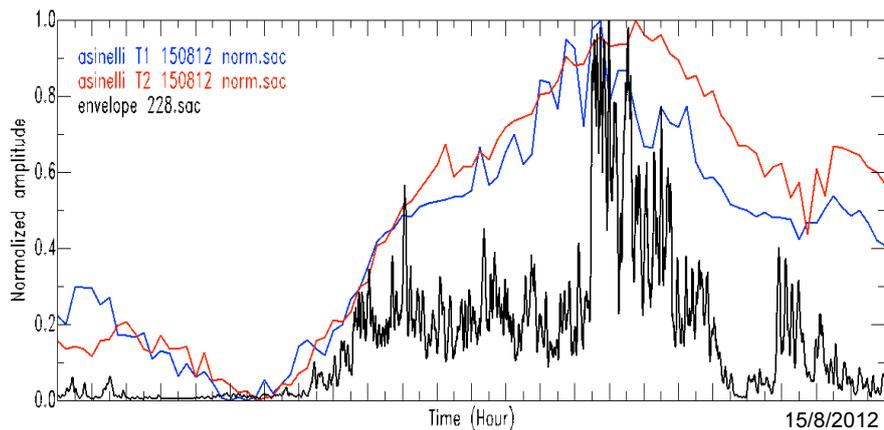


Figura 4.8b Andamento giornaliero della temperatura misurata nella Torre degli Asinelli (blu, T1; rosso T2) e involuppo a bassa frequenza, < 1 Hz, (curva nera) della forma d'onda di una componente orizzontale dalla stazione sommitale.

Più promettente sembra il confronto fra l'andamento giornaliero a bassa frequenza e la velocità del vento. Al pari della temperatura, la velocità e la direzione del vento vengono registrate ogni 15 minuti attraverso due gonioanemometri posti sulla sommità delle due Torri; alla data del presente rapporto sono disponibili in rete solo i dati relativi al gonioanemometro posto sulla Garisenda, che sono stati utilizzati per il confronto con i sismogrammi registrati dalla stazione sommitale degli Asinelli e della Garisenda.

Le Figg. 4.9 (a,b), per gli stessi giorni di Figg. 4.8 (a,b), mostrano il confronto fra l'involuppo a bassa frequenza del rumore sismico ambientale registrato alla stazione sommitale della Torre degli Asinelli e la variazione della velocità del vento.

In questo caso sembrerebbe abbastanza più evidente un accordo fra l'oscillazione a bassa frequenza e la variazione della velocità del vento nell'arco della giornata.

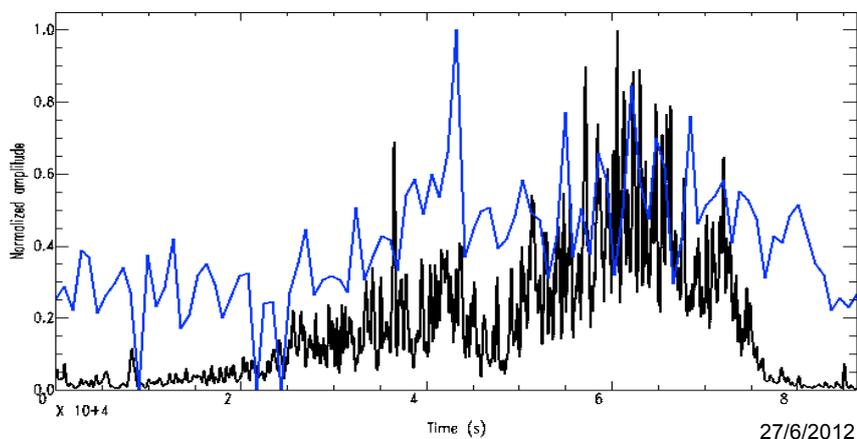


Figura 4.9a Esempio di confronto fra l'andamento giornaliero della velocità del vento misurata sulla sommità della Garisenda (blu) e l'involuppo a bassa frequenza, al di sotto di 1 Hz, (curva nera) della forma d'onda registrata da una delle due componenti orizzontali dalla stazione sommitale della Torre degli Asinelli (AS01).

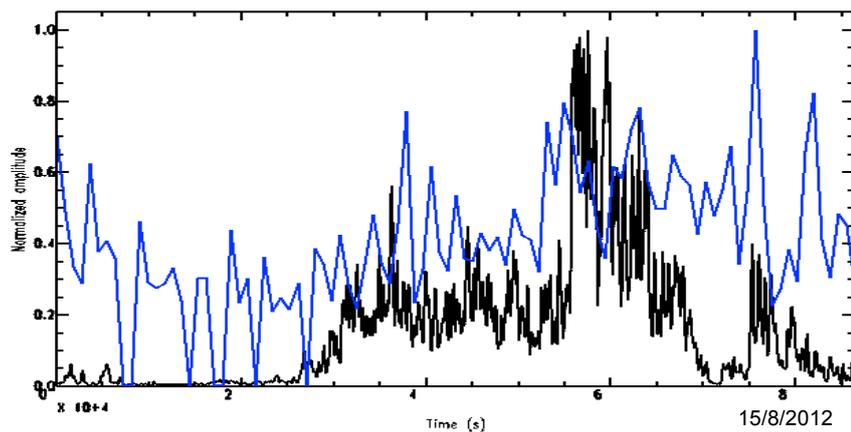


Figura 4.9b Esempi di confronto fra l'andamento giornaliero della velocità del vento misurata sulla sommità della Garisenda (blu) e l'involuppo a bassa frequenza, al di sotto di 1 Hz, (curva nera) della forma d'onda registrata da una delle due componenti orizzontali dalla stazione sommitale della Torre degli Asinelli (AS01). a 27/6/2012; b 15/8/2012.

Considerazioni analoghe a quanto fatto finora possono essere espresse per la Torre Garisenda. La Fig. 4.10 mostra un esempio del confronto fra l'andamento della velocità del vento e l'involuppo a bassa frequenza dell'andamento giornalieri registrato dalla stazione di sommità.

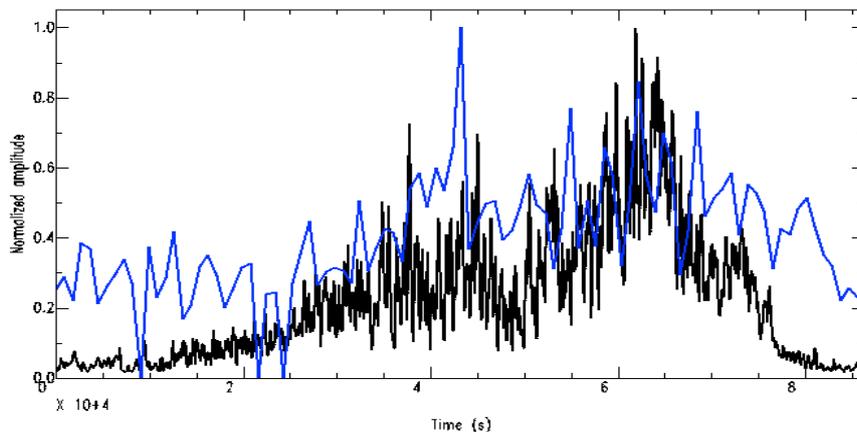


Figura 4.10 Esempio di confronto fra l'andamento giornaliero della velocità del vento misurata sulla sommità della Garisenda (blu) e l'involuppo a bassa frequenza, al di sotto di 1 Hz, (curva nera) della forma d'onda registrata da una delle due componenti orizzontali dalla stazione sommitale della Torre Garisenda (GA01). La registrazione è relativa al giorno 27/6/2012.

In Fig. 4.11 sono mostrati gli andamenti giornalieri del rumore sismico a bassa frequenza (< 1.0 Hz) registrati dalla stazione di sommità della Garisenda negli stessi giorni della Fig. 4.6.

Le Figg. 4.6 e 4.11 mettono in evidenza che, per quanto riguarda il contenuto a bassa frequenza, l'aspetto complessivo dell'andamento del rumore sismico rimane sostanzialmente lo stesso per entrambe le Torri. Ciò sembrerebbe avvalorare l'ipotesi che il meccanismo che regola la variazione dell'ampiezza dell'oscillazione a bassa frequenza è comune ed esterno a entrambe le Torri.

