TEST 6

Acquisitore dati - Progetto DOLFRANG - Prototipo 5 – open source

Acquisizioni del 21/05/2015 e del 23/07/2015

1 – Dati generali

Data, località e posizione: 21/05 e 23/07/2015, Como (CO), Via Zezio.
Interno di edificio in ristrutturazione.

Condizioni meteo esterne: 21/05/2015: 18°C all'ombra, brezza vivace;
23/07/2015: 30°C, no vento.

Assi considerati: X, Y, Z; orientazione specificata nel seguito.

Acquisitore USB: "Hear Our Earth", 19/02/2015 - Rev. 1 con 3 distinti gain.
Frequenza propria dei 3 geofoni: 4.5 Hz.

Frequenza di campionamento: 500 Hz

Obiettivo: valutazione delle frequenze proprie di vibrazione di un edificio.
Variazione delle frequenze prima e dopo interventi strutturali.

Software acquisizione: Dolfrang ver. 4.4; Theremino HAL ver. 5.2

Software elaborazione: Geopsy ver. 2.9.1 (geopsypack-2.7.0)

Si ringraziano per la cortese disponibilità: il Responsabile Unico del Procedimento Arch. Francesco Vitola, il Progettista delle Strutture Ing. Gabriele Salvatoni, il Direttore dei Lavori delle Strutture Arch. Daniele Del Bianco, l'Impresa Esecutrice CO.EDIL srl Edilizia.

2 – Breve descrizione dell'edificio e degli interventi previsti

Si tratta di un esistente complesso unitario di edifici in muratura, risalente alla seconda metà del 1700. Nell'ultimo periodo è stato sede dell'Istituto La Presentazione, storico ricovero per donne, generalmente insegnanti trasferitesi dal Sud Italia e straniere. Chiuso dal 2010, è oggi oggetto di totale ristrutturazione per essere destinato a residenze universitarie.

Il corpo est, prospiciente la Via Zezio, e quello ovest, fronteggiante il giardino lungo Via Briantea, sono costituiti da 3 piani fuori terra (compreso il Piano Terra). Il corpo nord (lato Via Ciceri) e quello sud hanno 2 piani fuori terra. Completano il complesso altri corpi di fabbrica: un edificio con 2 piani fuori terra e una cappella a un piano fuori terra, ma avente altezza paragonabile al precedente. Sono presenti alcuni locali nel Piano Sotterraneo in zone molto limitate e circoscritte, tanto da poter considerare il complesso impostato per le sole elevazioni. Il complesso occupa un'area di 6.600 m^2, dei quali 3.500 m^2 dall'edificio.

vista aerea dell'edificio

Da un punto di vista strutturale l'edificio prima degli interventi statici presentava una struttura portante in elevazione con pareti in muratura in pietra a spacco. I solai di piano erano generalmente in legno salvo sporadiche eccezioni in c.a.. La copertura aveva orditura portante lignea con capriate.

In sede di indagini preliminari le pareti portanti interne ed esterne dell'intero fabbricato si presentavano con una muratura in pietrame squadrato e malta. Sono state anche

rinvenute locali alterazioni della muratura con inserimenti di laterizi. Inoltre la malta manifestava locali e circoscritti fenomeni di degrado, correlati alla vetustà del fabbricato.

Tipiche ed originarie situazioni di consistenza della muratura e di composizione dei solai

L'edificio è soggetto a vincolo di bene architettonico e paesaggistico. Il progetto è impostato sulla conservazione dello stato dei luoghi, sia pure facendo ricorso ad una serie di interventi di ripristino e di consolidamento statico. Quindi, sulla base di una intensa e sistematica preliminare campagna di saggi su murature e solai, corredata con alcune prove di carico, è stato possibile conseguire una adeguata conoscenza (da un punto di vista normativo LC3) sulla geometria delle strutture, sullo stato di conservazione, sulle caratteristiche di resistenza dei materiali, sui dettagli di collegamento tra le varie strutture verticali/orizzontali e sulle azioni permanenti agenti nello stato di fatto.

Il progetto strutturale essenzialmente prevede:

- consolidamento dell'intero sistema di fondazioni superficiali. In alcuni casi è previsto il ricorso a sottomurazioni;
- consolidamento dei solai esistenti con diverse metodologie (rifacimenti lignei parziali, getti collaboranti di c.a. alleggerito e utilizzo di connettori per l'unione legno-calcestruzzo);
- nuovi solai di piano con struttura portante in profilati metallici;
- rinforzo di alcuni fornici esistenti con architravi metalliche e spalle in muratura;
- consolidamenti locali della muratura esistente;
- realizzazione di nuove scale di collegamento ai vari piani.

L'intervento strutturale ha lo scopo di consolidare/rinforzare le strutture esistenti carenti, senza alterazione del comportamento globale dell'edificio, che mantiene la dislocazione e la consistenza originaria dei maschi murari.

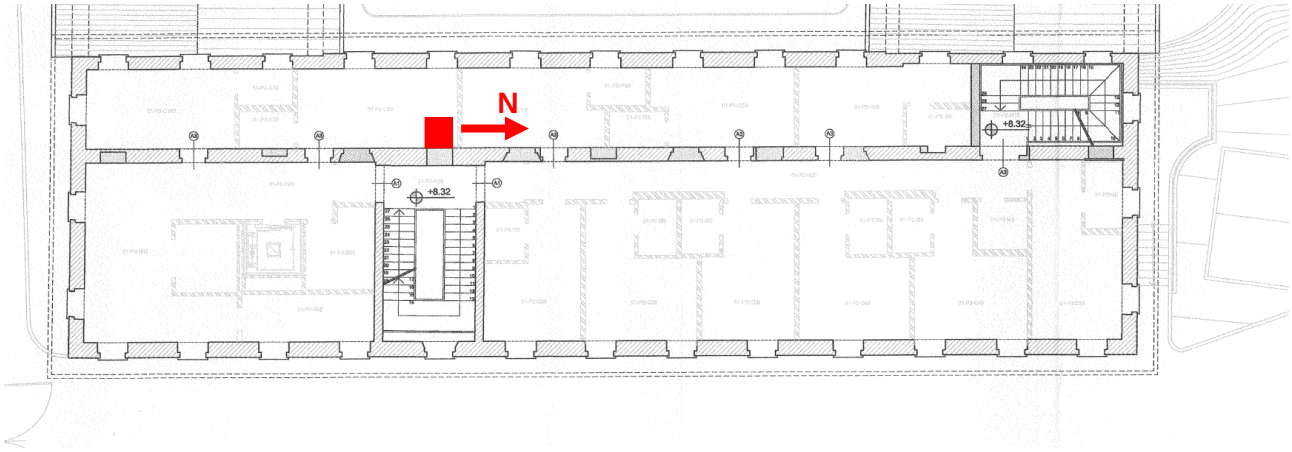
3 – Obiettivo della sperimentazione

In questa nota si intende mettere in evidenza la variazione di comportamento delle strutture per effetto di opere di consolidamento, valutando le frequenze principali con il metodo dei microtremori.

In particolare, in uno dei corpi di fabbrica, in una zona sul 2° solaio in elevazione (ultimo solaio con destinazione residenziale), in prossimità del vano scala, è stato posizionato lo strumento di acquisizione in 2 distinti tempi:

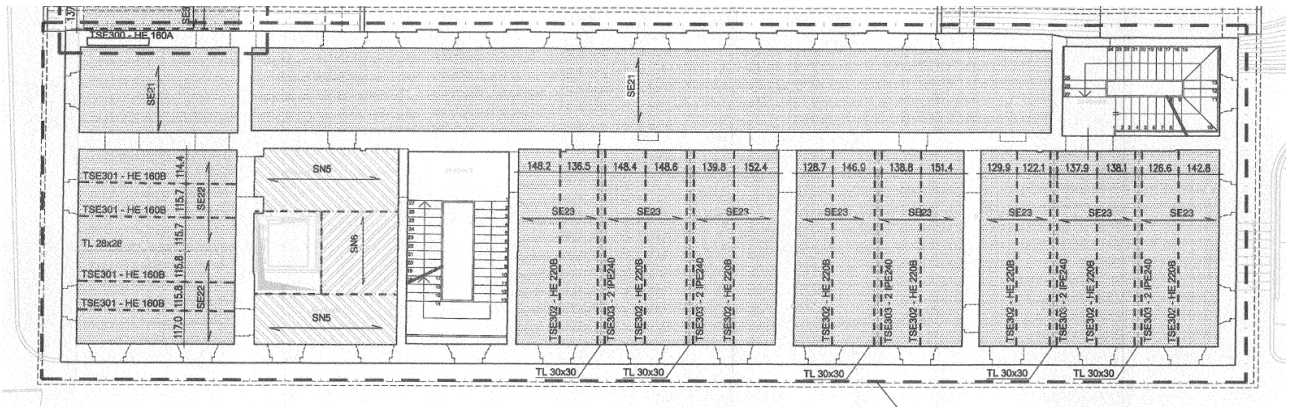
- 21/05/2015: la struttura del solaio di tutto il piano era quella lignea originaria. Erano stati demoliti tutti i tramezzi a tutti i piani e rimosse le finiture superficiali al piano in questione. Ai piani sottostanti (fondazioni, piano terra e 1° piano) erano già stati eseguiti gli interventi di consolidamento previsti;

- 23/07/2015: la struttura del solaio del piano in questione era stata oggetto di consolidamento mediante getto di c.a. collegato all'assito con elementi metallici a vite e solidarizzato alle murature con barre metalliche bloccate con resina epossidica. Tutte le opere erano al rustico delle strutture.