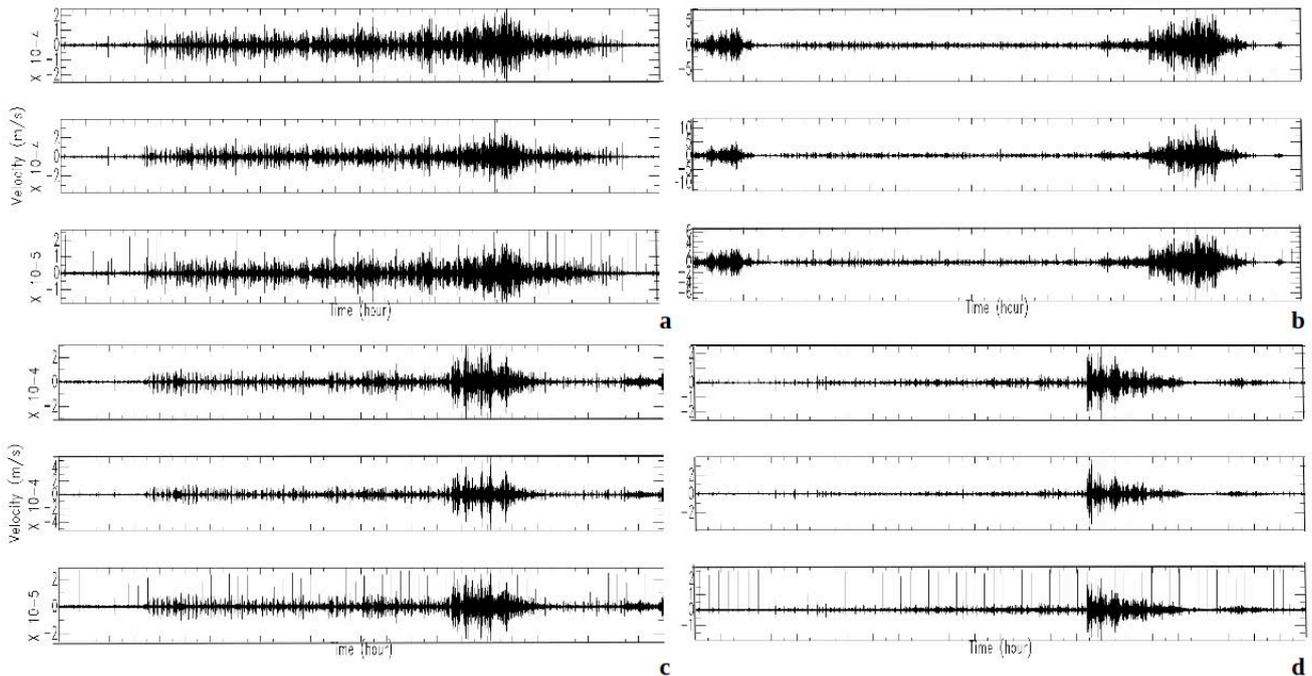


Figura 4.11 Andamento giornaliero del rumore sismico registrato dalla stazione sommitale della Torre Garisenda. Il segnale è stato filtrato per evidenziare il contenuto al di sotto di 1 Hz. In ogni riquadro l'ordine delle componenti dal basso verso l'alto è Verticale, N-S, E-O. a 27/6/2012; b 10/7/2012; c 7/8/2012; d 15/8/2012.

L'ampiezza del segnale registrato sulle componenti orizzontali alla sommità delle Torri, tranne che in poche occasioni, non ha mai superato in media un'accelerazione di 0.005 g sulla Torre degli Asinelli e di 0.002 g per la Garisenda. In spostamento ciò significa oscillazioni orizzontali di ampiezza fino a qualche mm per la Torre degli Asinelli e non superiore a 0.2 mm sulla Garisenda.

L'oscillazione delle Torri è caratterizzata da diversi modi di vibrazione, (è possibile visualizzarli in <http://www.comune.bologna.it/duetorri/contenuti/146:10598/>) che si manifestano in maniera diversa sulle due componenti orizzontali. La fig. 4.12 illustra un suggestivo esempio di *particle motion* delle componenti orizzontali registrate dalla stazione di sommità della Torre degli Asinelli che illustra il risultato spaziale dell'oscillazione del primo modo vibrazionale.

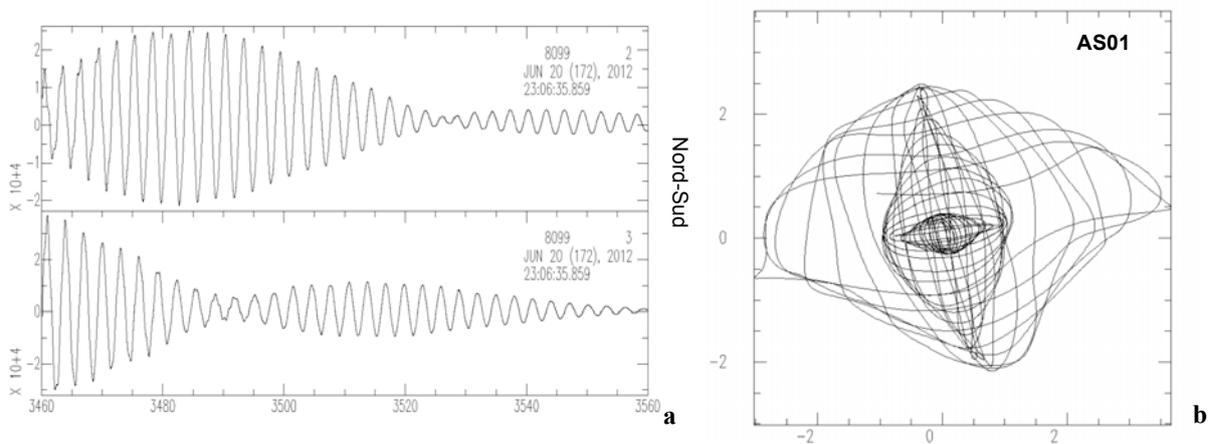


Figura 4.12 *Particle motion* della componente a bassa frequenza dell'oscillazione orizzontale sulla sommità della Torre degli Asinelli, a in alto componente NS, in basso EW del moto – b composizione vettoriale nel piano NS-EW

Diverso è invece il modo di vibrare della Torre Garisenda che, probabilmente a causa della sua altezza ridotta e a una differente modalità costruttiva, mostra una minore complessità del movimento che si ottiene dalla composizione vettoriale delle oscillazioni orizzontali alla sommità. L'esempio di *particle motion* in Fig. 4.13 sembrerebbe indicare che l'asse di oscillazione, che pure cambia nel corso del moto, mostra comunque una tendenza a mantenersi lineare.

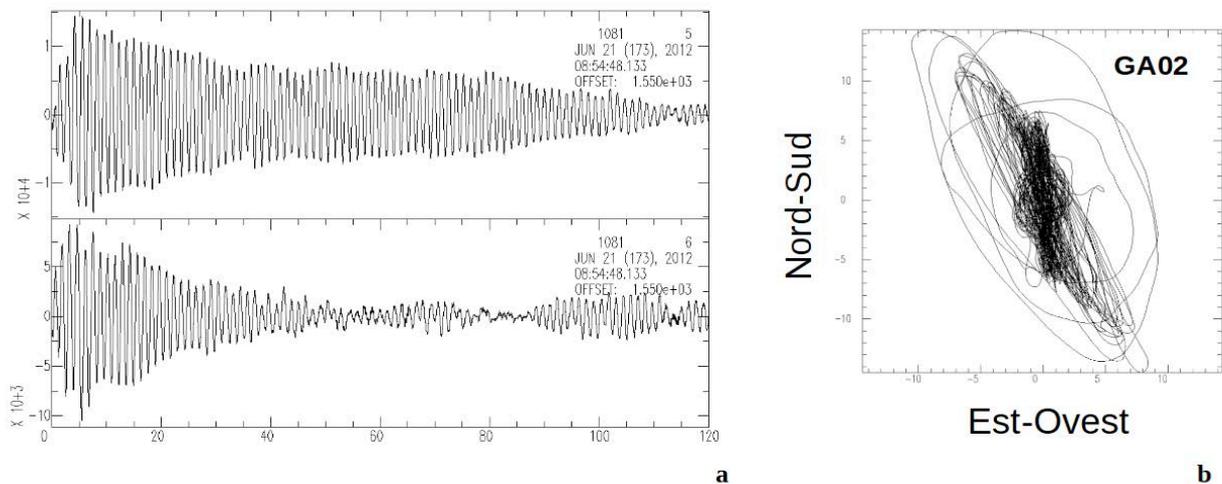


Figura 4.13 *Particle motion* della componente a bassa frequenza dell'oscillazione orizzontale sulla sommità della Garisenda, a in alto componente NS, in basso EW del moto orizzontale – b composizione vettoriale nel piano NS-EW

Una particolare attenzione è stata rivolta ad alcuni transienti che si individuano senza una precisa regolarità su tutte le stazioni installate in entrambe le Torri e durante tutto il periodo di monitoraggio. In particolare, sulla Torre degli Asinelli si riscontra la presenza di un segnale che si propaga rapidamente al suo interno (Fig. 4.14) [vedi anche Azzara et al, 2014].