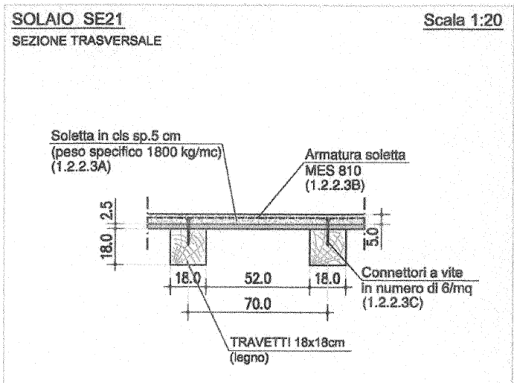


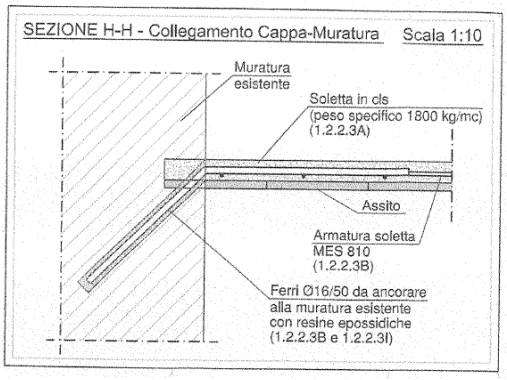
Parte di pianta architettonica del 2° piano con indicata la posizione dello strumento

Situazione al 21/05/2015 – zona corridoio - solaio tipo SE21



Progetto di consolidamento – Parte di pianta strutturale del solaio sul 1° piano





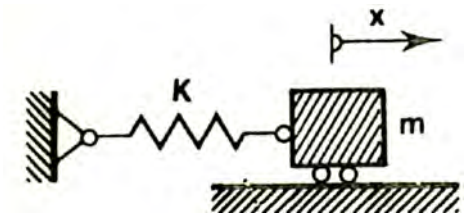
Progetto di consolidamento – Sezioni tipo zona corridoio

4 – Alcuni brevi richiami di dinamica delle strutture

Nel seguito si richiamano brevemente alcune nozioni di dinamica delle strutture, utili per la discussione dei risultati ottenuti con la sperimentazione.

4.1 – L'oscillatore elementare

Il primo aspetto da considerare è il comportamento di un sistema dinamico ad un grado di libertà, ossia l'oscillatore elementare, rappresentato nella figura seguente



oscillatore elementare

dove: **x** è la coordinata che individua in ogni istante la posizione del sistema, **m** è la massa del sistema e **K** è la rigidezza della molla. La molla esercita sulla massa una forza di richiamo proporzionale allo spostamento (molla elastica lineare). Applicando il secondo principio della dinamica si trova l'equilibrio del sistema.

Per semplicità non viene considerato il modello che tiene conto dell'effetto dello smorzamento.

L'equazione differenziale ordinaria, lineare, a coefficienti costanti, del 2° ordine, omogenea, che rappresenta il comportamento del sistema è la seguente

$$m \cdot \ddot{x} + K \cdot x = 0$$

dove $\ddot{x}$ è la derivata seconda di x rispetto al tempo, ossia l'accelerazione (per completezza $\dot{x}$ è la derivata prima di x rispetto al tempo, ossia la velocità).

Riscrivendola in altra forma si ha

$$\ddot{x} + \omega_1^2 \cdot x = 0$$

dove

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

è la pulsazione naturale del sistema.

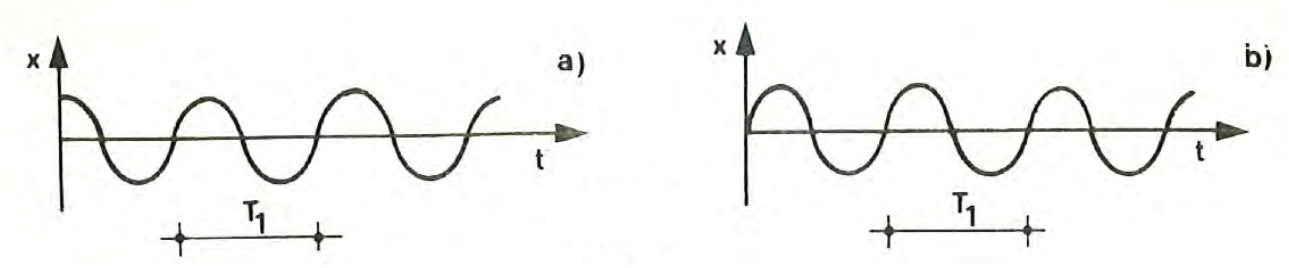
In assenza di forze esterne il moto libero del sistema è regolato dalla seguente relazione

$$x = x_0 \cdot cos\ \omega_1 t + \frac{\dot{x_0}}{\omega_1} \cdot sen\ \omega_1 t$$

dove le condizioni iniziali sono

$$\begin{cases} x(t=0) = x_0 & spostamento\ iniziale \\ \dot{x}(t=0) = \dot{x_o} & velocità\ iniziale \end{cases}$$

Allora le oscillazioni libere del sistema sono oscillazioni armoniche con pulsazione ω_1 dipendente unicamente da **m** e **K**



Oscillatore elementare: (a) solo spostamento iniziale, (b) sola velocità iniziale. T_1 periodo proprio del sistema

Quindi il periodo proprio del sistema è pari a

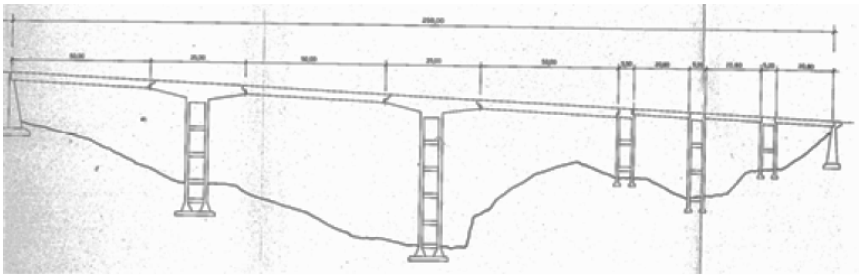
$$T_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_1}$$

L'inverso del periodo è la frequenza

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2 \cdot \pi}$$

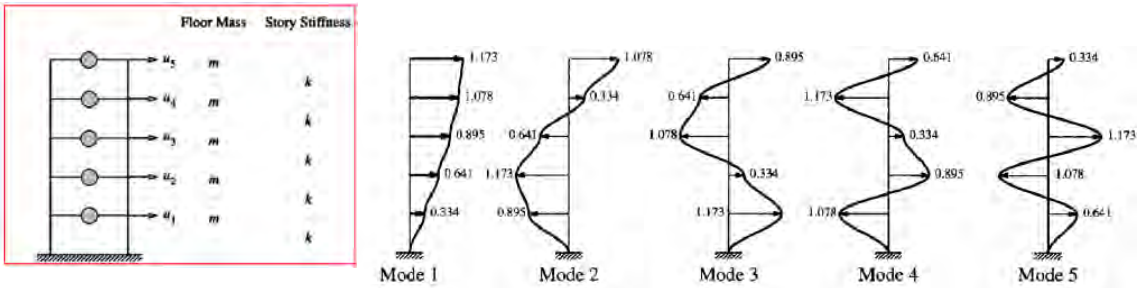
ossia le oscillazioni libere del sistema hanno una frequenza proporzionale alla radice quadrata della rigidezza **K** e inversamente proporzionale alla radice quadrata della massa **m**. In altri termini la frequenza decresce con la massa e cresce con la rigidezza.

Il caso brevemente illustrato consente in via approssimata la schematizzazione di strutture semplici, quali quelle rappresentate nelle figure seguenti



Esempi di strutture schematizzabili con il modello di oscillatore elementare

Nel caso di strutture complesse l'approccio mediante la dinamica lagrangiana e quindi l'utilizzo di coordinate generalizzate consente di schematizzare una struttura da un punto di vista dinamico come un sistema a molti gradi di libertà, ossia con molte variabili generalizzate. Allora, in estrema sintesi, l'individuazione dei modi di vibrazione del sistema costituisce la base per il calcolo della risposta alle azioni dinamiche. E tale operazione conduce alla combinazione di "modi di vibrare elementari", detti anche "modi naturali di vibrare", dove ognuno può essere considerato come un oscillatore semplice caratterizzato da un distinto valore di periodo T.