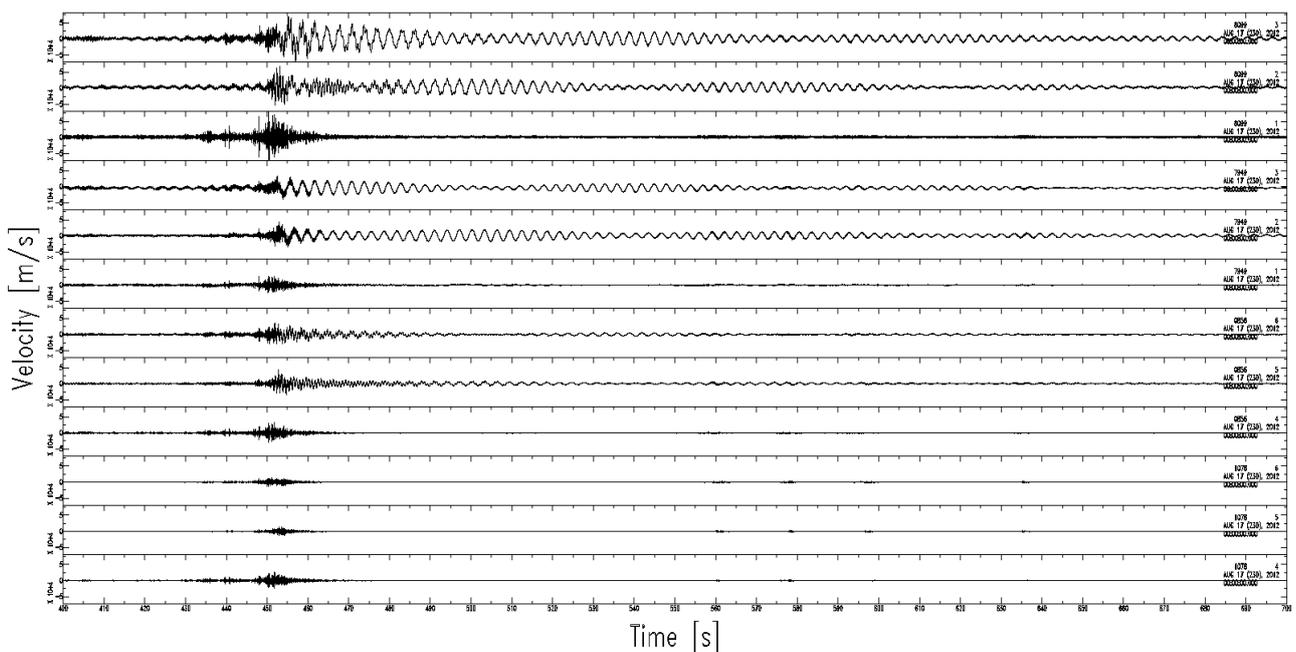


Figura 4.14 Esempio di transiente registrato di frequente su tutte le stazioni installate all'interno della Torre degli Asinelli. Dal basso verso l'alto ogni terna di segnali corrisponde alle componenti Z, NS, EW di ognuna delle stazioni installate.

Sulle componenti verticali di tutte le stazioni esso si presenta come un disturbo che si esaurisce in pochi secondi. Sulle componenti orizzontali, invece, sembrano innescarsi dei battimenti che producono un'oscillazione smorzata di bassa frequenza, quasi in opposizione di fase sulle due componenti orizzontali, che modula l'oscillazione propria della Torre e il cui effetto si protrae per alcuni minuti (Fig. 4.14). L'ampiezza del segnale è crescente con la quota e sulla stazione alla sommità può amplificare l'oscillazione della torre fino a dieci volte. Lo stesso segnale di Fig. 4.14, si registra con diverse modalità di propagazione anche lungo la Torre Garisenda (Fig. 4.15). In questo caso la forma del transiente è decisamente diversa da quanto riscontrato sulla Torre degli Asinelli, mentre si conferma il crescere dell'ampiezza con la quota.

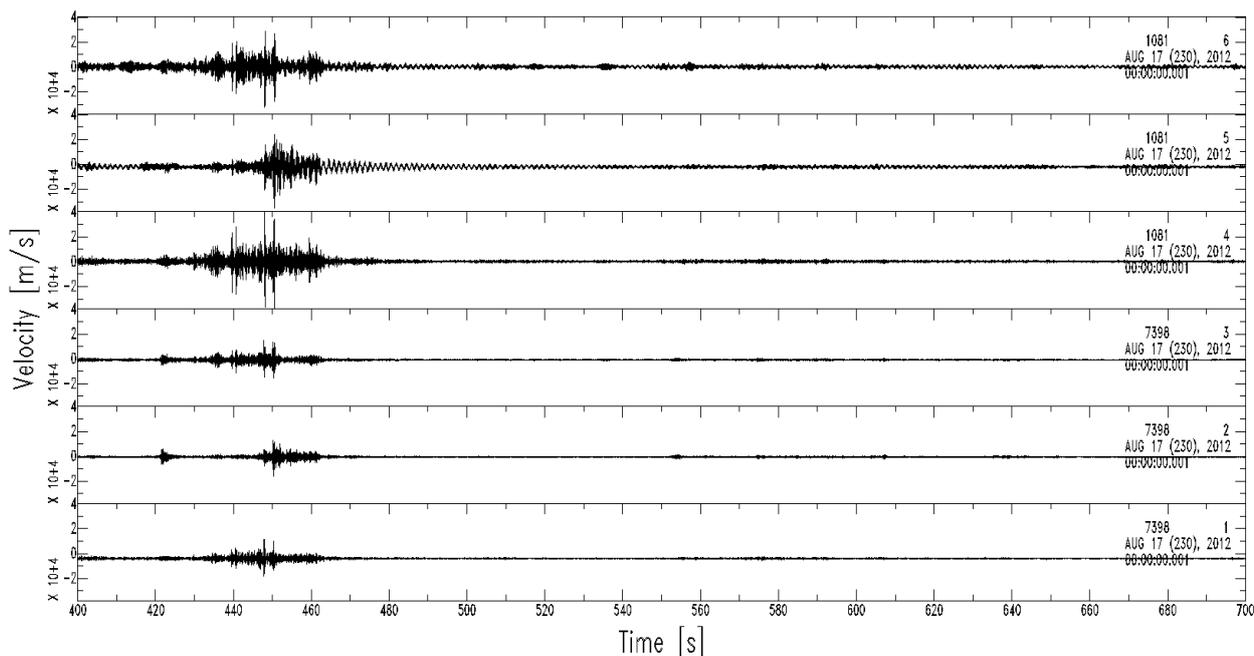


Figura 4.15 Esempio di transiente registrato dalle stazioni della Torre Garisenda in contemporanea con quello mostrato in Fig. 4.16. Dal basso verso l'alto ogni terna di segnali corrisponde alle componenti Z, NS, EW.

L'individuazione di tale effetto è particolarmente utile per lo studio del comportamento di strutture planari asimmetriche. Numerosi autori fin dagli anni '70 dello scorso secolo hanno sviluppato studi teorici sull'argomento [Kan and Chopra 1977, Hejal and Chopra 1987, Rutenberg 1992, Nagarajaiah et al. 1993, Perus and Fajfar 2005, Trombetti & Conte, 2005], hanno sviluppato la disponibilità di dati sperimentali della presenza sulle Torri di battimenti innescati da transienti fornisce interessanti spunti per gli ingegneri impegnati nello studio del comportamento dei due monumenti e, in particolare, per la definizione dell'eccentricità della Torre degli Asinelli, partendo dall'analisi della sua risposta dinamica [Palermo et al., 2014].

La frequenza dell'occorrenza di questi transienti (un esempio in Fig. 4.16a), visibile in particolare nei giorni festivi grazie al minor rumore di fondo, potrebbe far pensare a una correlazione con qualche evento che si presenta regolarmente come, ad esempio, il passaggio di mezzi pubblici alla base delle Torri. Fig. 4.16d mostra il *particle motion* tracciato dalle due componenti orizzontali delle stazioni poste alla base delle due Torri in corrispondenza con l'inizio del disturbo registrato su tutte le stazioni. La composizione delle direzioni individuate dal *particle motion* sembra puntare proprio verso l'incrocio fra Via San Vitale, Via Rizzoli e Strada Maggiore.

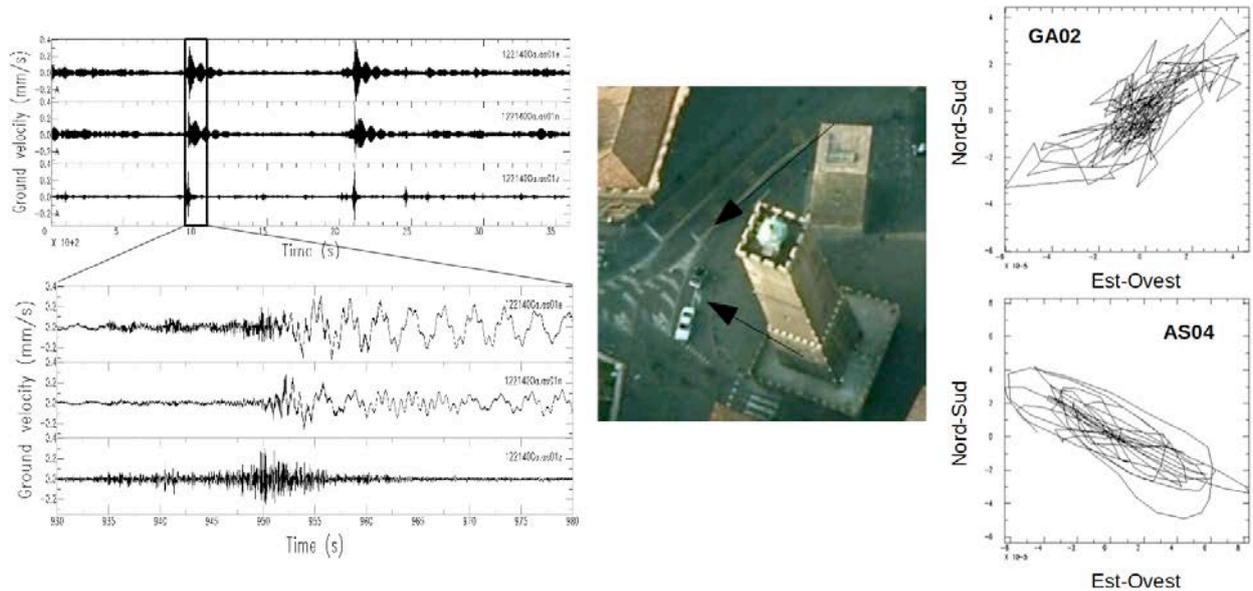


Figura 4.16 a) Alcuni transienti registrati durante un'ora dalle stazioni di sommità della Torre degli Asinelli. b) Ingrandimento di uno dei disturbi mostrati in a), per entrambe dal basso verso l'alto ogni terna di segnali corrisponde alle componenti Z, NS, EW. c) Ubicazione delle due torri e indicazione della direzione individuata dal particle motion calcolato per le stazioni poste alla base delle Torri in corrispondenza dell'arrivo del disturbo d).

4.2 Analisi nel dominio delle frequenze

I dati registrati sono stati analizzati nel dominio delle frequenze, in modo da mettere in evidenza la peculiarità spettrale dell'oscillazione delle Torri. A tale proposito sono stati calcolati spettri di Fourier, e, per ogni torre, i rapporti spettrali fra componenti omologhe delle stazioni poste ai piani rispetto a quelle poste alla base (SSR).

Per ognuna delle quantità sono state calcolate le medie orarie ottenute mediando per ogni ora le corrispondenti grandezze calcolate sui 30 sottointervalli di durata pari a 120 s contenuti all'interno di un'ora di registrazione. Il calcolo è stato effettuato su tutte le stazioni solo su alcuni giorni e su alcune ore ritenute significative (in ora locale 02, 08, 13, 19, 23) sia per gli spettri di Fourier che per i rapporti spettrali SSR.

Spettri di Fourier

In Fig. 4.17 (a,b,c,d) e 4.18 (a,b) vengono presentati, rispettivamente per la Torre degli Asinelli e per la Garisenda, esempi di curve spettrali medie orarie calcolate per ogni stazione sui dati registrati durante uno dei giorni nel periodo di monitoraggio delle Torri.

In entrambe le Torri è possibile riconoscere l'intervallo spettrale in cui ricade la frequenza associata al primo modo di oscillazione, fra 0.315 e 0.33 Hz per la Torre degli Asinelli e fra 0.67 e 0.78 Hz per la Garisenda.

Rifacendosi a quanto indicato dai risultati delle modellazioni teoriche relative alla Torre degli Asinelli riportate in Ceccoli et al., [2011], l'intervallo di frequenze individuato dall'analisi delle forme d'onda si trova in ottimo accordo con quanto ottenuto dalle modellazioni al continuo e quelle discrete con incastro alla base; viceversa, le frequenze individuate attraverso l'applicazione di metodi alle differenze finite o introducendo nel modello discreto basi flessibili tendono a sottostimare la frequenza del modo principale. Un ottimo accordo si ottiene inoltre con quanto ricavato da Riva et al. [1998] attraverso un'analisi modale lineare.

Riguardo la Garisenda non si trovano in letteratura valori di riferimento relativi alla sua frequenza di oscillazione. Una comunicazione personale dell'Ing. G. Dallavalle, referente delle attività di monitoraggio e consolidamento delle Torri, attesta un buon accordo fra il valore ricavato dal presente studio e quello noto da modellazioni non ancora pubblicate. Del resto, tenuto conto della sua altezza, assimilando abbastanza verosimilmente la Garisenda ad un edificio fra i 13 e 15 piani e applicando la formula empirica di Housner

[1962], si ottiene un periodo proprio che si pone fra 1.3 e 1.5 s, intervallo non molto dissimile da quello individuato dalle registrazioni sismometriche.

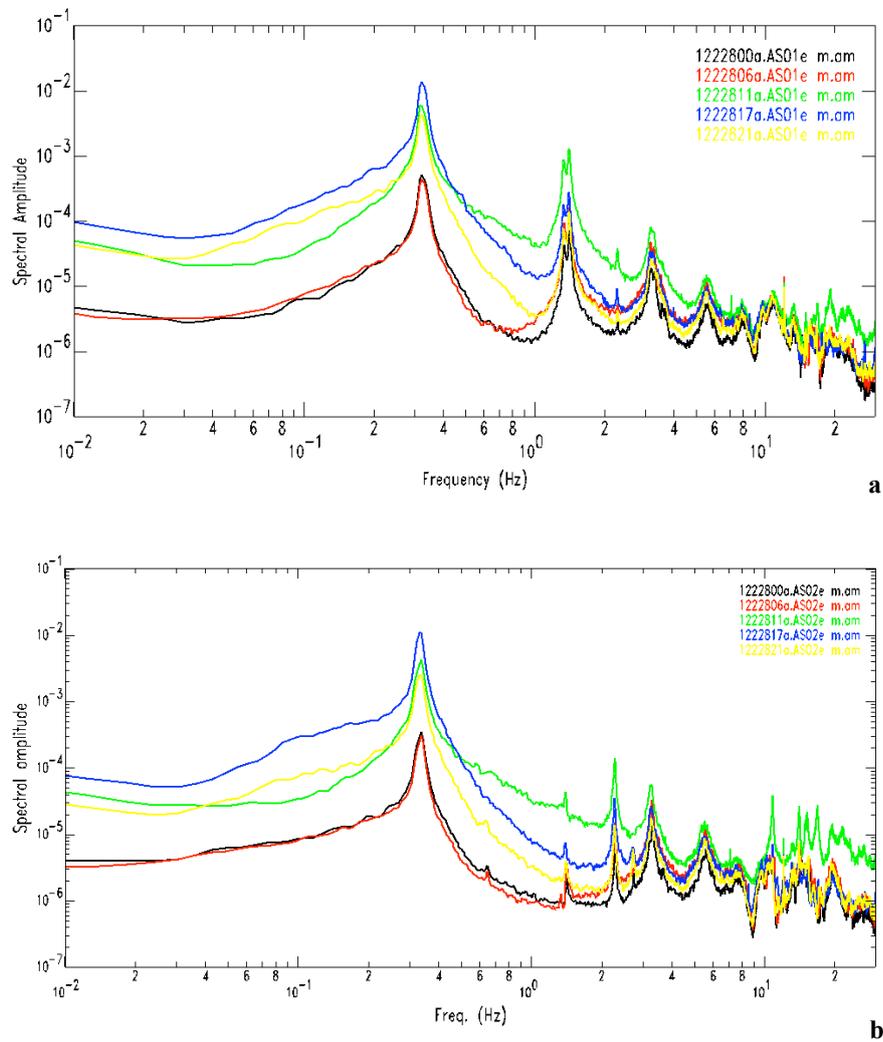


Figura 4.17 a,b Spettri di Fourier medi calcolati per la componente EW delle stazioni sismiche installate all'interno della Torre degli Asinelli. a) AS01, b) AS02. Le curve di diverso colore corrispondono a momenti diversi della giornata (nero 00, rosso 06, verde 11, blu 17, giallo 21).

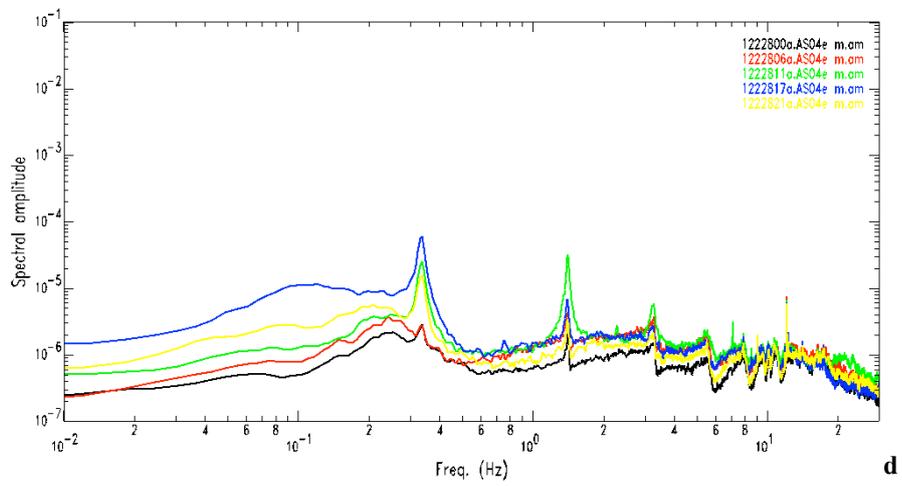
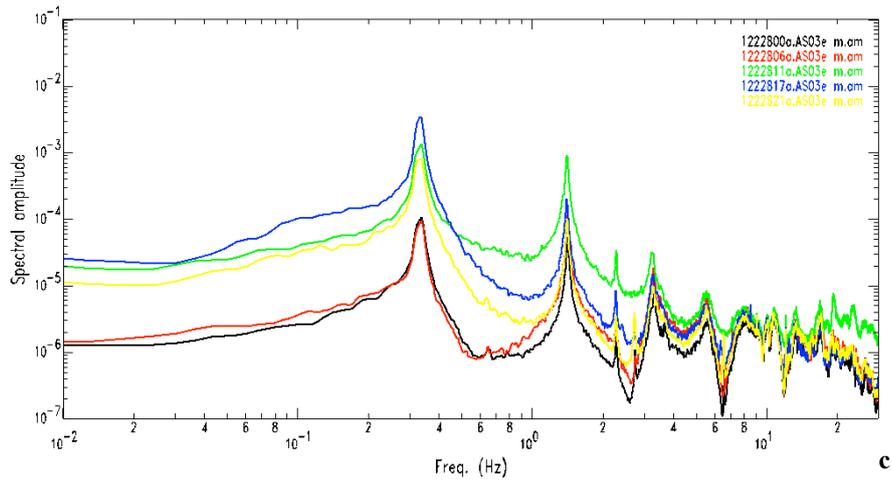


Figura 4.17 c,d Spettri di Fourier medi calcolati per la componente EW delle stazioni sismiche installate all'interno della Torre degli Asinelli. c) AS03, d) AS04. Le curve di diverso colore corrispondono a momenti diversi della giornata (nero 00, rosso 06, verde 11, blu 17, giallo 21).