Esempio di modello dinamico e "modi di vibrare"

4.2 – Alcune caratteristiche degli edifici in muratura

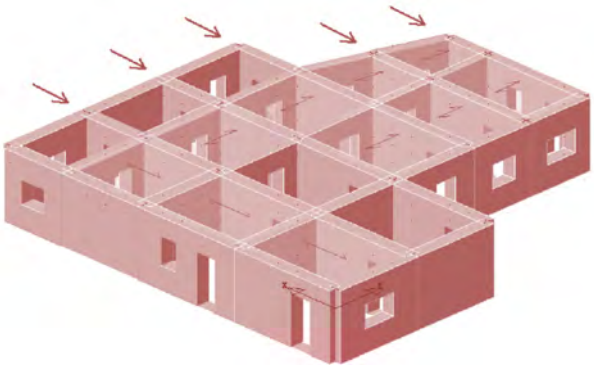
Un edificio in muratura è progettato e realizzato come un assemblaggio tridimensionale di muri e solai in modo da garantire un funzionamento scatolare che conferisca stabilità e robustezza d'insieme.

Le murature offrono ottima resistenza ai carichi verticali (peso proprio, carichi variabili), che comportano sforzi di compressione. Le azioni orizzontali possono indurre stati di sollecitazione (trazioni) incompatibili con la capacità di resistenza del materiale. Per la valutazione della distribuzione delle sollecitazioni sulla struttura è necessario considerare uno schema scatolare costituito da elementi verticali (pareti) e orizzontali (solai), che mutuamente vincolati costituiscono la struttura.

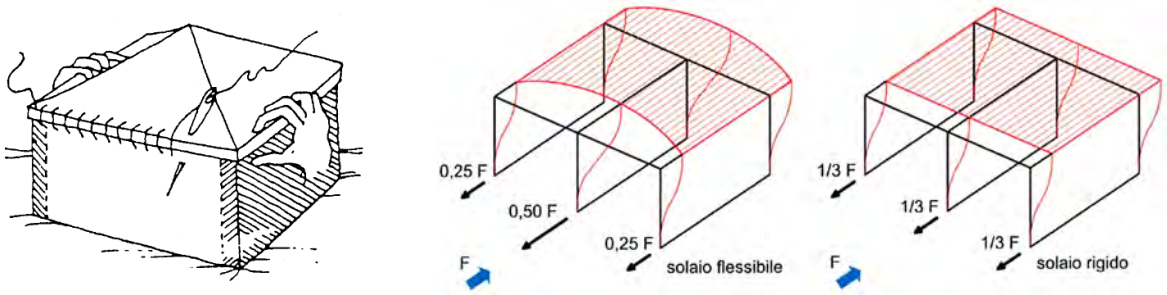
Quindi un'adeguata resistenza globale si realizza con un buon collegamento tra le pareti e tra solaio e pareti, in sintesi con il comportamento scatolare, che è caratterizzato dal grado di connessione, ancor prima che dalle caratteristiche intrinseche dei singoli elementi strutturali.

In particolare la rigidezza dei solai nel piano orizzontale assume un ruolo fondamentale. Solai rigidi ripartiscono le azioni orizzontali tra le pareti in base alla rigidezza di queste ed alla loro dislocazione nella struttura, favorendo inoltre l'instaurarsi di meccanismi di collasso nel piano di sviluppo delle pareti stesse. Nel caso di solai molto flessibili la ripartizione delle azioni orizzontali sulle pareti murarie avviene in funzione della relativa area di influenza per carichi verticali con indipendenza di comportamento nel complesso della struttura.

Quindi il modello globale di una struttura per un edificio in muratura è costituito da pareti e solai. I solai svolgono anche la funzione di trasmissione delle forze orizzontali tra le varie pareti e il solaio con maggiore rigidezza trasmette in modo più efficace le sollecitazioni alle pareti stesse, le quali, in quest'ultimo caso, attivano la resistenza nel loro piano principale di sviluppo.



Esempio di un modello tridimensionale scatolare



Storico esempio di concezione per edificio in muratura e
rappresentazioni di modelli di comportamento per un solaio flessibile e rigido

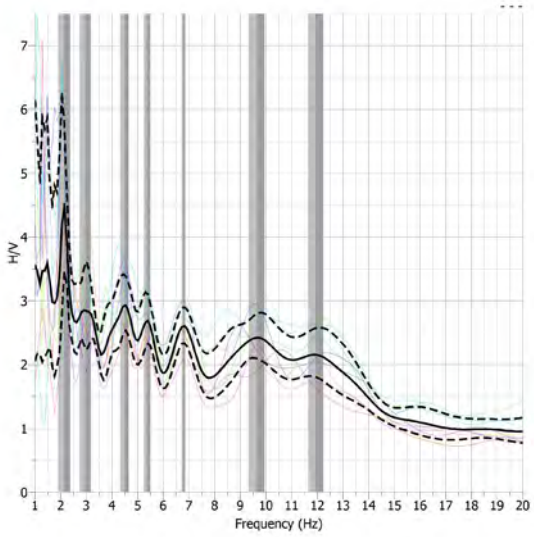
5 – Sperimentazione con la tecnica dei microtremori secondo il metodo di Nakamura

Quota: +8.15 circa, pavimento del Piano Secondo. **Direzione**: vedi figura precedente. Asse Nord secondo lo sviluppo del muro centrale.

Nota: acquisizioni al mattino. Lavori di cantiere in corso.

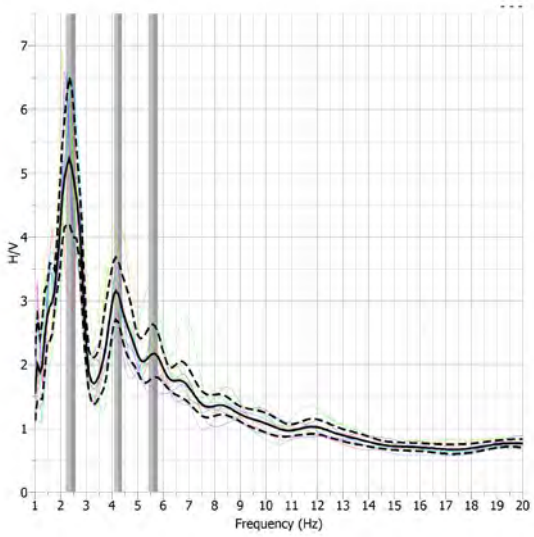
Durata della acquisizione: 40 minuti. ***Numero di dati***: 1.200.000, **Δt** 0.002 secondi.

Le acquisizioni sono state svolte con gain correlato a resistenza elettrica aggiuntiva di 24k ohm (ossia gain 1.700). Nel seguito sono riportati i risultati dell'elaborazione H/V con Geopsy nell'intervallo 1 – 20 Hz.



21/05/2015 – **prima** dell'intervento di consolidamento del solaio del 2° piano

Note di elaborazione: finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **86%**, n° finestre 10



23/07/2015 – **dopo** dell'intervento di consolidamento del solaio del 2° piano

Note di elaborazione: finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **16%**, n° finestre 15

Nel caso del 21/05/2015, prima del consolidamento del solaio, i valori principali di frequenza ottenuti sono

frequenza Hz	H/V
2.15	4.47
2.96	2.85
4.49	2.92
5.37	2.68
6.79	2.60
9.64	2.42
11.94	2.15

Nel caso del 23/07/2015, dopo il consolidamento del solaio, i valori principali di frequenza ottenuti sono

frequenza Hz	H/V
2.40	5.13
4.24	3.11
5.61	2.17

L'edificio in questione è un immobile con vincolo di bene architettonico e paesaggistico e il cui concordato ed approvato progetto di consolidamento è impostato sulla conservazione dello stato dei luoghi, l'obiettivo degli interventi sul patrimonio monumentale è assimilabile ad un miglioramento, fermo restando che «l'incremento del livello di sicurezza locale deve essere ottenuto senza prevedere interventi che stravolgano o comunque modifichino sostanzialmente la concezione originaria del complesso edilizio e delle successive fasi costruttive ad esso organicamente connesse e fisiologicamente connaturate».