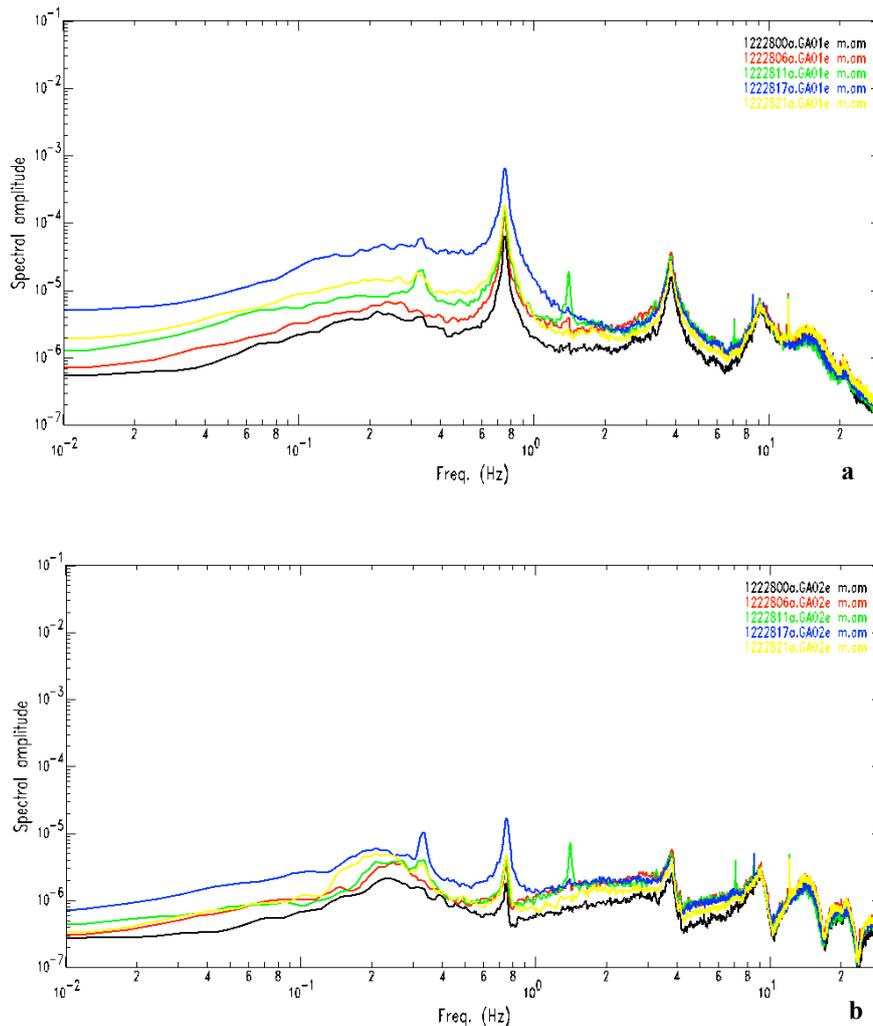


Figura 4.18 Spettri di Fourier medi calcolati per una delle componenti orizzontali delle stazioni sismiche installate all'interno della Torre Garisenda, a) GA01 b) GA02. Le curve di diverso colore corrispondono a momenti diversi della giornata (nero 00, rosso 06, verde 11, blu 17, giallo 21).

Altrettanto può dirsi per le frequenze relative ai modi di ordine superiore, sia i valori riportati per la Torre degli Asinelli da Ceccoli et al. [2011], che indicano un intervallo compreso fra 1.17 e 1.36 Hz, che quelli indicati da Riva et al. [1998], pari a 1.42 Hz, non si discostano molto da quelli individuati dall'analisi dei dati sismometrici.

Gli andamenti spettrali, inoltre, sembrano evidenziare una variabilità nell'andamento giornaliero dell'oscillazione delle Torri che si accorda con quanto osservato tramite le forme d'onda e sembra essere particolarmente evidente per la frequenza corrispondente al modo normale di oscillazione, mentre si presenta in misura minore per le armoniche superiori.

L'analisi spettrale ha consentito di mettere in luce ulteriori aspetti legati alle modalità di oscillazione delle torri e alla loro induzione reciproca.

I primi modi vibrazionali presentano diverse frequenze di oscillazione lungo i due assi orizzontali. L'effetto è particolarmente evidente sulla sommità della Torre degli Asinelli (Fig. 4.19), dove i primi due modi di oscillazione mostrano una separazione del picco in due picchi spettrali distinti che si presentano con ampiezze invertite sulle due componenti orizzontali, secondo quanto previsto dal modello teorico [Ceccoli et al, 2011].

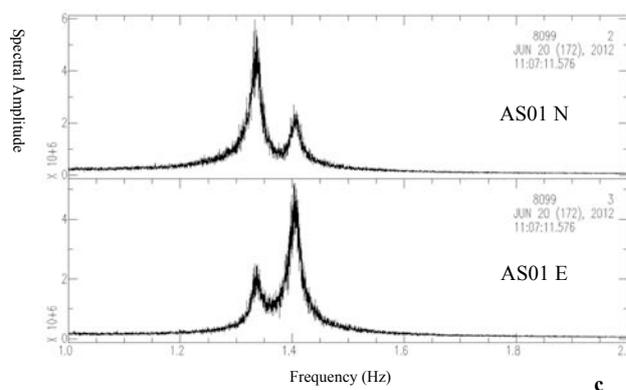
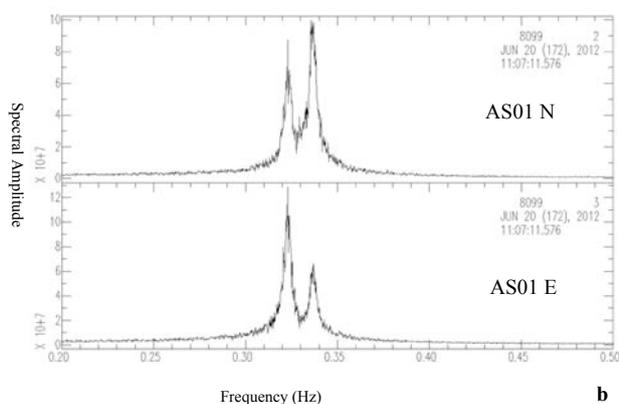
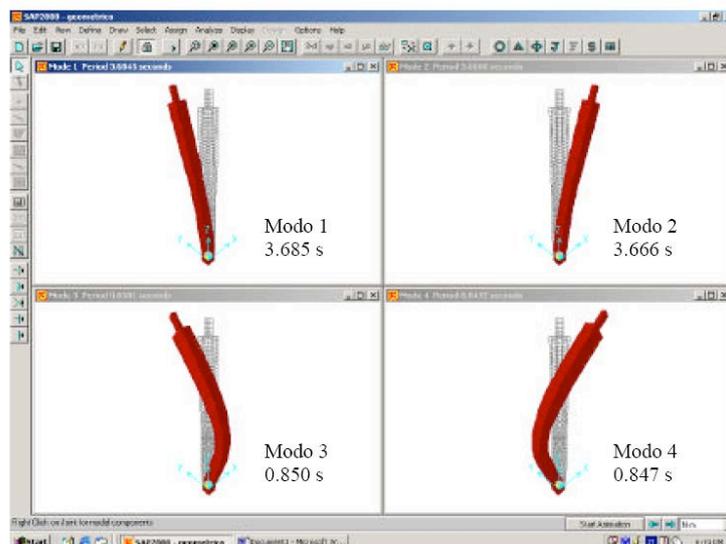


Figura 4.19 I primi quattro modi di vibrare prodotti dal modello teorico di tipo shell con incastro cedevole alla base, tratto da Ceccoli et al., [2011]. Esempio di confronto fra i picchi spettrali individuati sulle due componenti orizzontali della stazione sismica posta alla sommità della Torre degli Asinelli. b primo e secondo modo vibrazionale; c terzo e quarto modo vibrazionale.

Riguardo il secondo aspetto, osservando con attenzione la Fig. 4.18, si nota che nella parte spettrale a bassa frequenza della Torre Garisenda è presente un picco (più evidente sulla stazione al basamento, ma riconoscibile anche su quella di sommità) a una frequenza che sembra corrispondere al primo modo vibrazionale della Torre degli Asinelli. Ciò potrebbe indicare che l'oscillazione della Torre più elevata induce una modesta oscillazione su quella adiacente.

L'effetto dovrebbe essere tanto più evidente quanto più la Torre degli Asinelli oscilla.

Il giorno 26 Giugno 2012, sulla sommità della Torre degli Asinelli è stata registrata una oscillazione che ha raggiunto una ampiezza di 6 mm sulla componente EW. Tale oscillazione, registrata da tutte le stazioni degli Asinelli e della Garisenda (Fig. 4.20) non è chiaramente dovuta a un disturbo locale ma a una sorgente esterna alle Torri.

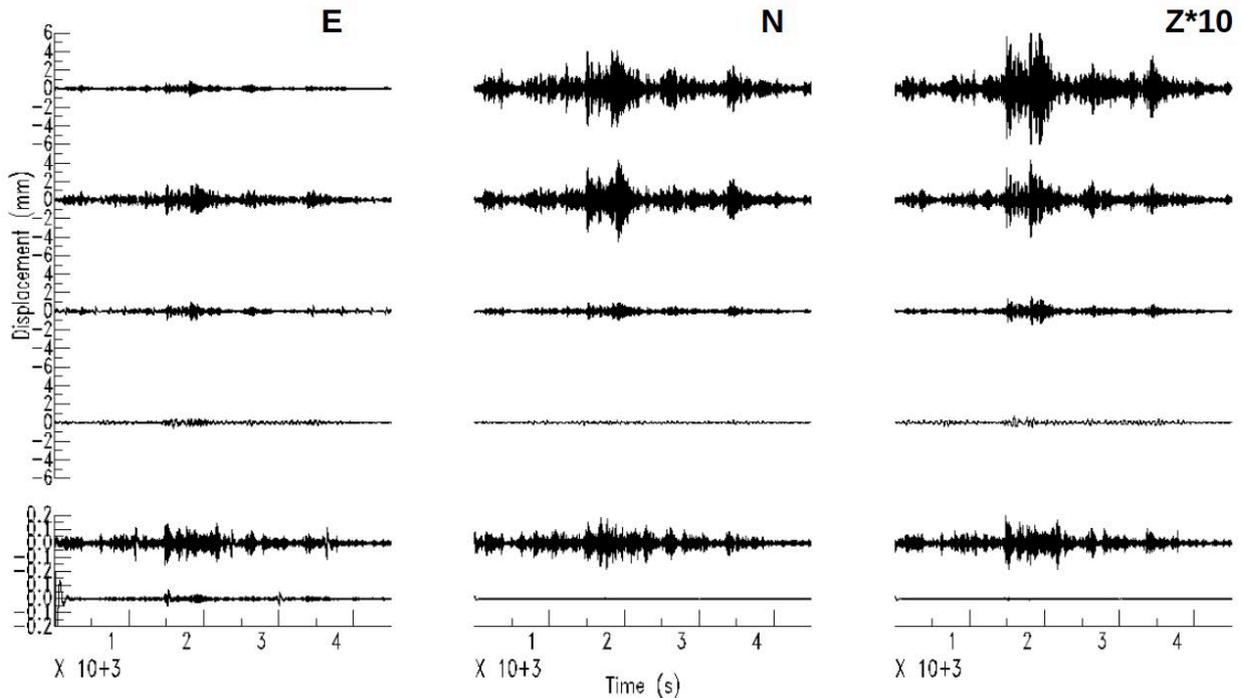


Figura 4.20 Forme d'onda in spostamento relative al giorno 26 Giugno 2012, da sinistra a destra le componenti Z, NS, EW. L'ampiezza delle componenti verticali è stata amplificata di 10 volte per essere visibile alla scala delle componenti orizzontali. In alto le registrazioni sulla Torre degli Asinelli, in basso quelle sulla Garisenda.

La Fig. 4.21 mostra il confronto fra gli spettri delle componenti orizzontali EW di tutte le stazioni sismiche.

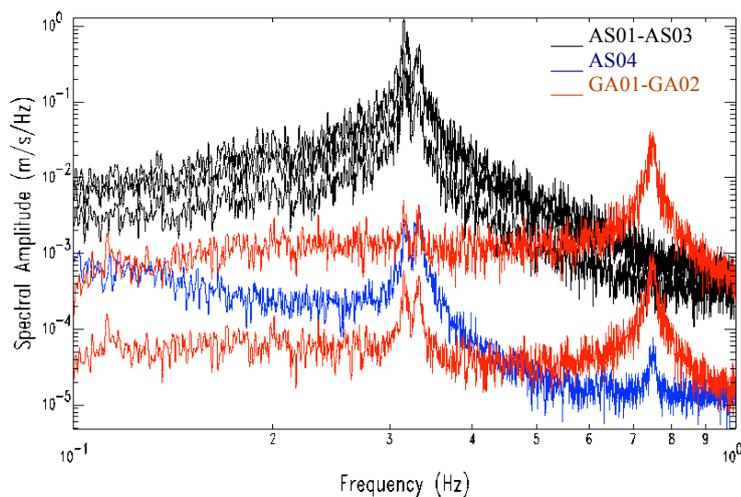


Figura 4.21 Confronto fra gli spettri calcolati sulle componenti EW di tutte le stazioni sismiche installate nelle Torri, durante la giornata del 26 Giugno 2012. Le curve in nero corrispondono alle stazioni installate all'interno della Torre degli Asinelli (AS01, AS02, AS03), quella blu alla stazione installata alla base della Torre degli Asinelli (AS04), le curve rosse sono relative alle stazioni della Garisenda.

Le curve di colore nero corrispondono alle stazioni poste all'interno della Torre degli Asinelli, la curva blu è relativa alla stazione di base della Torre degli Asinelli, le due curve rosse sono quelle delle stazioni poste all'interno della Garisenda. Dal confronto delle curve spettrali (Fig. 4.21) sembra essere confermato un effetto di induzione dell'oscillazione della Torre degli Asinelli sulla Garisenda: il picco spettrale presente su tutte le stazioni della torre più elevata si manifesta sulle stazioni di base e di sommità della torre adiacente. Meno evidente è invece l'effetto opposto: il picco spettrale corrispondente al primo modo vibrazionale della Garisenda è infatti rilevabile solo sulla stazione di base degli Asinelli, indice che l'oscillazione prodotta dalla Garisenda si propaga, come ovvio, nell'area circostante la torre, ma non è sufficientemente ampia da innescare una oscillazione visibile sulle stazioni poste all'interno della torre più elevata.

Rapporti spettrali SSR

I rapporti spettrali a componente omologa (E/Erif, N/Nrif, Z/Zrif) consentono di individuare il comportamento delle stazioni installate sui piani rispetto al moto alla base che, assumendo che le stazioni poste alla base risentano poco dell'effetto dovuto all'oscillazione della torre sovrastante, dovrebbe corrispondere a quello del terreno. L'assunzione, in realtà, non è totalmente soddisfatta, visto che, almeno per quanto riguarda il primo modo normale di oscillazione e quello immediatamente successivo, le due stazioni sismiche poste alla base delle torri presentano picchi spettrali ben evidenti sulle stesse frequenze anche se caratterizzati da ampiezze molto più piccole.

Ciò, inoltre, potrebbe essere particolarmente vero per la Garisenda dove la stazione di riferimento non è a diretto contatto con il terreno ma è posta nel locale alla base della Torre che si trova su un piano rialzato di circa 2 m rispetto al piano stradale.

Il rapporto spettrale comunque fornisce un'indicazione di quanto viene amplificata con la quota l'ampiezza dell'oscillazione ai piani rispetto a quella risentita alla base.

In Figg. 4.22 e 4.23, rispettivamente per Asinelli e Garisenda, sono mostrati i rapporti spettrali fra le stazioni di sommità e quelle poste alla base. Ogni terna di riquadri mostra una diversa componente (EW, NS, Z). Le curve di diverso colore corrispondono a rapporti spettrali medi orari calcolati in momenti diversi della giornata (00, 06, 11, 17, 21).

Gli andamenti di SSR per le diverse componenti consentono di visualizzare sia come cresce l'ampiezza spettrale dell'oscillazione in funzione della quota, sia come varia nell'arco della giornata il rapporto spettrale SSR per ogni stazione.

Una considerazione interessante sembra scaturire dall'osservazione dei rapporti spettrali Z/Zrif che, diversamente da quanto ci si potrebbe aspettare, mostrano che il movimento verticale registrato sulle stazioni ai piani presenta evidenti diversità rispetto al moto verticale della stazione di riferimento. Al di fuori della banda corrispondente al primo modo di oscillazione e alla prima armonica superiore i rapporti SSR verticali evidenziano picchi diversi rispetto a quelli individuati dai rapporti spettrali orizzontali

Un altro aspetto interessante riguarda la variazione giornaliera dell'ampiezza e della forma dei picchi spettrali, in particolare quelli relativi alla frequenza principale e alla prima armonica. L'effetto, particolarmente visibile sui rapporti relativi alle componenti orizzontali, si riscontra in particolare sulla Torre degli Asinelli, ma è evidente, anche se e in maniera meno marcata, sulla Garisenda.

Stando a quanto riferito dagli ingegneri che si occupano del monitoraggio statico delle due Torri, l'effetto potrebbe essere messo in relazione con il rilascio termico dovuto all'insolazione. La variazione dei parametri elastici dei materiali prodotta dal riscaldamento giornaliero potrebbe giustificare una variazione seppur minima del periodo di oscillazione delle torri, con maggior evidenza sulla torre più alta (Asinelli) rispetto alla più bassa (Garisenda).