Dalle misure svolte si possono esporre due considerazioni:

1) il comportamento strutturale per gli effetti delle forze orizzontali è variato, risultando più definito e meno disgregato di quello rilevato prima dell'intervento;

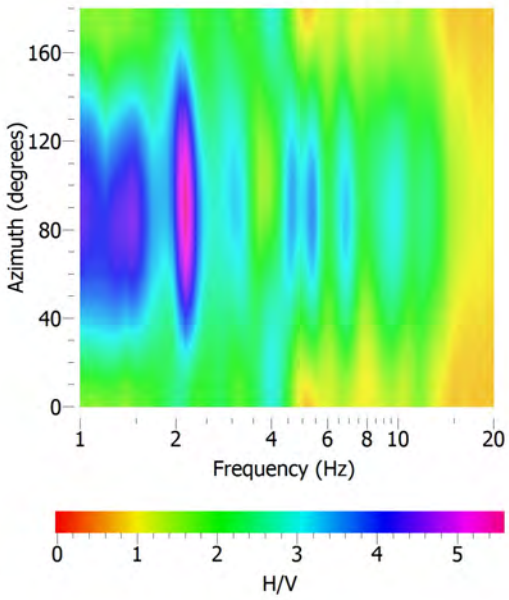
2) l'incremento della frequenza principale è pari a

$$\frac{2.40 - 2.15}{2.15} = 0.116 \;\; \Rightarrow \;\; +11.6\%$$

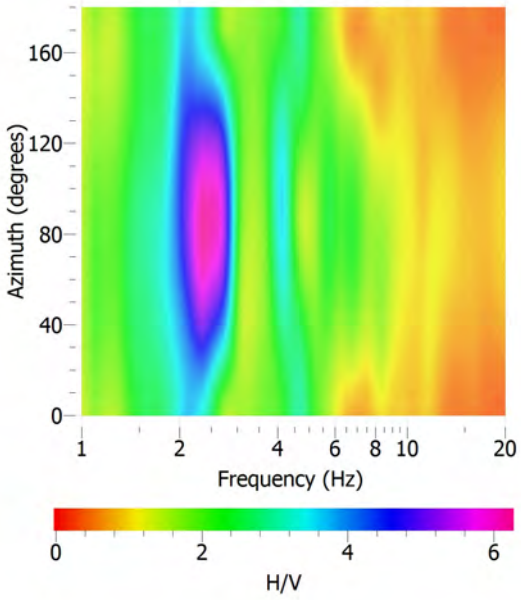
Rammentando le peculiarità di un oscillatore elementare, tale variazione di frequenza, sia pure considerando l'apporto di materiale per le lavorazioni (ossia un incremento di massa), significa sostanzialmente un incremento di rigidezza del sistema.

Tenendo presente che i lavori eseguiti non hanno comportato variazioni della geometria della dislocazione delle pareti, né la loro sostituzione o la sostanziale variazione della consistenza meccanica, questo incremento di rigidezza è da ricercare nel miglioramento del comportamento scatolare.

Nel seguito si espongono i risultati dell'elaborazione "H/V rotate" (lo strumento di misura è stato posizionato con l'asse Nord parallelo allo sviluppo del muro centrale; nell'elaborazione tale direzione ha angolo 0°)



21/05/2015 – **prima**



23/07/2015 – **dopo**

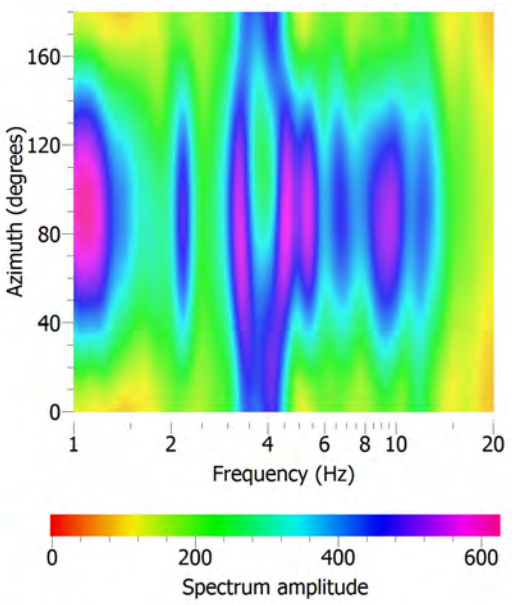
Note di elaborazione:

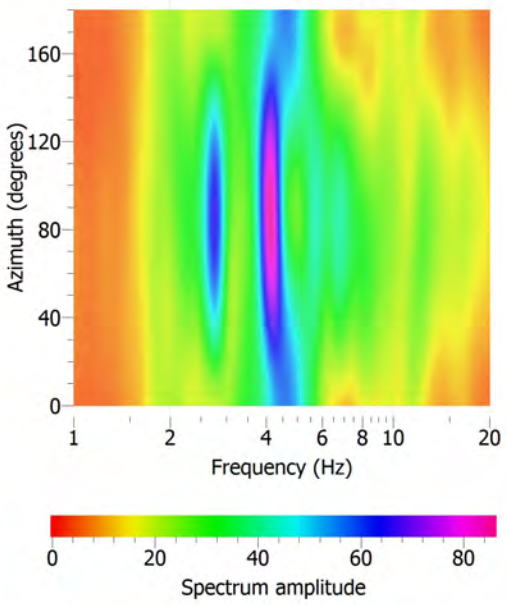
prima - finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **86%**, n° finestre 10 – 10 – 10

dopo - finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **16%**, n° finestre 15 – 15 – 15

Si può notare la migliore identificazione delle frequenze dopo l'intervento e che il valore della frequenza principale è nella direzione perpendicolare al muro centrale.

In termini di composizione del segnale dei 2 canali orizzontali (Nord e Est, nel piano dell'edificio) si espongono i risultati dell'elaborazione "Spectrum rotate". Si annota che il segnale elaborato deve essere equalizzato per tenere conto del comportamento dei geofoni alle basse frequenze





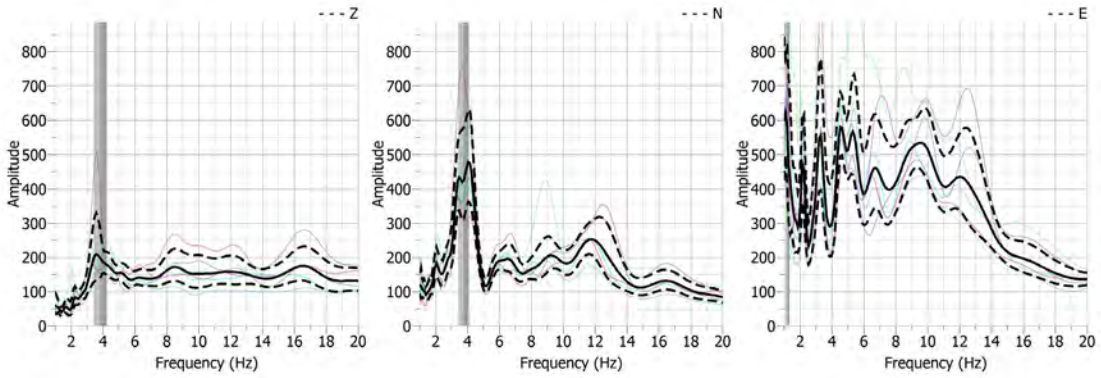
21/05/2015 – **prima** 23/07/2015 – **dopo**

Note di elaborazione:

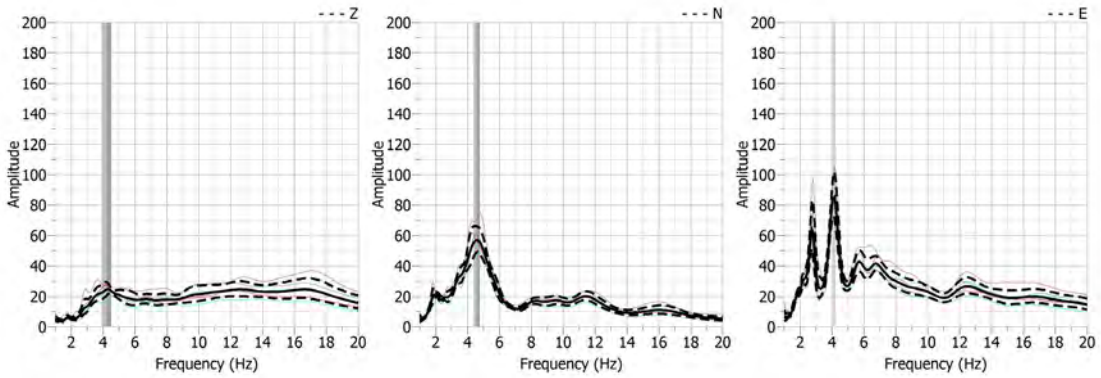
prima - finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **41%**, n° finestre 11 – 11 – 11

dopo - finestre da 20s a 40s, bad sample threshold **15%**, n° finestre 12 – 12 – 12

In termini di analisi spettrale dei singoli 3 canali si espongono i risultati dell'elaborazione "Spectrum". Anche in questo caso il segnale elaborato deve essere equalizzato



21/05/2015 – **prima**



23/07/2015 – **dopo**

Note di elaborazione: *come le precedenti*

Dalle elaborazioni illustrate si può notare la variazione del comportamento sul canale Est (direzione perpendicolare al muro centrale).

Per quanto attiene il valore della frequenza del periodo principale si annota che la relazione semplificata proposta dal D. M. Inff. 14/01/2008 “Norme tecniche per le costruzioni” non è applicabile. L’edificio in questione presenta irregolarità in pianta ed in altezza: non tutti i maschi murari si sviluppano con continuità dalla fondazione alla copertura (nel caso qui illustrato si vedano le piante architettonica del 2° piano e strutturale del solaio sul 1° piano, illustrate in precedenza) e i diversi edifici, che compongono il complesso immobiliare, hanno diverso numero di piani in elevazione con continuità di sviluppo in pianta delle murature ai piani comuni.

Tale situazione è ben illustrata in un articolo, reperibile in internet, “Valutazione del periodo proprio degli edifici nell’area di Catania”, Lombardo – Rigano – Muzzetta – Grasso, 2008, relativamente al confronto tra la formula semplificata prevista dalla norma, altre reperibili in letteratura e l’analisi di rapporti spettrali H/V per edifici in muratura isolati o meno.

Occorre altresì precisare che la citata Normativa pone l’attenzione sul problema degli edifici in aggregato, attestando che i metodi di verifica di uso generale per gli edifici di nuova costruzione possono non essere adeguati (par. 8.7.1).

Quindi nell’ottica di un intervento di miglioramento il confronto tra le situazioni ante e post operam consente un giudizio sul conseguimento dell’obiettivo prefisso in progetto. La valutazione della singola situazione deve essere vista nell’ambito dell’analisi del complesso del manufatto al fine di individuare l’Unità Strutturale. Ma questo esula dagli scopi della presente nota di carattere sperimentale.

5.1 – Analisi tempo – frequenza

Tutte le elaborazioni finora svolte fanno uso della trasformata di Fourier, utile strumento per analizzare le componenti di frequenza di un segnale.

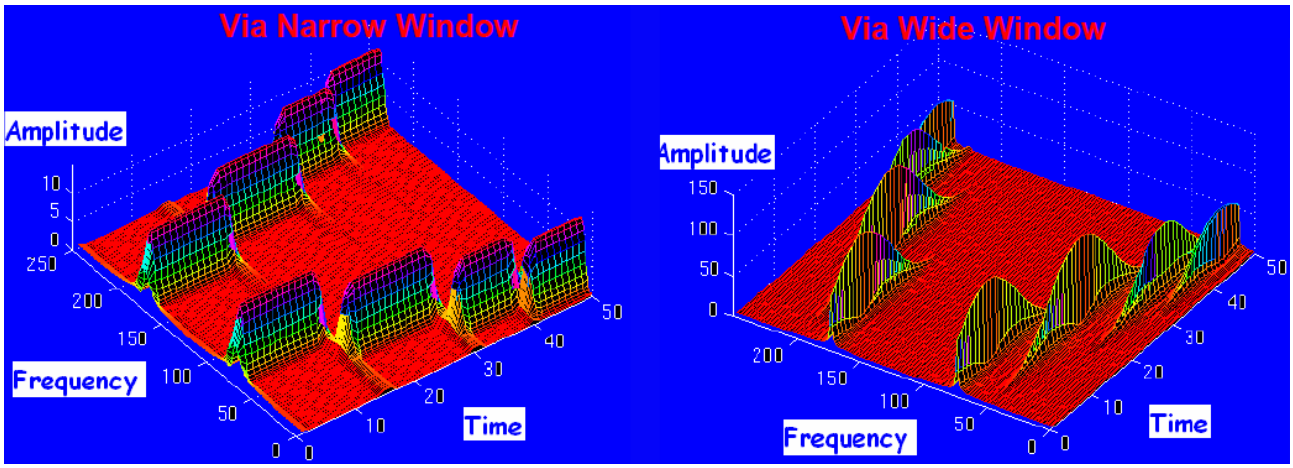
Però occorre fare una considerazione sull’utilizzo di tale strumento matematico: se si prende la trasformata di Fourier sull’intero asse del tempo non è possibile stabilire in quale momento sorge una particolare frequenza. Quindi la Trasformata di Fourier fornisce una misura media del peso delle diverse frequenze nel segnale in esame in tutta la sua durata.

La Trasformata di Fourier a tempo breve (Short Time Fourier Transform) fa uso di una operazione di *windowing* sul segnale. Ossia, riducendo l'intervallo di durata del segnale, si calcola localmente lo spettro e si può avere una idea del contenuto spettrale del segnale in esame relativamente al particolare intervallo di tempo.

Geopsy consente di operare anche con questa tecnica: definendo uno specifico intervallo di tempo, si eseguono le solite finestrature locali, magari facendo uso di un parziale accavallamento (overlap) per ottenere una descrizione più graduale e meglio interpolata dello spettro.

Inoltre, sempre in tema di Trasformata di Fourier, l'applicazione di questo strumento matematico ad uno stesso segnale una volta percorrendo l'asse dei tempi da sinistra a destra e una volta in modo contrario conduce al medesimo risultato.

Comunque esiste un problema di risoluzione: ridotte finestre sull'asse dei tempi comportano scarsa risoluzione in termini di frequenza e viceversa finestre di dimensione maggiore comportano un intervallo di tempo più ampio, cioè perdita di risoluzione su questo asse, malgrado la migliore informazione in termini di frequenza.

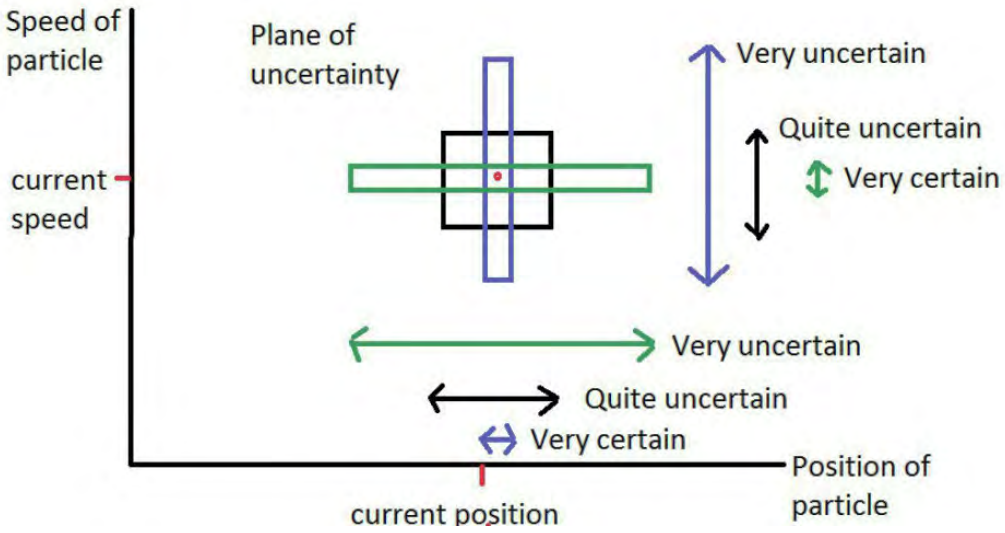


esempi di risoluzione tempo – frequenza
tratto da "Introduction to wavelet", Fengxiang Qiao, Texas Southern University

Quanto espresso è un noto principio della meccanica quantistica, noto come principio di indeterminazione di Heisenberg, che stabilisce i limiti della conoscenza dei valori che grandezze fisiche assumono contemporaneamente in un sistema fisico. In termini più generali, quando due grandezze fisiche, dette "osservabili fisiche", non possono essere misurate entrambe nello stesso momento sono dette "incompatibili". E poiché il principio di indeterminazione esprime l'impossibilità di determinare contemporaneamente con

precisione i valori di variabili incompatibili, l'osservatore dovrà scegliere quale misura privilegiare e disporre gli strumenti di conseguenza.

In figura viene riportato un grafico che sintetizza l'applicazione del principio di indeterminazione



tratto da https://georgemdallas.wordpress.com/2014/05/14/wavelets-4-dummies-signal-processing-fourier-transforms-and-heisenberg/

La posizione della sfera è riportata sull'asse delle ascisse e la sua velocità sull'asse delle ordinate. Il punto rosso indica la velocità effettiva e la sua posizione nel grafico, ma si può vedere che è circondato da aree delimitate (ossia caselle). Tali caselle rappresentano l'incertezza che si ha su un certo valore. Ogni casella ha la stessa area delle altre. Poiché l'area rappresenta l'incertezza sulla velocità / posizione, ne consegue che vi è sempre una quantità minima di incertezza nella misurazione dei due valori. Per esempio, la casella blu è alta e stretta. Il fatto che sia sottile intorno alla posizione della sfera indica che questa misura è abbastanza certa della posizione. Tuttavia, affinché la casella mantenga la stessa area delle altre, deve svilupparsi lungo l'asse delle ordinate, il che indica che non c'è certezza sul valore della velocità. L'area della casella rappresenta la quantità di incertezza di una misura e tale quantità di incertezza è anche chiamata *risoluzione* della misura.

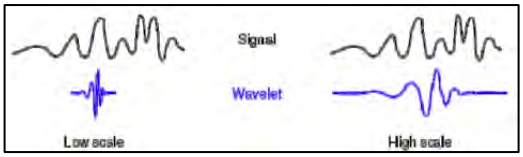
Una soluzione alla questione della rappresentazione tempo – frequenza è la Trasformata Wavelet. Con questa tecnica, dovuta a Morlet e Grossman, il segnale viene elaborato mediante l'utilizzo di una forma d'onda oscillante di lunghezza finita e decadimento rapido, anche nota come "wavelet madre". La peculiarità di tale trasformazione è quella di

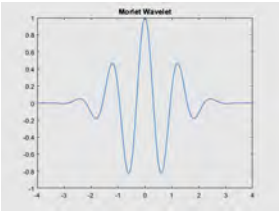
consentire una rappresentazione in tempo – frequenza, fermo restando il principio di indeterminazione.

Geopsy è un ambiente di analisi molto potente, che consente di svolgere anche elaborazioni in tempo – frequenza mediante il Time Frequency Analysis toolbox (TFA) che fa uso della "wavelet madre" di Morlet. Maggiori informazioni si possono trovare sulla tesi di dottorato di Miriam Kristekova (http://www.quest-itn.org/library/software/time-frequency-signal-analysis), che ha contribuito allo sviluppo del plugin *geopsytfa* per Geopsy.

Il toolbox trasforma il segnale mediante una wavelet di Morlet modificata, che ha l'espressione

$$M(f) = \frac{1}{\pi^{\frac{1}{4}}} e^{-w_0^2(\frac{f}{f_i}-1)^2 m}$$





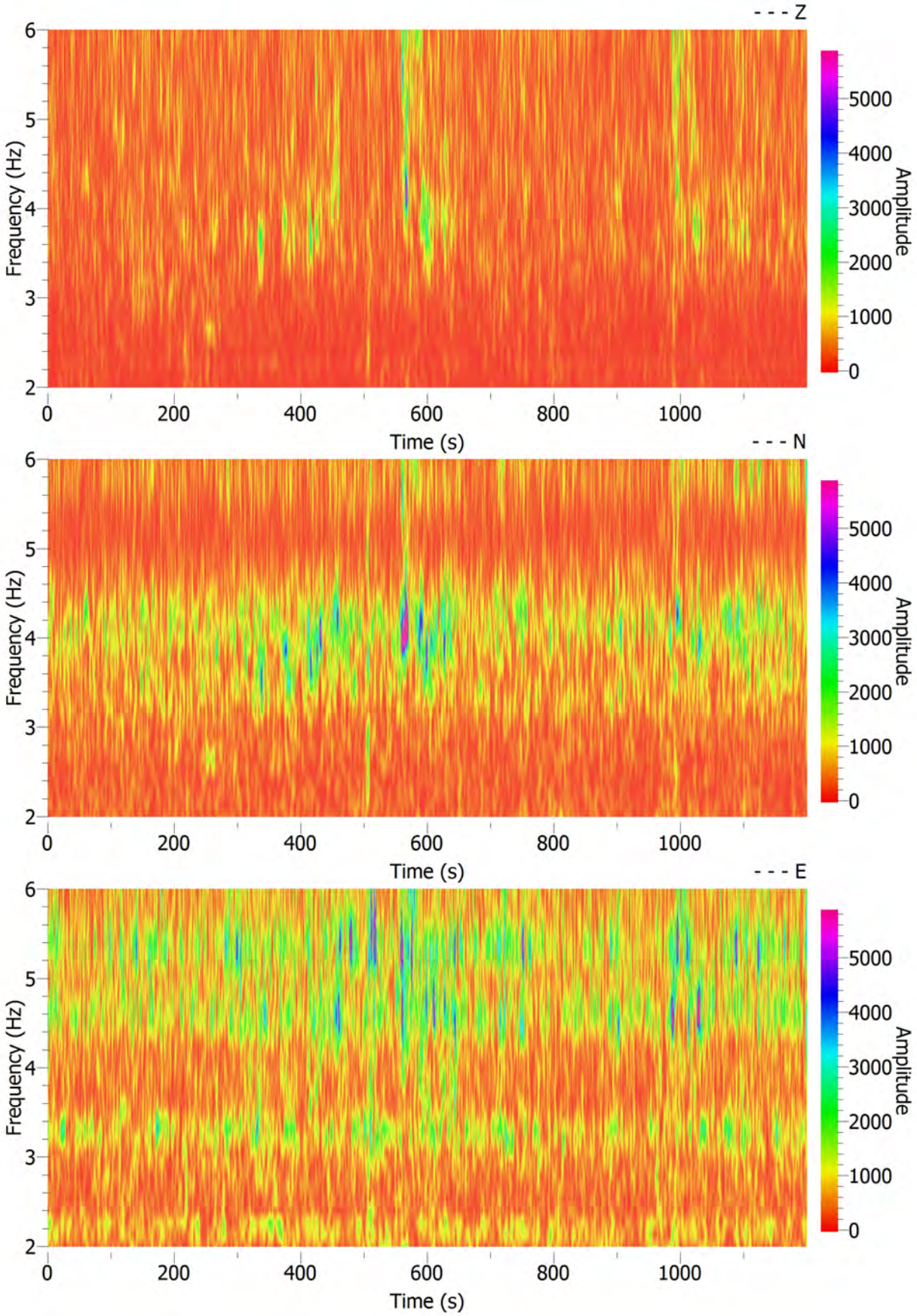
dove **fi** è la frequenza centrale e **m** è un parametro (**m** grande significa maggiore risoluzione in termini di frequenza, **m** piccolo maggiore risoluzione in termini di tempo.)

Nel seguito si espongono le elaborazioni svolte utilizzando il toolbox TFA, al fine di mettere in evidenza le caratteristiche dei segnali prima e dopo l'intervento di consolidamento.

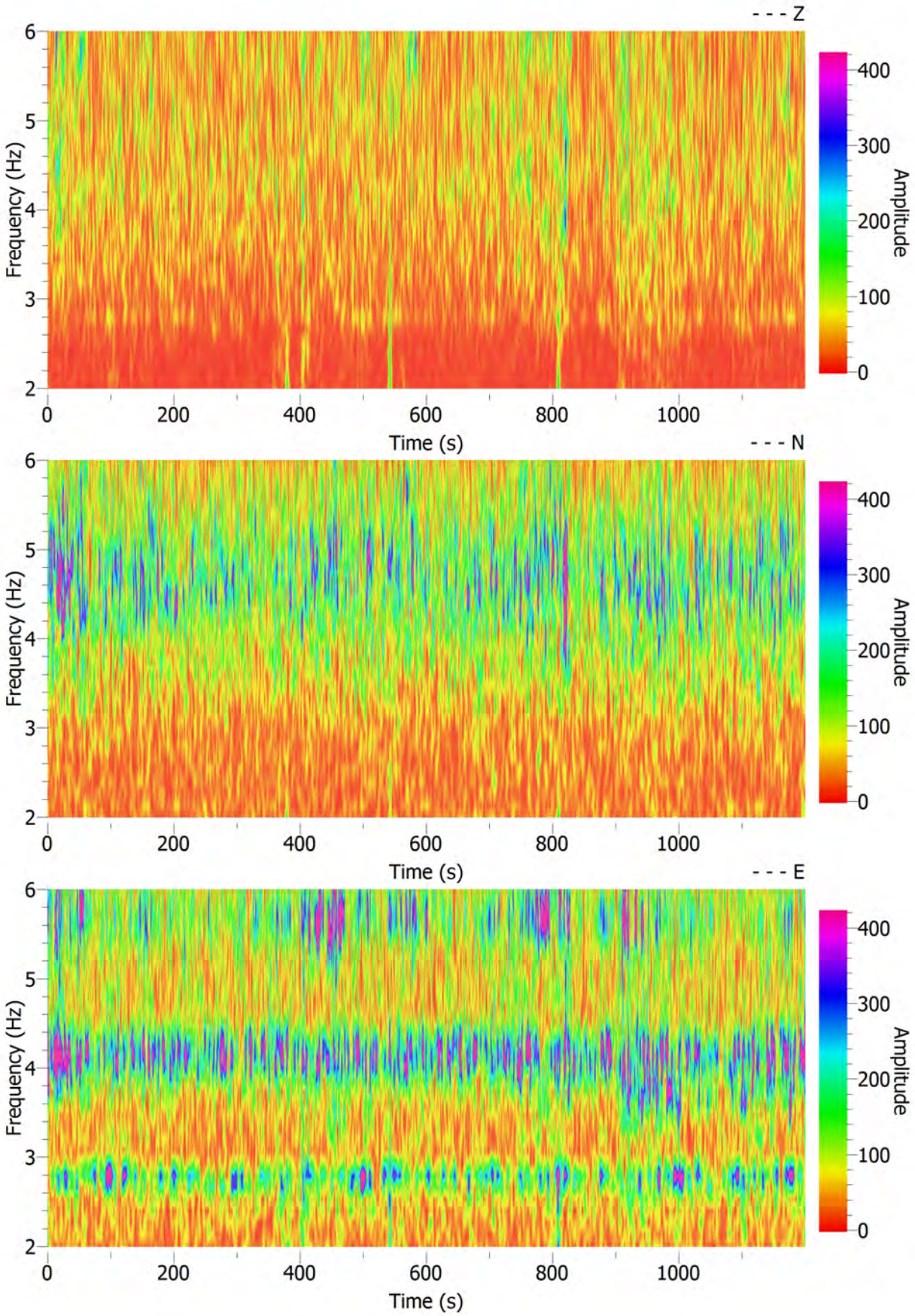
Dato che l'analisi si svolge relativamente ad ogni singolo canale, il segnale deve essere equalizzato. L'intervallo di frequenze va da 2Hz a 6Hz, in modo da visualizzare la risposta del sistema in relazione alla frequenza principale. Il numero di suddivisioni lineari di tale intervallo è pari a 31. I parametri della "wavelet madre" sono indicati in tabella

m	**fi** [Hz]	Δt – scala di tempo	Δf – scala di frequenza
10	4	0.755	0.105
1	4	0.239	0.333
100	4	2.387	0.033

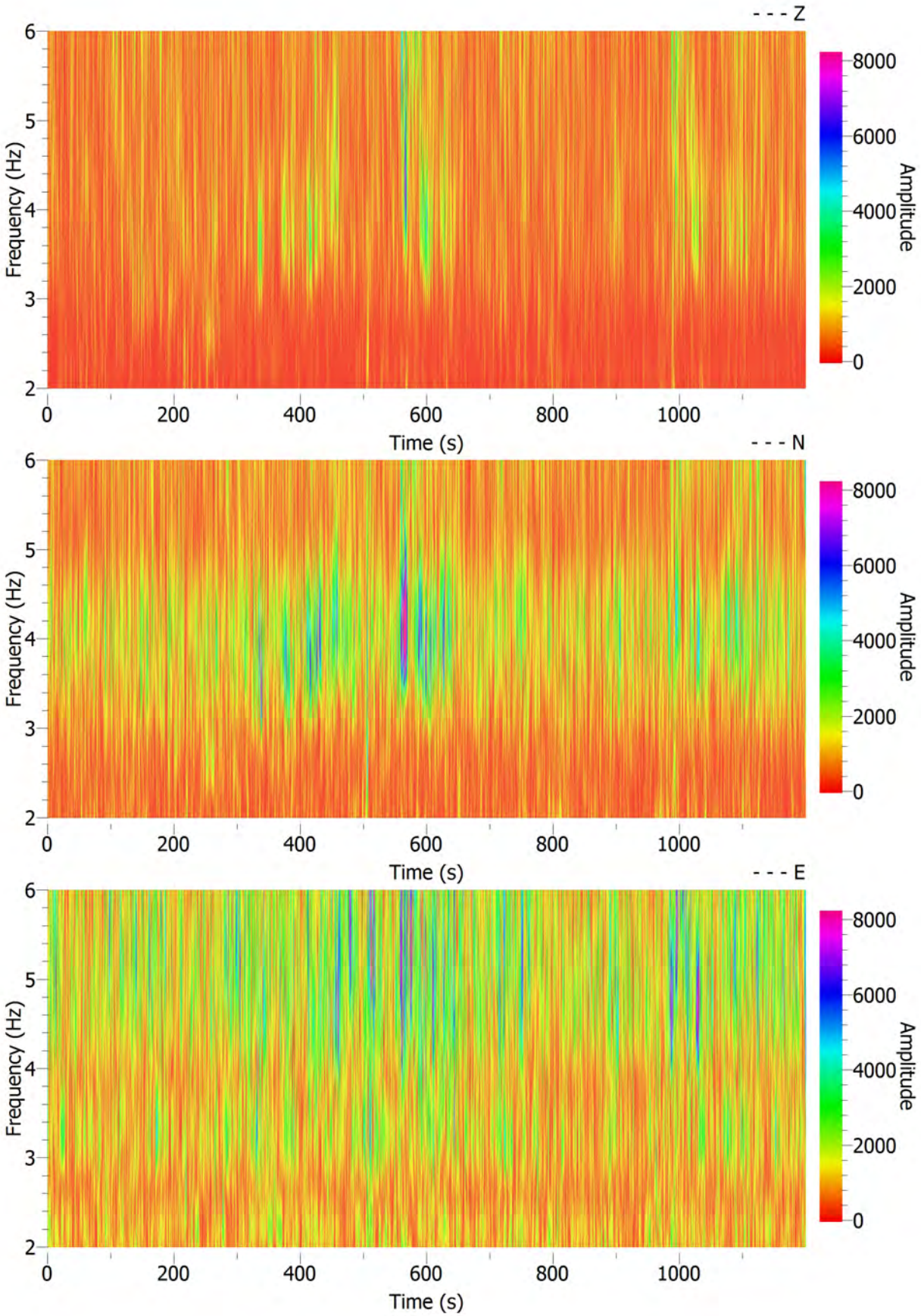
Tutti i grafici sono rapportati al medesimo asse dei tempi (metà del totale) e nell'ambito della singola analisi relativa allo stesso giorno i 3 segnali sono confrontati con la medesima legenda a colori.



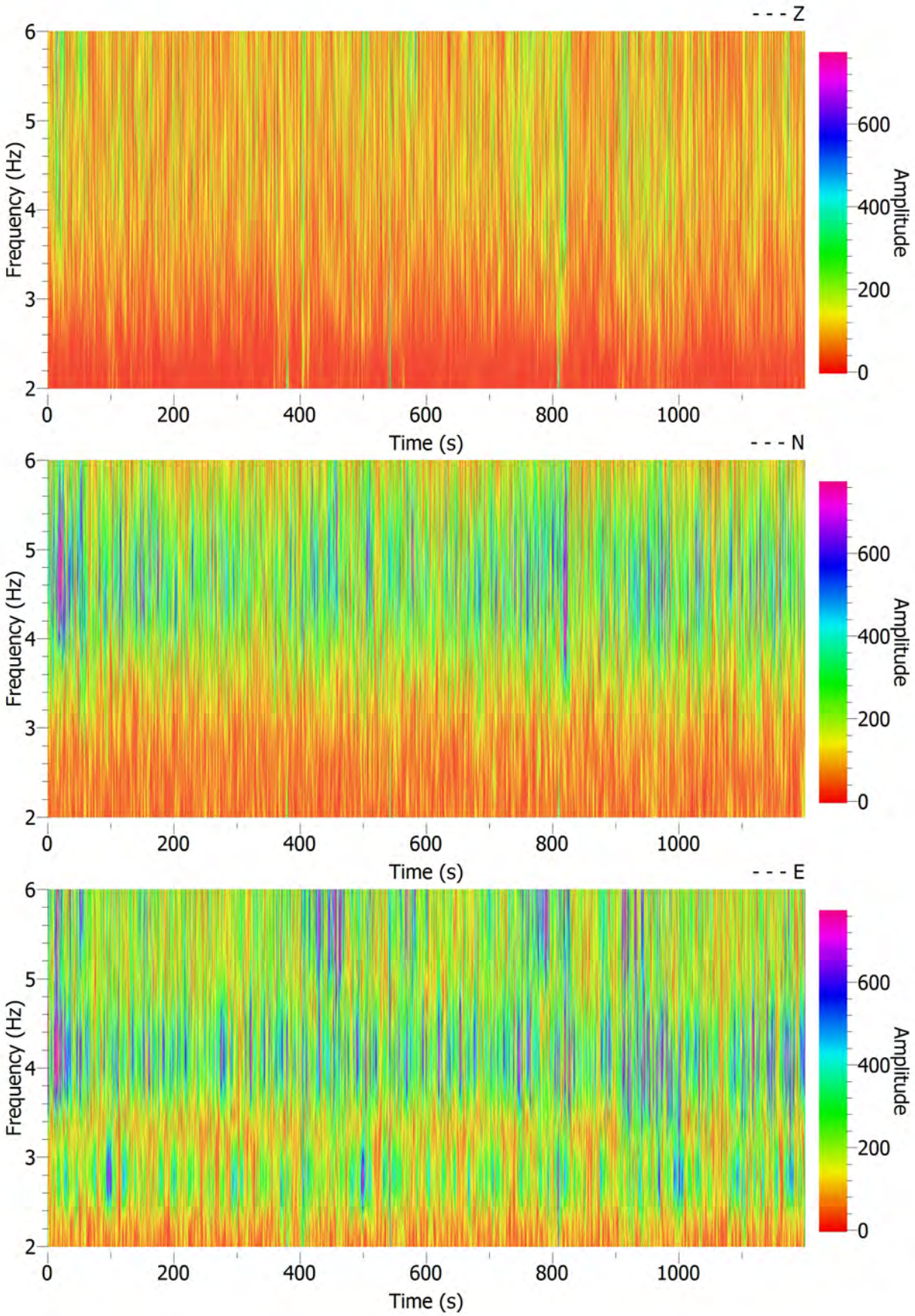
21/05/2015 – prima dell'intervento – m 10, fi 4 Hz



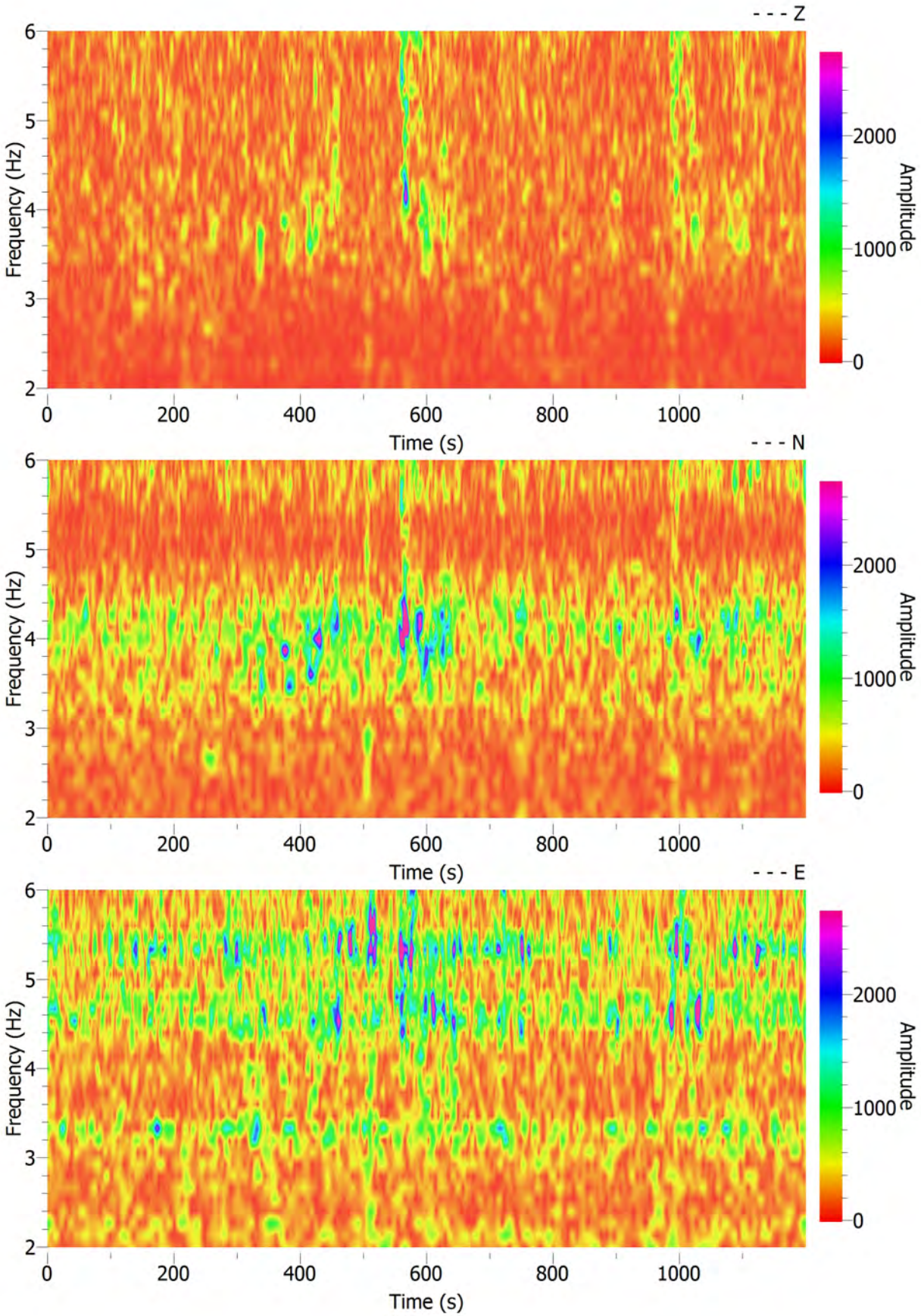
23/07/2015 – dopo l'intervento – m 10, fi 4 Hz



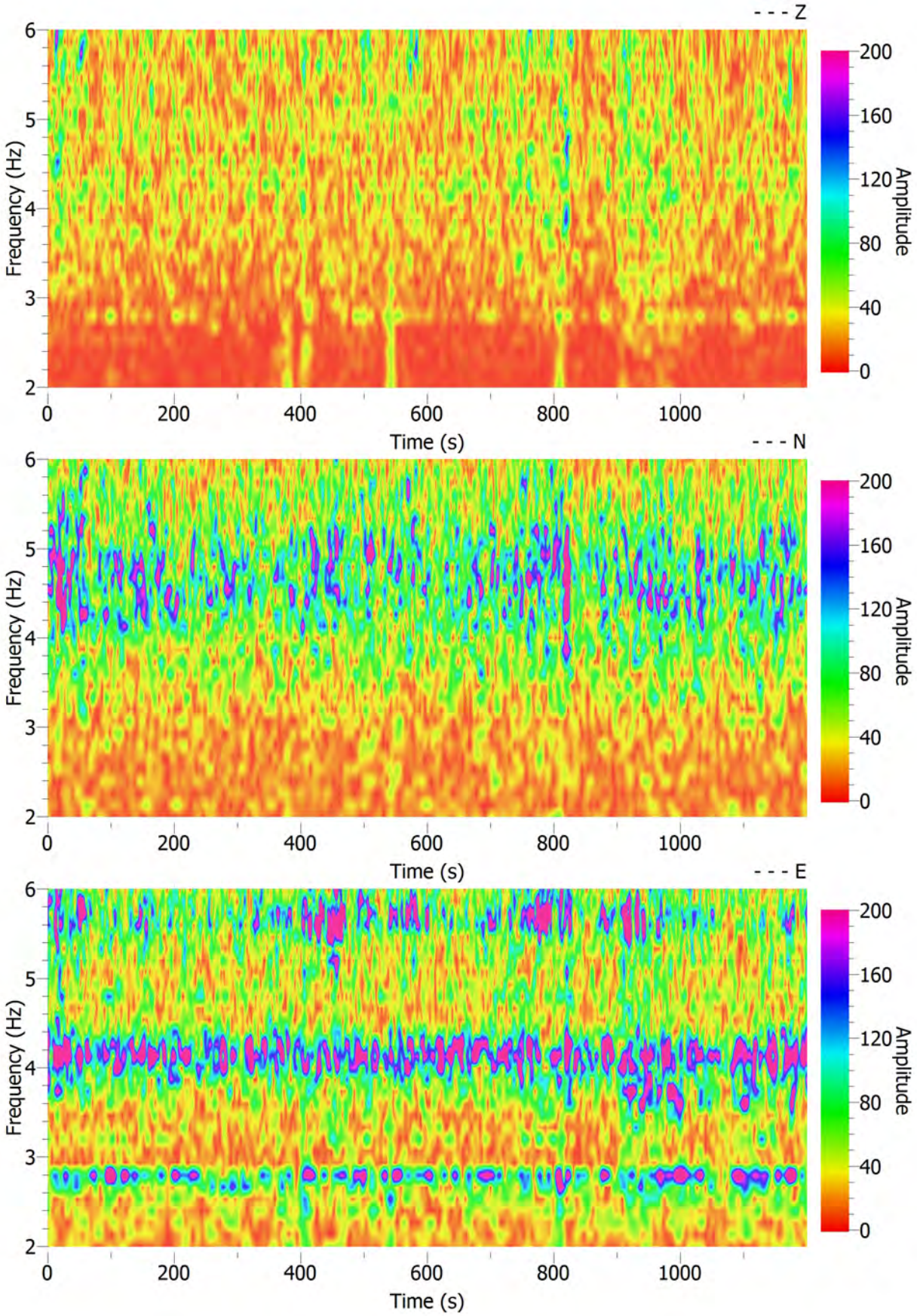
21/05/2015 – prima dell'intervento – m 1, fi 4 Hz



23/07/2015 – dopo l'intervento – m 1, fi 4 Hz



21/05/2015 – prima dell'intervento – m 100, fi 4 Hz



23/07/2015 – dopo l'intervento – m 100, fi 4 Hz

Grazie al parametro **m** si riesce a focalizzare meglio il valore della frequenza, sia pure a discapito di una collocazione temporale precisa.

Anche con queste elaborazioni si riescono a mettere in evidenza:

- la diversità di comportamento tra il prima e il dopo l'intervento, con una migliore identificazione a interventi avvenuti;
- i valori di frequenza sui canali Est e Nord, da correlare ai risultati dell'analisi H/V mostrati in precedenza;
- la presenza in un sufficientemente definito intervallo di tempo delle varie frequenze.

Grazie per l'attenzione.