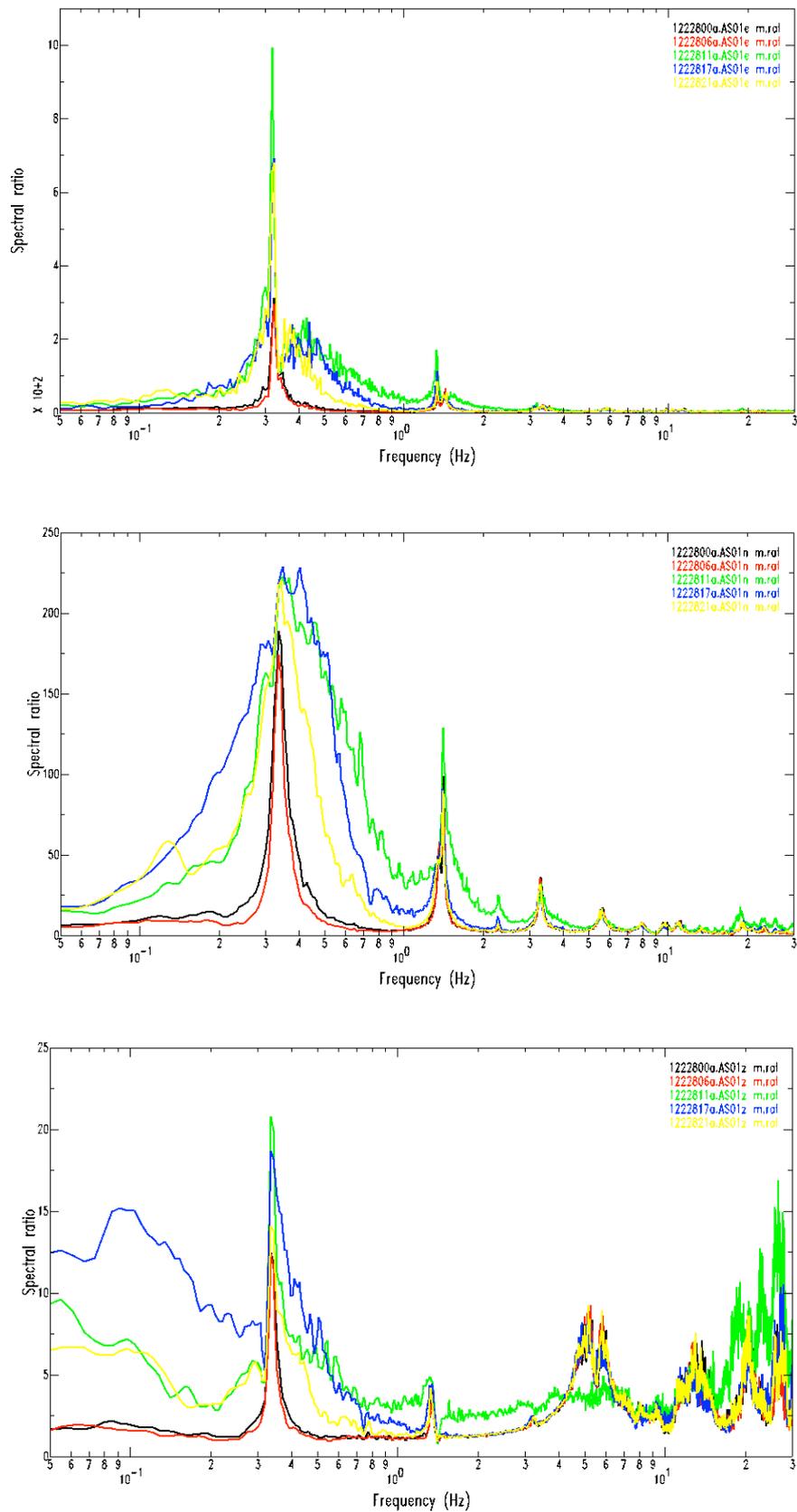


Figura 4.22 Asinelli sommità. Rapporti spettrali SSR rispetto al basamento. Dall'alto verso il basso EW, NS, Z. I riquadri sono relativi a diverse bande di frequenza, la scala di colori indica le diverse ore su cui sono stati calcolati i rapporti medi (nero 00, rosso 06, verde 11, blu 17, giallo 21).

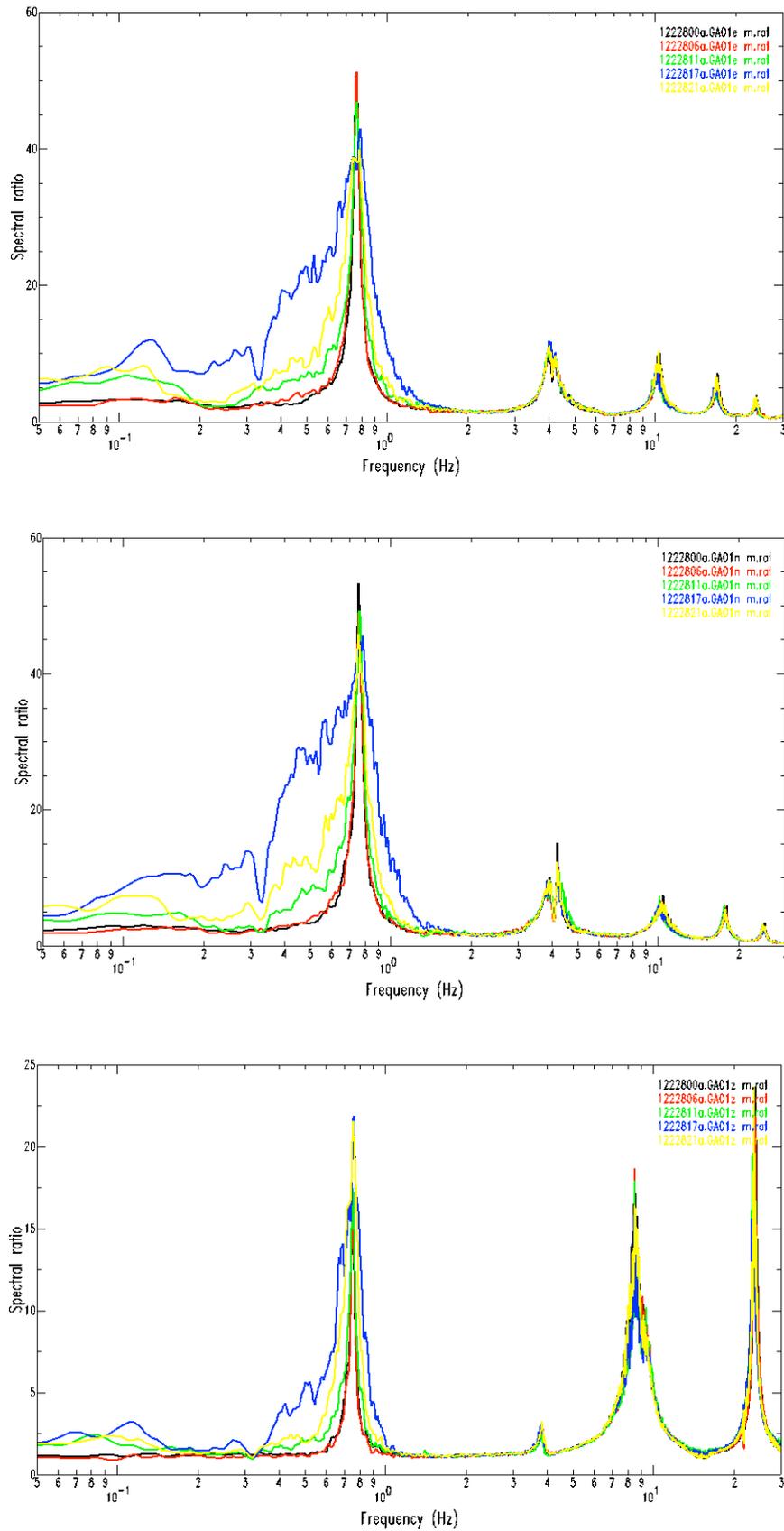


Figura 4.23 Garisenda sommità. Rapporti spettrali SSR rispetto al basamento. Dall'alto verso il basso EW, NS, Verticale. I riquadri sono relativi a diverse bande di frequenza, la scala di colori indica le diverse ore su cui sono stati calcolati i rapporti medi (nero 00, rosso 06, verde 11, blu 17, giallo 21).

5. Considerazioni finali

L'utilizzo di metodologie sismologiche per il monitoraggio di edifici monumentali è ormai divenuto una importante componente del monitoraggio dinamico di strutture edificate. Nel caso delle due Torri di Bologna i dati registrati dalle sei stazioni sismiche installate da Giugno a Settembre 2012 hanno fornito una verifica sperimentale ai modelli teorici elaborati dagli ingegneri sulla base di stime dei principali parametri elastici. È stato inoltre possibile valutare l'esistenza di una mutua influenza dell'oscillazione di una torre sull'altra.

La disponibilità di dati raccolti in registrazione continua ha consentito di riconoscere l'esistenza di ciclicità giornaliere nell'oscillazione che possono essere messe in relazione con l'attività antropica che si svolge nelle vicinanze dei due monumenti. È stato possibile, inoltre, individuare chiare correlazioni fra l'ampiezza delle oscillazioni con l'intensità del vento e riconoscere una variazione, seppur minima, della frequenza di risonanza con la temperatura.

Un'ulteriore novità individuata è la presenza di frequenti transienti che propagandosi lungo le Torri, innescano fenomeni di battimenti dovuti probabilmente alla eccentricità delle Torri, in particolare per quanto riguarda la torre più alta, Asinelli. Quest'ultimo aspetto, una volta individuata l'origine di tali transienti, potrebbe essere di notevole importanza per gli organismi preposti al controllo delle condizioni di stabilità delle Torri, perché potrebbe avere a che fare con il passaggio di mezzi pesanti (in particolar modo autobus) alla base della Torre.

I risultati ottenuti sono stati di grande utilità nella progettazione di un nuovo esperimento di monitoraggio sulle Torri, iniziato a Settembre 2013 e in atto alla data di stesura del presente rapporto. È inoltre in corso una collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Bologna in modo da utilizzare i risultati delle misure sperimentali per vincolare i modelli numerici.

Ringraziamenti

L'esperimento è stato possibile grazie alla disponibilità dell'Ing. G. Dallavalle e ai dipendenti della ditta incaricata degli interventi di restauro e consolidamento delle Torri che hanno fornito un importante supporto logistico.

Il Comune di Bologna ha dato le autorizzazioni all'esecuzione delle misure.

Un particolare ringraziamento all'Ing. G. Dallavalle, al Prof. T. Trombetti e ai dott. M. Palermo e S. Baraccani per gli stimolanti suggerimenti e per l'illustrazione dei modelli numerici.

Un ringraziamento al Dott. G. Franceschina che ha rivisto il lavoro, i suoi suggerimenti sono stati utili a migliorare il testo e stimolanti per gli sviluppi futuri dell'analisi.

Bibliografia

- Azzara R.M., Zaccarelli L., Morelli A., Trombetti T., Dallavalle G., Cavaliere A., Danesi D. (2014). *Seismic monitoring of the Asinelli and Garisenda medieval towers in Bologna (Italy), an instrumental contribution to engineering modeling direct to their protection*, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, Boğaziçi University Publishing, Istanbul, 2014, ISBN 978-975-518-361-9, F. M. Mazzolani, G. Altay (Eds).
- Azzara R.M., Cara F., Cultrera G., Di Giulio G. (2004). *Manuale d'uso per lo scaricamento e l'analisi semiautomatica dei dati registrati da stazioni sismiche per lo studio degli effetti di sito*, Rapporti Tecnici INGV, n. 25, Luglio 2004.
- Bard P.Y., Duval A.M., Lebrun B., Lachet C., Rieple J., Hatfeld D. (1997). *Reliability of the H/V technique for site effects measurements: An experimental assessment*, in Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering July 19-24, Istanbul, Turkey.
- Bard P.Y. (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?*, In: The effects of surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani Eds., 1251 – 1279, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Bertacchini E., Boni E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M. (2010). *Terrestrial Laser Scanner for Surveying and Monitoring Middle Age Towers*. In: XXIV FIG Congress. Sydney, Australia, 2010, vol. TS 4D - number 4445, p. 1-13, Copenhagen: FIG Federation International des Geometres, ISBN: 9788790907877.

- Bertacchini E., Capra A., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi I. (2011). *Utilizzo del laser scanner per i beni culturali: analisi dell'assetto geometrico strutturale e di specifiche anomalie geometriche*. In: ATTI Conferenza ASITA 2011. reggia di Colorno- Parma, 15-18 Novembre 2011, p. 315-322, PARMA: ASITA, ISBN: 9788890313264.
- Bonnefoy-Claudet S., Cotton F., Bard P.Y. (2006). *The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review*, 2006, Earth-Science Reviews, 79, pp. 205–227.
- Bonnefoy-Claudet S. (2004). *Nature du bruit de fond sismique: implications pour les études des effets de site*, PhD thesis at Joseph Fourier University (Grenoble-France), 2004, p. 241.
- Capra C., Bertacchini E., Castagnetti C., Dubbini M., Rivola R., Toschi I. (2011). *Rilievi laser scanner per l'analisi geometrica delle torri degli Asinelli e Garisenda*. INARCOS, vol. 4, p. 35-42, ISSN: 0391-6537.
- Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M. (2011). *Il laser scanning terrestre per l'analisi di edifici di interesse storico ed artistico*. In: Ambrogio Manzino e Anna Spalla. Geomatica - le radici del futuro (tributo a Sergio Dequal & Riccardo Galetto). p. 99-108, Cagliari: EDizioni SIFET, ISBN: 9788890193965.
- Castagnetti C., Bertacchini E., Capra A., Dubbini M. (2012). *Terrestrial Laser Scanning for Preserving Cultural Heritage: Analysis of Geometric Anomalies for Ancient Structures*. In: -. FIG working week 2012. Rome, 6-10 Ma 2012, vol. TS08 n.6031, p. 1-13, Copenhagen:FIG Federation INternational des Geometres, ISBN: 9788790907983.
- Castellaro S., Mulargia F. (2010). *How far from a building does the ground motion free-field start? The case of thee famous towers and a modern building*, BSSA, 199, 5A, 2080-2094.
- Ceccoli C., Benedetti A., Trombetti T., Silvestri S., Gasparini G., Lometti A. (2011). *Valutazione delle caratteristiche dinamiche e sismiche della Torre degli Asinelli sita in Bologna*, bozza di stampa.
- Di Gennaro A. (2010). *Formule approssimate del periodo fondamentale di vibrazione di strutture (costruzioni) edilizie*, Comitato Tecnico Scientifico dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, Maggio 2010.
- ISIDe Working Group (2010). *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. INGV <http://iside.rm.ingv.it>
- Froli M., Formichi P. (2002). *Statistical analysis of temperature measurements in the Leaning Tower of Pisa in comparison with theoretical predictions*, Bautechnik, vol. 78, 5, May 2001, pp. 348-361.
- Froli M., Ulivieri E. (2001). *Transient temperature fields and thermal actions in the Leaning Tower of Pisa*, Bautechnik, vol. 78, 5, May 2001, pp. 348-361.
- Froli M., Ulivieri E. (2006). *The calculation of thermal movements and eigenstresses in the Leaning Tower of Pisa*, Bautechnik, vol. 83, 1, Jan 2006, pp. 23-34.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G. (2007). *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*. INGV-SGA. <http://storing.ingv.it/cfti4med/>
- Hejal R., Chopra A.K. (1987). *Earthquake response of torsionally coupled buildings*. Report UCB/EERC 87/20, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Kan C.L., Chopra A.K. (1987). *Linear and non linear earthquake responses of simply torsionally coupled systems*, Earthquake Engineering Research centre, University of California, Berkeley, CA, 1987.
- Lippman E., Gebrande H. (1983). *Eine einfache Methode zur Erweiterung des Meßbereichs Elektrodynamischer Seismometer*. Annual meeting of the German Geophysical Society, Aachen.
- Locati M., Camassi R., Stucchi M. (a cura di), (2011). *DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>, DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.
- Nogoshi M., Igarashi T. (1971). *On the amplitude characteristic of microtremor (part.2)*, Journal of Seismological Society of Japan, 24, 1971, pp.26-40 (in giapponese, con abstract in inglese).
- Nakamura Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura Y. (1996). *Real time information systems for hazards mitigation*, atti del 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Nakamura Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*, in atti del 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zeland.
- Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C. (1993). *Torsion in base isolated structures with elastomeric isolation systems*, Journal of Structural Engineering ASCE 119, 2932–2951.

- Palermo M., Azzara R.M., Baraccani S., Cavaliere A., Morelli A., Silvestri S., Gasparini G., Trombetti T., Zaccarelli L. (2014). *Measurements of the free vibration response of the Asinelli Tower in Bologna and its interpretation*, Proceedings of Second European Conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul, 24-29 August, 2014, in press.
- Perus I., Fajfar P. (2005). *On the inelastic torsional response of single-storey structures under bi-axial excitation*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 34, 931–941.
- Riva P., Perotti F., Guidoboni E., Boschi E. (1998). *Seismic analysis of the Asinelli Tower and earthquakes in Bologna*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 17, 525–550.
- Romeo G., Braun T. (2006). *Appunti di sismometria*. Quaderni di Geofisica 46, <http://istituto.ingv.it/lingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/numeri-pubblicati-2007>.
- Romeo G. (2012). *Whale watching: effects of strong signals on Lippmann style seismometers*, Journal of Seismology, Vol. 16, pp. 25–34, DOI 10.1007/s10950-011-9246-7.
- Rutenberg, A. (1992). *Nonlinear response of asymmetric building structures and seismic codes: A state of the Art*, European Earthquake Engineering, VI (2), 3-19.
- Trombetti T., Conte J.P. (2005). *New insight into and simplified approach to seismic analysis of torsionally coupled one-storey, elastic systems*, Journal of Sound and Vibration 286, 265-312.
- Zuccagni-Orlandini A. (1844). *Atlante geografico degli stati italiani delineato sopra le migliori e più moderne mappe per servire di corredo alla corografia fisica storica e statistica dell'Italia*, 2 vol., s.e., Firenze 1844.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia