

Attività sperimentali per  
l'implementazione del  
monitoraggio sismico di  
edifici pubblici nella  
Regione Marche

# Quaderni di Geofisica



# 127



# Quaderni di Geofisica

## **Direttore Responsabile**

Stefano Gresta

## **Editorial Board**

Luigi Cucci - Editor in Chief (INGV - RM1)

Andrea Tertulliani (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (INGV - RM1)

# Attività sperimentali per l'implementazione del monitoraggio sismico di edifici pubblici nella Regione Marche

## Experimental activities for the implementation of seismic monitoring of public buildings in Marche region

Chiara Ladina<sup>1</sup>, Simone Marzorati<sup>1</sup>, Massimo Frapiccini<sup>1</sup>, Giancarlo Monachesi<sup>1</sup>, Marco Cattaneo<sup>1</sup>, Mario Paratore<sup>2</sup>, Francesca Sini<sup>3</sup>, Maurizio Ferretti<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

<sup>2</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo)

<sup>3</sup>Regione Marche (Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile)

# Attività sperimentali per l'implementazione del monitoraggio sismico di edifici pubblici nella Regione Marche

**N**ell'ambito delle attività di collaborazione tra il Centro Funzionale del Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile della Regione Marche (DPISPC) e la Sede di Ancona dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) è stato avviato un progetto pilota per il monitoraggio sismico di edifici pubblici.

L'obiettivo del progetto è quello di completare le schede di vulnerabilità con ulteriori informazioni relative alle caratteristiche vibratorie dell'edificio e del suolo su cui poggia oltre alla raccolta di informazioni relative agli eventi che vengono ricavate dalle registrazioni degli strumenti installati alla base delle strutture.

Le attività sono state svolte per 11 siti nel territorio della Regione Marche in cui sono già presenti accelerometri permanenti alla base di edifici pubblici dove sono state svolte misure temporanee di rumore sismico ambientale, sia all'interno che all'esterno degli edifici.

In particolare utilizzando tecniche di analisi spettrale, sono state stimate le frequenze e le direzioni dei picchi spettrali principali di vibrazione degli edifici. L'analisi direzionale è risultata utile per interpretare la morfologia irregolare di alcuni picchi spettrali risultanti dall'analisi standard ottenuta con la composizione delle componenti orizzontali del moto.

Le informazioni raccolte, abbinate alla classificazione geologica e morfologica dei siti, migliorano le conoscenze relative alla risposta sismica delle strutture. Inoltre, l'approccio utilizzato verrà posto come paragone rispetto ad altri casi di studio in cui il monitoraggio sismico di singole strutture viene svolto con ingenti risorse strumentali e di calcolo che permettono precisi e dettagliati risultati ma che risulta di difficile diffusione sul territorio.

**T**his paper describes a pilot project for the seismic monitoring of public buildings proposed by the Functional Centre of the Security Integrated Policies and Civil Protection Department - Marche Region (DPISPC) and the Ancona branch of National Institute of Geophysics and Vulcanology (INGV).

The aim of the pilot project is to associate to vulnerability profile more information about vibrational characteristics of the building and subsoil, in addition to the seismic instrumental history that describe the seismic shaking at the base of the structure. To start the pilot project with the available resources, 11 sites in the Regione Marche were identified where there are already permanent accelerometers at the base of public buildings and temporary measurements of ambient seismic noise were carried out, both inside and outside the structures.

Frequencies and directions of the main spectral peaks of vibration of buildings were estimated, using spectral analysis techniques. The directional analysis was useful for interpreting the irregular morphology of some spectral peaks resulting from the standard analysis obtained with the composition of the horizontal components of motion.

The collected information, combined with the geological and morphological classification of the sites, provide knowledge about seismic response of structures. Moreover, this approach will be compared to other case studies in which the seismic monitoring of individual structures is carried out with large instrumental and computational resources that allow precise and detailed results but difficult to largely apply on the territory.

## Introduzione

Grazie alla collaborazione tra la Sede di Ancona - INGV e il Centro Funzionale del Dipartimento per le Politiche Integrate di Sicurezza e per la Protezione Civile della Regione Marche (DPISPC), è nata l'idea di avviare il monitoraggio sismico di edifici pubblici. L'occasione per intraprendere tale tipo di attività è stata fornita dal Progetto Holistic (codice progetto n. 1°st/0001), cofinanziato dall'Unione Europea - Instrument for Pre-Accession Assistance (IPA Adriatico di cooperazione transfrontaliera). Nell'ambito delle attività relative al WP9 ("Valutazione del rischio sismico per edifici strategici, prevenzione e monitoraggio") nasce il progetto pilota per il monitoraggio sismico di edifici pubblici. Le attività del progetto hanno riguardato la definizione di strategie per la valutazione della vulnerabilità degli edifici, attraverso l'implementazione di tecnologie che permettano di monitorare nel tempo i possibili cambiamenti nelle caratteristiche strutturali degli edifici in zone sismiche ed organizzare le informazioni relative alle strutture (ad esempio stato strutturale dell'edificio ed analisi sismologiche post evento) in database consultabili. Tramite l'utilizzo di schede tecniche compilabili attraverso mobile devices, operatori sul campo potranno aggiornare periodicamente le informazioni relative all'identificazione dell'edificio, al tipo e ai materiali di costruzione, agli eventi naturali sofferti dalla struttura, allo stato delle varie componenti dell'edificio.

In più, alcuni *partners*, tra cui DPISPC e la Sede di Ancona - INGV, hanno proposto un monitoraggio sismico degli edifici utilizzando sia strumentazione sismica permanente che temporanea. Per la strumentazione permanente è stato proposto di utilizzare le registrazioni di accelerometri installati alla base degli edifici per rilevare le accelerazioni al suolo durante significativi eventi sismici e per poter individuare eventuali variazioni nella risposta dell'interazione suolo-struttura, indice di possibile modificazione dello stato dell'edificio. Inoltre, attraverso indagini speditive compiute con stazioni sismiche temporanee in grado di registrare rumore sismico ambientale, è stato proposto di raccogliere alcune caratteristiche vibratorie degli edifici, utili per iniziare a comprendere il comportamento dinamico delle strutture.

Per il progetto pilota, è stato scelto un approccio che permettesse con le poche risorse a disposizione di aumentare la conoscenza di più siti possibili. La strategia utilizzata si pone agli antipodi rispetto un monitoraggio sismico massivo degli edifici, in cui vengono ottenuti precisi e dettagliati risultati sulle caratteristiche vibratorie delle strutture ma con l'utilizzo di ingenti risorse strumentali e capacità di calcolo, che non ne permettono una capillare diffusione sul territorio.

La Sede di Ancona - INGV gestisce 11 stazioni accelerometriche installate all'interno di edifici pubblici, appartenenti alla Rete Sismometrica dell'Italia Centro Orientale [ReSIICO; Monachesi et al., 2013] i cui dati in tempo reale

vengono acquisiti nella sala operativa della Sede di Ancona - INGV ubicata all'interno del Centro Funzionale regionale. Il sistema automatico di monitoraggio permette di elaborare il segnale sismico in tempo reale e restituire ad esempio i parametri di picco come la PGA (*Peak Ground Acceleration*) registrati ad ogni stazione sismica in caso di evento sismico. Le attività sviluppate per il monitoraggio sismico degli edifici prevedono l'archiviazione dei valori di accelerazione al suolo registrate alla base degli edifici all'interno di un *database* utile per ricostruire la storia sismica strumentale della struttura, ovvero la severità del moto del suolo sofferta dalla struttura stessa nel corso del tempo.

In ogni sito degli edifici monitorati, è stata condotta una campagna di misure speditive per individuare le frequenze e le direzioni principali di vibrazione sia delle strutture sia dei suoli su cui sono fondate. Le indagini, utili per individuare possibili interazioni suolo-struttura che determinerebbero un aumento della vulnerabilità degli edifici in caso di evento sismico, sono state realizzate utilizzando la strumentazione della ReTe Sismica Mobile (Re. Mo.) del Centro Nazionale Terremoti (CNT) assegnata tramite la Commissione Rete Mobile INGV (Co. Re. Mo.) [Moretti et al., 2010].

Nei successivi paragrafi verranno descritte le attività svolte per implementare il monitoraggio degli edifici, la strumentazione utilizzata e alcuni risultati preliminari.

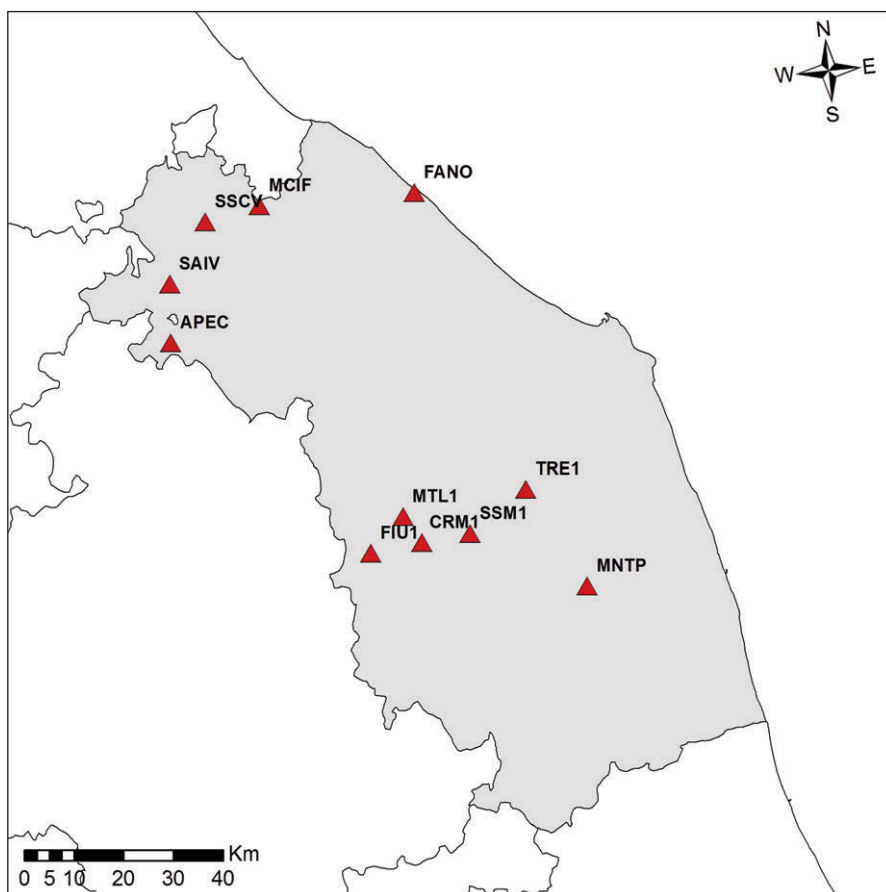
### 1. Stazioni accelerometriche all'interno degli edifici

Dal 2010, visto l'interesse della Regione Marche di avere una copertura accelerometrica a scala sovra-comunale, la Sede di Ancona - INGV ha potenziato l'azione di monitoraggio sismico sul territorio regionale, installando una prima serie di 9 stazioni accelerometriche nell'area della Comunità Montana di San Severino Marche [Monachesi et al., 2013]. Tra il 2012 e il 2013 tale azione è stata estesa anche alla Provincia di Pesaro-Urbino con l'installazione di altre 7 stazioni accelerometriche. Queste due aree sono state scelte perché per la quasi totalità dei siti era possibile collegare in trasmissione le stazioni remote alle già esistenti reti *wireless* dei Comuni le quali accedono alla dorsale regionale Wi-Fi Marche-Way sfruttando collegamenti radio, con un notevole risparmio di risorse. Grazie alla presenza di queste infrastrutture è stato possibile centralizzare ed acquisire i segnali accelerometrici all'interno della ReSIICO.

Dovendo collegarsi fisicamente alla rete della Comunità Montana e a quelle dei Comuni, le stazioni accelerometriche sono state installate in gran parte alla base degli edifici pubblici dov'era presente una presa di rete *ethernet*. I siti in cui gli accelerometri sono installati alla base di edifici pubblici sono 11 (Figura 1 e Tabella 1).

Le stazioni accelerometriche sono dotate di acquirente GAIA2 [Rao et al., 2010], sviluppato e realizzato all'interno del Laboratorio di Sismologia del CNT, e di un accelerometro Colybris SF3000L [http://www.colibris.com]. I Colybris sono accelerometri di tipo MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), con un'elevata dinamica, alto guadagno e ridotto rumore strumentale; nonostante questo hanno ancora un costo economico contenuto. Precedentemente all'acquisto, i sensori accelerometrici sono stati testati comparandoli con gli Episensor FBA ES-T [http://www.kinematics.com], utilizzati come *standard* della Rete Sismica Nazionale INGV [Monachesi et al., 2013; Amato and Mele, 2008]. I *tests* hanno mostrato prestazioni tali da risultare idonei per gli obiettivi di monitoraggio richiesti.

L'accelerazione del suolo è registrata in continuo, i dati vengono inviati in tempo reale al centro di acquisizione della Sede di Ancona - INGV e parallelamente sono memorizzati in locale su una *compact flash* all'interno dello strumento, con un passo di campionamento di 200 *sps*.



**Figura 1** Mappa delle stazioni sismiche dotate di un accelerometro installato alla base di edifici pubblici.  
**Figure 1** Map of seismic stations equipped with an accelerometer installed at the base of public buildings.

Comune	Sigla stazione	Longitudine	Latitudine	Num misure
Apecchio	APEC	12.419910	43.558460	3
Castelraimondo	CRM1	13.058016	43.210083	2
Fano	FANO	13.018354	43.843471	3
Fiuminata	FIU1	12.931604	43.188572	2
Montecalvo in Foglia	MCIF	12.631683	43.811584	3
Montappone	MNTP	13.469252	43.137378	3
Matelica	MTL1	13.009601	43.256733	3
Sant'Angelo in Vado	SAIV	12.413039	43.664822	3
Sassocorvaro	SSCV	12.497462	43.779804	3
San Severino Marche	SSM1	13.176956	43.228783	2
Treia	TRE1	13.312848	43.311199	3

**Tabella 1** Sigle e coordinate di localizzazione dei siti e numero di misure temporanee eseguite per ciascun sito.  
**Table 1** Abbreviations and coordinates of sites location and number of temporary measures performed for each site.



**Figura 2** Esempi di installazione di accelerometri alla base degli edifici. Sinistra: accelerometro fissato alla pavimentazione al piano terra dell'edificio (stazione di TRE1). Destra: accelerometro installato in pozzetto (stazione SSM1).

**Figure 2** Examples of accelerometers installation at the base of the buildings. Left: accelerometer fixed to the floor of the building (TRE1 station). Right: accelerometer installed in the well (SSM1 station).

Dove possibile, le stazioni accelerometriche sono state installate nei locali interrati o semi-interrati, oppure al pian terreno cercando di evitare la presenza di vuoti al di sotto della pavimentazione (Figura 2, sinistra). Nel caso di San Severino Marche, l'accelerometro è stato installato in un pozzetto nel cortile interno dell'edificio comunale vicino ad una parete della struttura (Figura 2, destra). Tutti gli accelerometri sono stati fissati al terreno. In ogni sito è stato trovato il modo di installare esternamente l'antenna GPS per la sincronizzazione del segnale registrato. Tutte le stazioni sono alimentate dalla linea di corrente elettrica a 220V e protette da differenziali montati all'interno di un contenitore stagno (IP33) che in alcuni casi ospita anche l'acquisitore GAI2.

## 2. Campagna di misure di rumore sismico ambientale

Negli 11 siti coinvolti nel monitoraggio degli edifici sono state svolte misure di rumore sismico ambientale utili per la stima delle caratteristiche vibratorie degli edifici e per una miglior interpretazione delle tracce accelerometriche registrate dalle stazioni permanenti.

L'obiettivo principale delle misure temporanee era quello di estrarre informazioni dal rumore sismico relativamente ai modi fondamentali di vibrazione dell'edificio nel punto dell'edificio in cui è installata la stazione accelerometrica. Per questo motivo è stata eseguita almeno una misura ad un piano elevato dell'edificio quando non era possibile all'ultimo piano, ma sempre sulla verticale dell'accelerometro. Le oscillazioni laterali dell'edificio, per la sua elasticità, risultano sempre maggiori man mano che si sale verso l'apice della

struttura. Quindi, eseguendo misure ai piani elevati delle strutture, dal segnale di rumore sismico emergono le frequenze principali di vibrazione che risultano molto evidenti sulle componenti orizzontali del moto. In generale, le stazioni accelerometriche non sono in grado di rilevare le caratteristiche complete del rumore sismico di fondo in quanto la loro dinamica è regolata in modo da registrare correttamente forti terremoti; quindi, con l'obiettivo di caratterizzare anche le vibrazioni micrometriche nel punto esatto dov'è stato installato l'accelerometro, sono state eseguite misure speditive anche a fianco del sensore.

Altro obiettivo della campagna di misure era individuare possibili interazioni suolo-struttura. Durante l'occorrenza di terremoti, lo scuotimento del suolo in superficie può essere modificato in ampiezza, frequenza e direzione in dipendenza delle caratteristiche geotecniche e morfologiche del terreno, determinando un effetto di sito. Per aggiungere informazioni che potrebbero incidere sulla valutazione della vulnerabilità degli edifici, è utile stimare le caratteristiche di vibrazione del terreno soprattutto per quel che riguarda frequenza e direzione. Se queste si avvicinano a quelle dell'edificio, potrebbero innescarsi fenomeni di risonanza che indurrebbero le strutture ad oscillare oltre ciò che ci si aspetta rispetto al loro comportamento se fossero costruite su suolo rigido e piano. Quindi, per completare le indagini e dove l'assetto urbano permetteva di effettuare misure al di fuori degli edifici, sono stati acquisiti segnali di rumore da sensori posti sul suolo circostante esternamente alle strutture. L'ultima colonna di Tabella 1 indica il numero di misure speditive effettuate per ogni sito.

La campagna di misure è stata svolta dal mese di febbraio al mese di giugno 2014, utilizzando le stazioni della Re.Mo. del

Centro Nazionale Terremoti. Le stazioni sono dotate di un acquisitore Reftek-130A a 24 bit [http://www.reftek.com] e di un sensore velocimetrico Lennartz 3D/5s [http://www.lennartz-electronic.de]. La strumentazione è stata alimentata con batterie da 12V permettendo un facile trasporto. In Figura 3 è mostrato un esempio di registrazione di rumore sismico ambientale all'interno di un edificio. Le stazioni sono state configurate in laboratorio con un campionamento a 100 *sps*, una lunghezza dei *files* di registrazione di un'ora, *gain* 32 per avere massima risoluzione, *trigger* continuo. I tre canali sismici sono stati acquisiti su un unico *stream*. In molti casi si è scelto di orientare il sensore velocimetrico a tre componenti con il proprio asse Nord-Sud parallelamente all'asse longitudinale dell'edificio e con conseguente orientazione dell'asse Est-Ovest lungo quello trasversale dell'edificio; in questi casi l'orientazione dei due

sensori (velocimetro ed accelerometro) risulta essere indipendente. Rispetto al locale in cui è stata effettuata ogni misura, il sensore è stato sempre posizionato in posizione laterale vicino ad una delle pareti o in un angolo della stanza, in modo da attenuare gli effetti elastici di vibrazione verticale del piano di pavimentazione. Una volta posizionata la strumentazione pronta per la registrazione dei dati, viene avviata l'acquisizione attraverso un palmare connesso alla porta seriale dell'acquisitore; come controllo viene visualizzato il segnale nelle tre componenti per verificare il funzionamento degli strumenti.

La durata minima delle misure è stata di 30 minuti in modo da poter utilizzare un buon numero di finestre di segnale nelle successive analisi, tenendo anche conto che, essendo strutture pubbliche, il disturbo ambientale è elevato e le sorgenti di disturbo vicine. Per le misure esterne all'edificio, il sensore è stato riparato dagli agenti esterni, come il vento, tramite un cappuccio di materiale plastico. I dati sono stati memorizzati in locale su *compact flash* per poter essere recuperati alla fine degli esperimenti.

### 3. Caratterizzazione geologica e morfologica dei siti

Gli 11 siti indagati, come detto, appartengono alla ReSIICO per la quale è stata condotta un'attività di caratterizzazione siti tuttora in corso per i siti di recente installazione.



**Figura 3** Strumentazione utilizzata per le misure di rumore sismico ambientale all'interno degli edifici.

**Figure 3** Instruments used for seismic noise measurements inside buildings.

CAT	DESCRIZIONE
A	<u>ammassi rocciosi</u> affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $Vs_{30} > 800\text{m/s}$
B	<u>rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati</u> o terreni a grana fine molto consistenti con valori di $360\text{m/s} < Vs_{30} < 800\text{m/s}$
C	<u>depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati</u> o terreni a grana fine mediamente consistenti con valori di $180\text{m/s} < Vs_{30} < 360\text{m/s}$
D	<u>depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati</u> con valori di $Vs_{30} < 180\text{m/s}$
E	<u>terreni</u> dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $Vs > 800\text{m/s}$ )
S1	depositi di terreni caratterizzati da valori di $Vs_{30}$ inferiori a 100 m/s, che includono uno strato di almeno 8m di terreni a grana fine di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche
S2	depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti

**Tabella 2** Categorie di suolo dell'EuroCodice 8, CAT: categorie.  
**Table 2** Eurocode 8 soil categories, CAT: categories.



Le indagini condotte per il monitoraggio degli edifici sono quindi integrate e complementari alla più ampia caratterizzazione sismologica e geologica delle stazioni simiche.

Quindi, oltre alle analisi sismologiche, sono state raccolte informazioni sulla geologia di superficie attraverso cartografia tematica digitale e sono state definite le caratteristiche morfologiche, elaborando dati geografici digitali come il modello digitale del terreno (DTM) attraverso l'utilizzo di *Geographical Information Systems* (GIS) (Figura 4). L'insieme delle informazioni raccolte ha permesso di proporre una classificazione nelle diverse categorie di sito secondo l'Eurocodice 8 [ENV-98, 2002; OPCM, 2003] per le categorie di sottosuolo (Tabella 2) e le condizioni topografiche (Tabella 3).

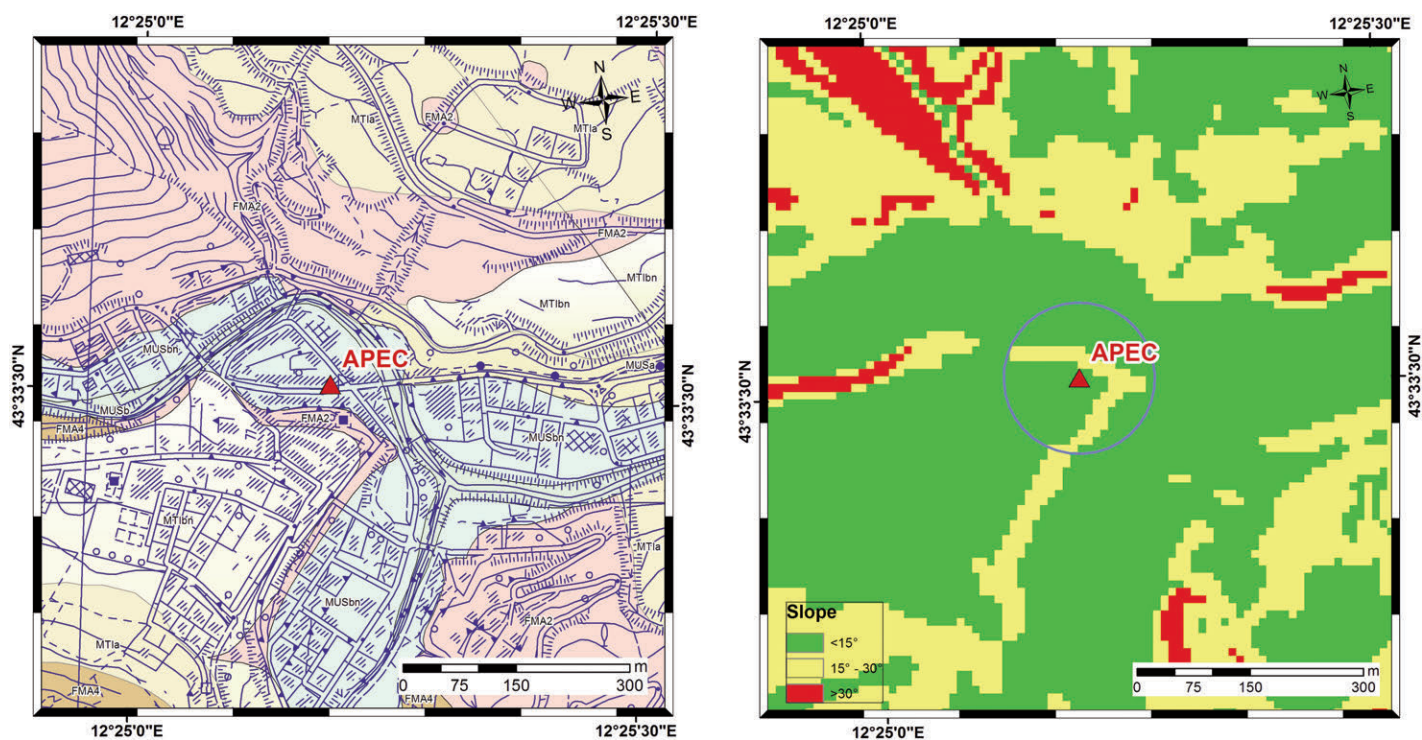
Per la caratterizzazione delle formazioni geologiche di superficie sono stati raccolti e organizzati i dati *raster* della cartografia digitale geologica alla scala di maggior dettaglio possibile. La cartografia geologica a disposizione è quella alla scala 1:10.000 e 1:100.000. Incrociando con un'operazione di *overlay* la mappa delle posizioni delle stazioni sismiche con quella della geologia, 10 delle 11 stazioni sono risultate all'interno della cartografia geologica alla scala 1:10.000, mentre per una sola stazione alla scala 1:100.000 (FANO).

Categoria	Descrizione
T1	superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$
T2	pendii con inclinazione media $> 15^\circ$
T3	rilievi con larghezza in cresta minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	rilievi con larghezza in cresta minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

**Tabella 3** Categorie topografiche dell'EuroCodice 8.  
**Table 3** Eurocode 8 topographic categories.

Per quanto riguarda la classificazione morfologica dei siti, sono state utilizzate tecniche avanzate di elaborazione del TINITALY/01 Dem a 10 metri di risoluzione per condurre un'analisi sulle pendenze e sulla presenza di creste topografiche nei dintorni delle stazioni. Per ogni sito è stato estratto il valore di pendenza della cella in cui ricade il punto stazione, incrociando la mappa stazioni con la *raster slope* ottenuto dal DTM e poi sono stati estratti i valori di pendenza in un raggio di 100 m intorno al punto stazione tramite l'utilizzo di *buffers* circolari; il campione di valori viene utilizzato per ottenere le percentuali di categorie di pendenza intorno alla stazione.

La presenza di creste morfologiche è stata ottenuta con il



**Figura 4** Esempio di cartografia geologica (sinistra) e mappa delle pendenze (destra) per la stazione APEC.  
**Figure 4** Example of geological (left) and slopes (right) map to the APEC station.

metodo *Identify ridgelines from a DEM* (<http://support.esri.com/en/knowledgebase/techarticles/detail/39093>) il quale sfrutta metodi di elaborazione digitale per l'idrogeologia.

I valori di pendenza e presenza di creste sono stati incrociati per ottenere una categoria topografica EC8 seguendo lo schema descritto in Pessina et al. [2014].

La Tabella 4 mostra le categorie di suolo e morfologiche abbinate ad ogni sito indagato.

Sito	EC8geol	EC8topo
APEC	C	T1
CRM1	C	T1
FANO	C	T1
FIU1	A	T2
MCIF	B	T2
MNTP	B	T2
MTL1	C	T1
SAIV	A	T1
SSCV	A	T2
SSM1	C	T1
TRE1	A	T3

**Tabella 4** Categorie di suolo (EC8geol) e morfologiche (EC8topo) secondo le classificazioni dell'EuroCodice 8 di Tabella 2 e 3.

**Table 4** Soil (EC8geol) and morphological (EC8topo) categories according to the classifications of Eurocode 8 of Table 2 and 3.

#### 4. Analisi dei dati di rumore sismico ambientale

Le registrazioni di rumore sismico ambientale acquisite con le misure realizzate negli edifici sono state elaborate per ottenere una stima delle caratteristiche vibratorie principali delle strutture attraverso tecniche di analisi spettrale. A tale scopo è stato utilizzato un programma con un'interfaccia grafica che permette di visualizzare e selezionare le finestre di segnale contemporaneamente alle forme spettrali relative a *Power Spectral Density (PSD)* e *Horizontal to*

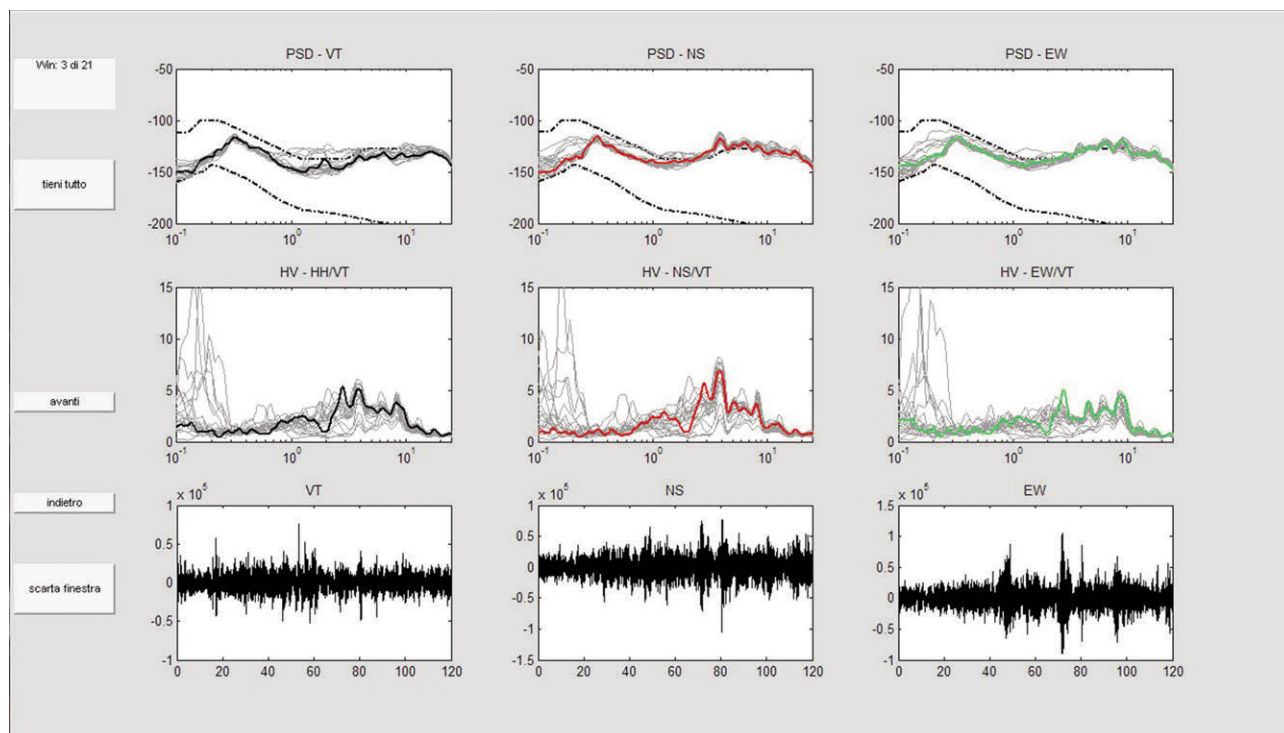
*Vertical Spectral Ratio (HVSR)* come descritto in Marzorati et al. [2010]. L'intera misura di *noise* viene suddivisa in finestre d'analisi mobili della lunghezza di 120 s ed è possibile, visualizzando finestra per finestra, escludere quelle che risultano particolarmente disturbate in modo da discriminare le porzioni di segnale utile alle analisi, escludendo transienti molto energetici generati da sorgenti molto vicine, come il passaggio di persone o il transito di autoveicoli. La Figura 5 mostra un esempio della schermata dell'interfaccia per la selezione delle finestre di segnale.

Essendo la maggior parte delle misure effettuate all'interno degli edifici durante l'orario di lavoro, il disturbo maggiore rilevato è stato quello causato dal passaggio delle persone lungo i corridoi e le vibrazioni delle scale. Al contrario, le misure effettuate all'esterno sono state disturbate in alcuni casi dal vento e in altri dal traffico veicolare, essendo effettuate all'interno di centri storici.

Per ogni edificio, è stato indagato il primo picco spettrale, quello con frequenza minore, il quale è il probabile candidato per rappresentare il periodo di oscillazione fondamentale dell'edificio. Le ordinate spettrali sono state calcolate sia in termini di spettri del movimento orizzontale, sia come HVSR.

Il picco spettrale fondamentale emerge con maggior chiarezza elaborando i segnali delle misure eseguite ai piani alti degli edifici, in quanto le strutture, vincolate al terreno solo con le fondamenta, hanno maggiori gradi di libertà di oscillare nella parte superiore, in dipendenza della loro elasticità. In base alla complessità della struttura ed alla presenza di altre strutture confinanti, le forme spettrali possono risultare di non facile interpretazione per la presenza contemporanea dei modi longitudinali, trasversali e torsionali della struttura. Quindi, per ottenere maggiori informazioni dalle analisi spettrali, è stato scelto di individuare frequenza e direzione delle maggiori ampiezze intorno al primo picco, oltre che la frequenza dei picchi in direzione longitudinale e trasversale all'edificio.

In Figura 6 e 7 è mostrato un esempio del tipo di indagine relativa alle forme spettrali di 3 misure effettuate all'interno dell'edificio dove è installata la stazione accelerometrica FANO (Tabella 1). L'edificio dove si trova la stazione accelerometrica è composto da 4 piani, costruito in epoca moderna in cemento armato. Le misure sono state eseguite rispettivamente al 3° al 1° ed al piano -1, considerando come piano 0 il pianterreno. La misura al piano -1 è stata effettuata a fianco del sensore accelerometrico permanente, mentre quelle al 1° ed al 3° piano, sono state effettuate in locali sovrastanti la stazione accelerometrica. Le curve verdi dei diagrammi di Figura 6 e 7, rappresentano gli spettri nelle direzioni da 0° a 175° con passo 5°, ottenuti ruotando separatamente le componenti orizzontali del segnale sismico. Le direzioni associate ai picchi spettrali vengono descritte in gradi rispetto al nord geografico.

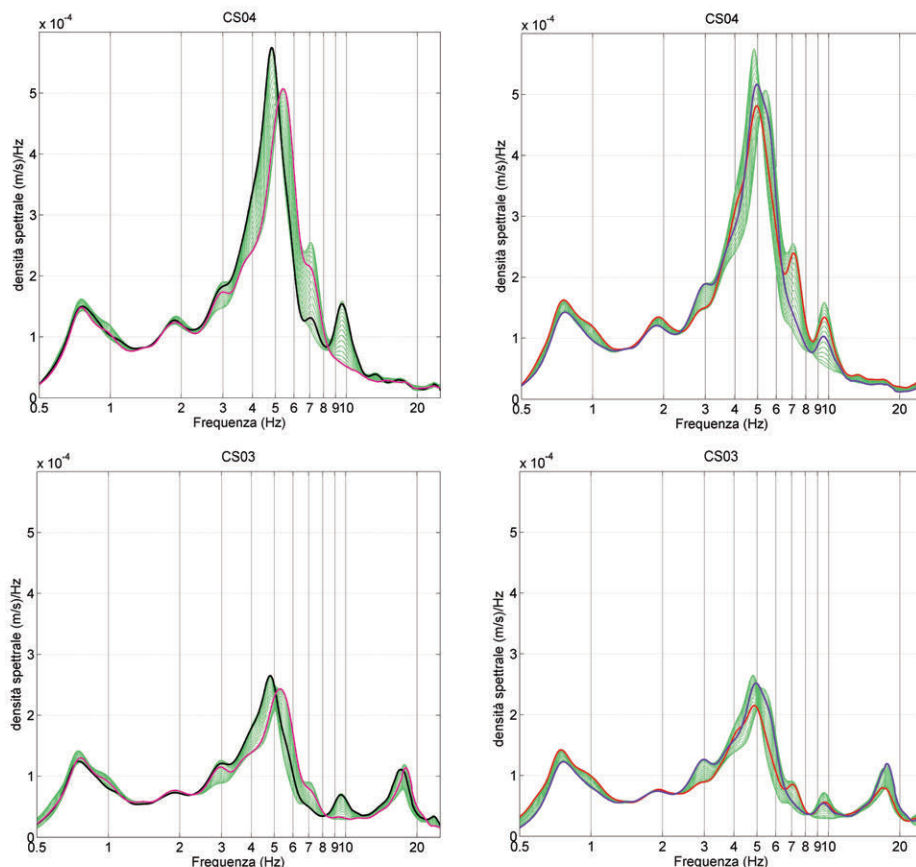


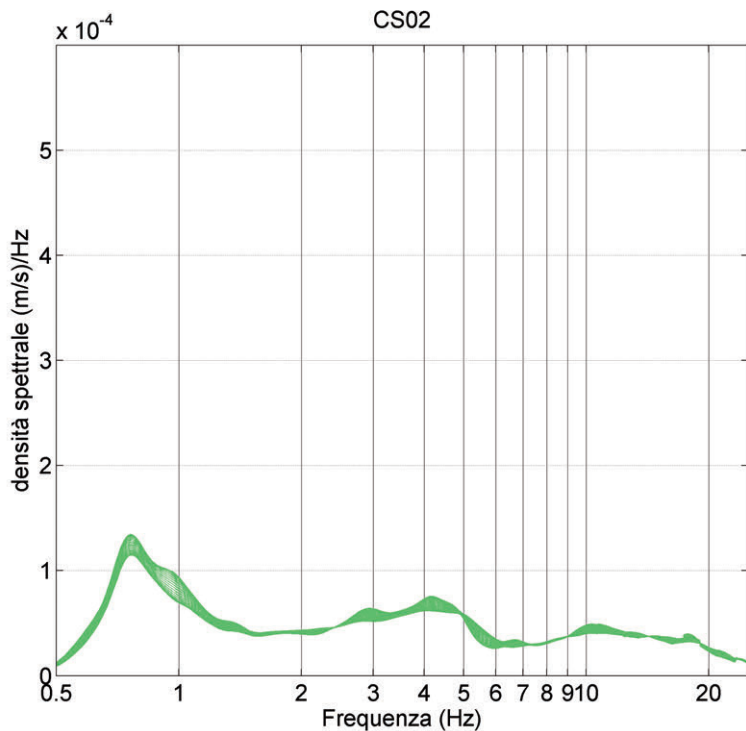
**Figura 5** Schermata dell'interfaccia per la scelta delle finestre di segnale. In alto: PSD. In mezzo: HVSR. In basso: finestra di segnale di rumore sismico ambientale. Nero: componente verticale; rosso: componente Nord-Sud; verde: componente Est-Ovest. Nero tratteggiato: curve di Peterson [Peterson, 1993].

**Figure 5** Windows interface signal. Top: PSD. In the middle: HVSR. Bottom: ambient seismic noise signal. Black: vertical component; Red: North-South component; Green: East-West component. Black dashed: Peterson curves [Peterson, 1993].

**Figura 6** Spettri delle componenti orizzontali del moto dell'edificio in cui è installata la stazione accelerometrica FANO. CS04: misura al 3° piano dell'edificio. CS03: misura al 1° piano dell'edificio. Verde: spettri delle componenti orizzontali del moto ruotate da 0° a 175° con passo 5°. Pannelli di sinistra: Nero) spettro associato alla massima ampiezza del picco fondamentale; Fucsia) spettro associato al secondo massimo intorno al picco fondamentale. Pannelli di destra: Rosso) spettro relativo alla direzione longitudinale dell'edificio; Blu) spettro relativo alla direzione trasversale dell'edificio.

**Figure 6** Spectra of the horizontal components of the building motion where the accelerometric FANO station is installed. CS04: measurement on the 3rd floor of the building. CS03: measurement on the 1st floor of the building. Green: spectra of the horizontal components of motion rotated from 0° to 175° with an interval of 5°. Left panels, top and bottom, Black: spectrum associated to the maximum amplitude of the fundamental peak. Fuchsia: spectrum associated to the second highest peak around the fundamental. Right panels, top and bottom, Red: spectrum relative to the longitudinal direction of the building. Blue: spectrum relative to the transverse direction of the building.





**Figura 7** Spettri delle componenti orizzontali del moto risultanti dall'elaborazione della misura CS02 effettuata a fianco del sensore accelerometrico permanente FANO. Verde: spettri delle componenti orizzontali del moto ruotate da 0° a 175° con passo 5°.

**Figure 7** Spectra of the horizontal components of motion resulting from processing of the measurement CS02. It was performed near the accelerometric permanent FANO sensor. Green: spectra of the horizontal components of motion rotated from 0° to 175° with an interval of 5°.

I diagrammi di sinistra della Figura 6 mostrano come dalle misure ai piani superiori dell'edificio (CS04 e CS03) appare un picco spettrale tra 4 e 6 Hz, che decade irregolarmente dopo il massimo, verso le alte frequenze. L'analisi direzionale permette di associare il massimo assoluto del picco (curva nera) alle direzioni 90°N e 100°N e alle frequenze 4.83 e 4.80 Hz rispettivamente per le misure CS04 (al 3° piano) e CS03 (al 1° piano). In fucsia è evidenziato il contributo di una seconda frequenza di vibrazione di ampiezza minore, all'interno dell'intervallo del picco spettrale fondamentale, rappresentato da un secondo picco spettrale rispettivamente a 5.40 e 5.30 Hz per CS04 e CS03, entrambi in direzione 160°N.

Se le direzioni di vibrazione dei picchi massimi non corrispondono a quelle lungo gli assi longitudinali e trasversali dell'edificio (Figura 8), vengono analizzati anche gli spettri corrispondenti, come mostrato nei diagrammi di destra della Figura 6. In questo caso, la direzione lungo l'asse longitudinale dell'edificio è orientata a 40°N (curve rosse), mentre la direzione trasversale è orientata a 130°N (curve blu). In direzione longitudinale, l'analisi delle misure CS04 e CS03 indicano il picco spettrale massimo a frequenze di 4.95 e 4.88 Hz, mentre in direzione trasversale indicano entrambe la frequenza di 4.96 Hz. In entrambe le misure al 3° ed al 1° piano, il picco nella direzione trasversale risulta di poco più ampio di quello in direzione longitudinale. Un'ulteriore osservazione per CS04 è che lo spettro della componente longitudinale (rosso) rappresenta l'ampiezza del picco spettrale a circa 7 Hz, mentre un terzo picco tra 9 e 10 Hz è rappresentato nella sua massima ampiezza dallo spettro in direzione 90°N (nero).

In Figura 7 è mostrata l'analisi spettrale compiuta sui dati della misura effettuata al piano -1 dell'edificio (CS02), in cui si vede come l'evidente picco spettrale intorno ai 5 Hz, rilevato ai piani superiori, non sia più visibile e le ampiezze spettrali ricadono al di sotto dell'ampiezza del picco microsismico presente a 0.75 Hz; generalmente, a frequenze < 1 Hz l'origine dei disturbi proviene dall'energia generata sul fondo del mare da onde stazionarie [McNamara and Buland, 2004]; considerando la distanza del sito (circa 840 m) dalla costa del mare Adriatico, probabilmente il picco spettrale è generato dalle sorgenti in questo mare. Il sensore installato tra le fondamenta dell'edificio e collocato direttamente sul terreno rileva le vibrazioni dell'edificio molto attenuate; in questo modo, in caso di evento sismico le scosse rilevate saranno dovute essenzialmente al terremoto, potendo così stimare quale sia stato lo scuotimento sismico subito dalla struttura.

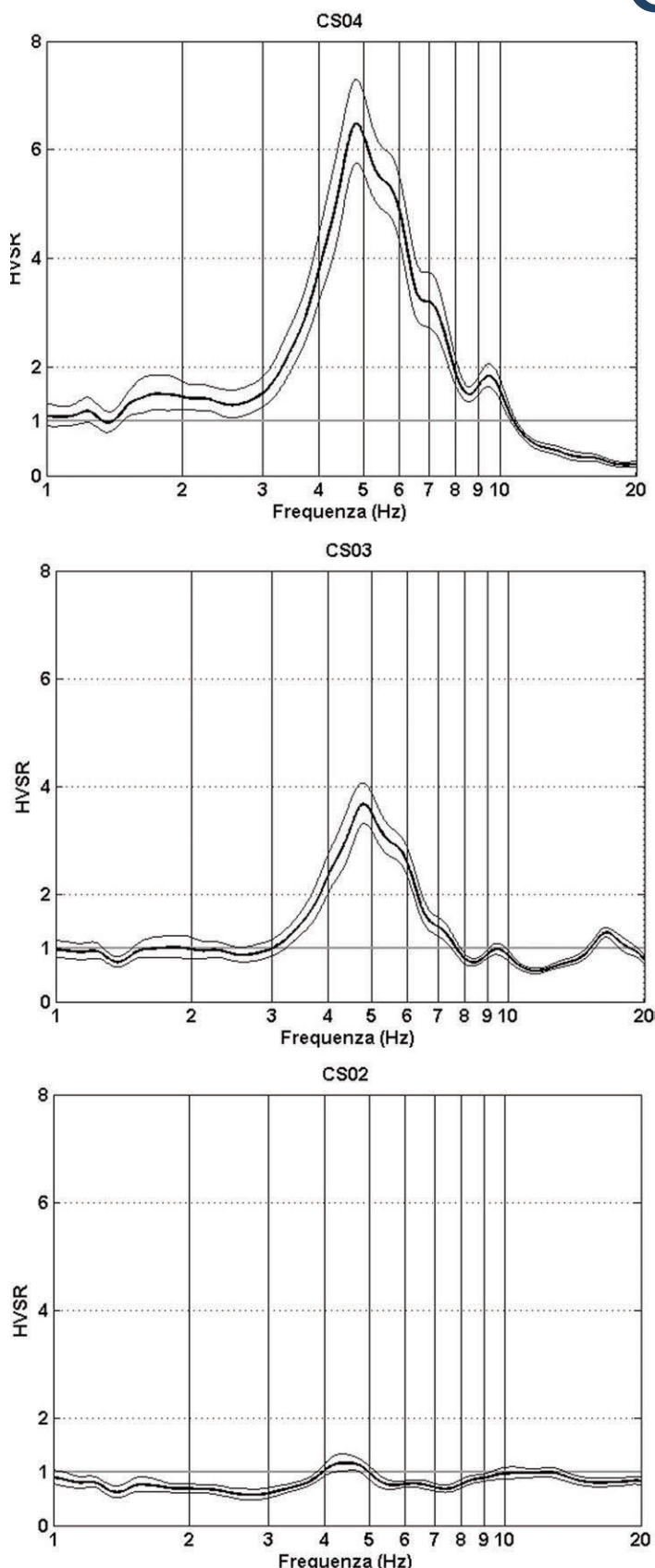
Per comparazione, i dati delle misure di rumore sono state elaborate anche per ottenere i rapporti spettrali HVSR, sia come rapporto tra la composizione delle componenti orizzontali e la verticale del moto, sia come analisi direzionale analoga a quella mostrata in Figura 6. Le finestre di segnale utilizzate per calcolare gli HVSR sono le stesse selezionate per l'analisi degli spettri. Per ogni finestra di segnale è stato calcolato un HVSR e, ad ogni frequenza, l'insieme dei valori di tutti gli HVSR è stato utilizzato per calcolare media e deviazione standard.

La Figura 9 riporta i risultati relativi all'analisi HVSR ottenuta con la composizione delle componenti orizzontali del sensore. Dalle medie degli HVSR emerge come le vibrazioni orizzontali dell'edificio, relativamente a quelle verticali,

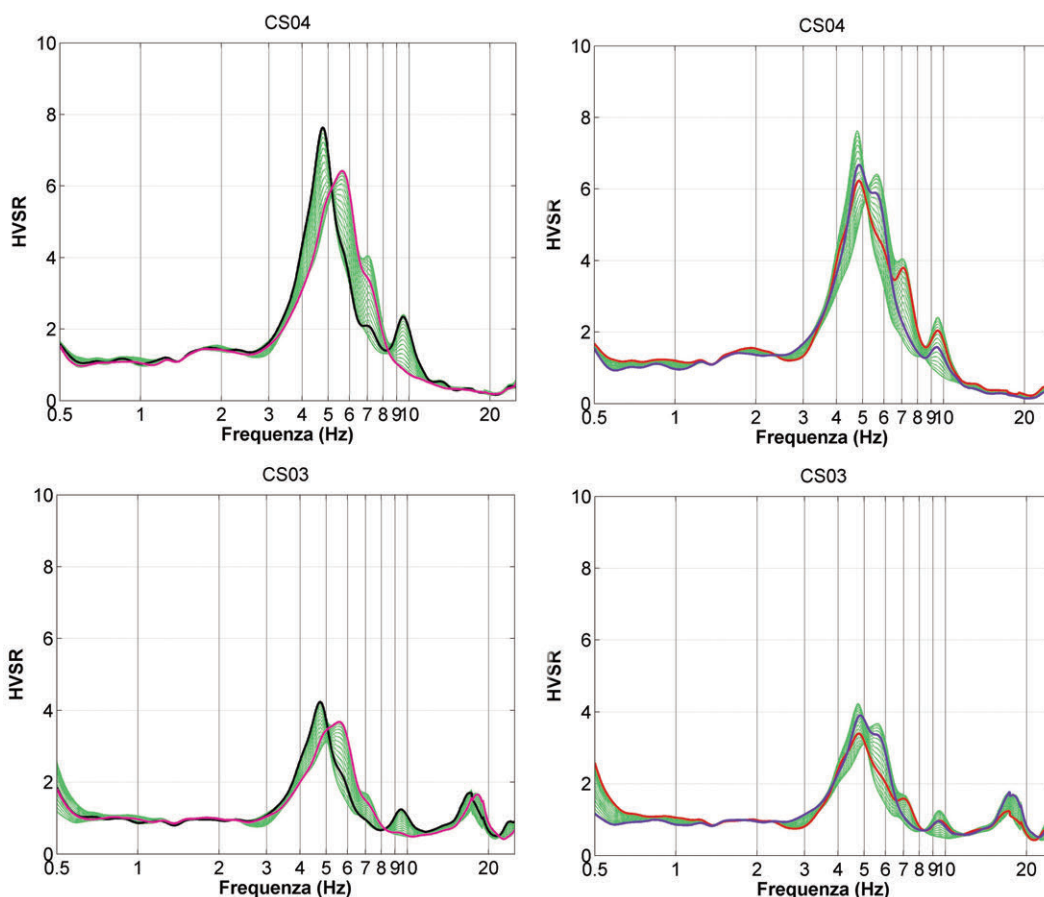


**Figura 8** Identificazione del perimetro (bianco) dell'edificio dove è installata la stazione accelerometrica FANO. Linee colorate: direzioni dei picchi spettrali presentati in Figura 6. Nero: 90°N. Fucsia: 160°N. Rosso: 40°N (longitudinale). Blu: 130°N (trasversale).  
**Figure 8** Identification of the perimeter (white) of the building where it is installed FANO accelerometric station. Colored lines: directions of the spectral peaks presented in Figure 6. Black: 90° N. Fuchsia: 160° N. Red: 40° N (longitudinal). Blue: 130° N (transverse).

siano molto più ampie in un intervallo di frequenza compreso tra 3 ed 8 Hz, con un picco di vibrazione tra 4.5 e 5 Hz. Come atteso, l'ampiezza del rapporto spettrale è maggiore per la misura eseguita al 3° piano rispetto al 1° e la forma dell'HVSR è analoga indicando il picco spettrale a 4.82 Hz per la misura al 3° piano e 4.78 Hz per la misura al 1° piano. Al contrario, la misura effettuata al piano -1, sul terreno tra le fondamenta, non indica amplificazione delle componenti orizzontali rispetto alla verticale, come osservato in altri lavori [Ladina et al., 2009; Massa et al., 2010]. Il rapporto spettrale HVSR ottenuto dalla composizione delle componenti orizzontali, come nel caso delle misure in Figura 9, indica chiaramente l'intervallo di amplificazione del movimento orizzontale rispetto a quello verticale, ma mostra anche come il picco spettrale principale abbia una forma articolata, con gobbe nel ramo a più alta frequenza. Utilizzando l'analisi spettrale direzionale precedente, per ogni direzione è stato calcolato l'HVSR di tutte le finestre di segnale selezionate e di questi è stata calcolata media e deviazione standard. Le medie HVSR in tutte le direzioni sono rappresentate dalle curve verdi in Figura 10, le quali ricalcano gli HVSR della Figura 9. I risultati degli HVSR direzionali sono utili per spiegare la forma articolata dei picchi spettrali in Figura 9. Anche in questo caso il massimo del picco spettrale è rappresentato



**Figura 9** Rapporti spettrali HVSR. Curve nere spesse: media. Curve nere sottili: deviazione standard. CS02: piano -1, a fianco della stazione accelerometrica FANO. CS03: primo piano. CS04: terzo piano.  
**Figure 9** Horizontal to Vertical Spectral Ratio. Thick black curves: average. Thin black curves: standard deviation. CS02: station installed at -1 floor, near the FANO station. CS03: station installed on the first floor. CS04: station installed on the third floor.



**Figura 10** Rapporti spettrali HVSr delle misure effettuate nell'edificio in cui è installata la stazione accelerometrica FANO. CS04: misura al 3° piano dell'edificio. CS03: misura al 1° piano dell'edificio. Verde: HVSr medi relativi alle direzioni da 0° a 175° con passo 5°. Pannelli di sinistra: Nero) spettro associato alla massima ampiezza del picco fondamentale; Fucsia) spettro associato al secondo massimo intorno al picco fondamentale. Pannelli di destra: Rosso) spettro relativo alla direzione longitudinale dell'edificio; Blu) spettro relativo alla direzione trasversale dell'edificio.

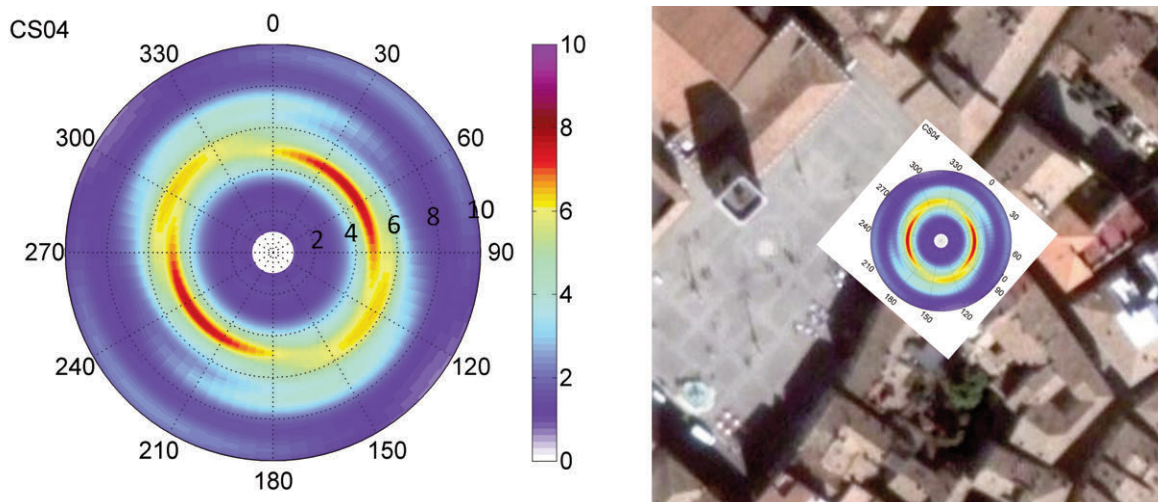
**Figure 10** HVSr spectral ratios of the measurements performed in the building where the accelerometric station FANO is installed. CS04: measurement on the 3rd floor of the building. CS03: measurement on the 1 floor of the building. Green: average HVSr related to the directions from 0° to 175° with an interval on 5°. Left panels: Black) spectrum associated to the maximum amplitude of the fundamental peak; Fuchsia) spectrum associated to the second highest peak around the fundamental. Right panels: Red) spectrum relative to the longitudinal direction of the building; Blue) spectrum relative to the transverse direction of the building.

dalla media HVSr in direzione 90°N (Figura 10, nero) a frequenza 4.77 Hz, mentre le gobbe del ramo discendente vengono descritte dai picchi in direzione 160°N e frequenza 5.63 Hz (Figura 10, fucsia), dallo spettro in direzione longitudinale all'edificio a circa 7 Hz (Figura 10, rosso) ed ancora dallo spettro a 90°N a frequenze tra 9 e 10 Hz.

Un metodo più intuitivo per rappresentare le ampiezze e le curve dei rapporti HVSr nelle varie direzioni è quello di utilizzare polarigrammi come mostrato in Figura 11, dove le frequenze aumentano dal centro ai bordi del polarigramma e la scala di colori indica le ampiezze.

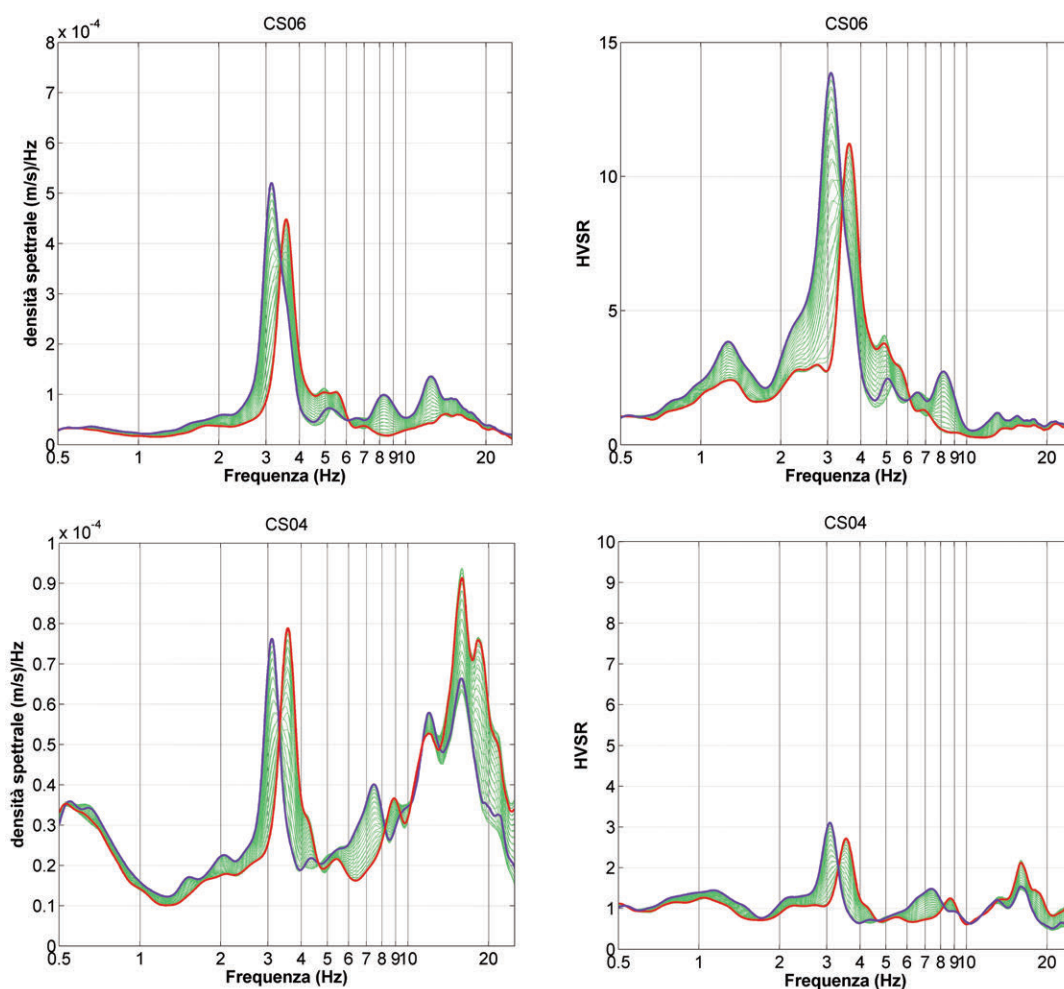
Gli edifici in cui sono state eseguite le misure in gran parte appartengono a piccoli borghi storici in cui è alta la densità costruttiva e gli edifici hanno a volte forme irregolari e spesso confinano con edifici adiacenti. Importante è anche la loro tipologia costruttiva, che in gran parte rientra nella tipologia "muratura". Questi fattori possono influenzare la

risposta alle vibrazioni degli edifici e renderla più complessa. Gli accelerometri permanenti installati alla base degli edifici possono risentire dell'effetto della vibrazione dell'edificio anche in relazione alla loro collocazione. Nel precedente esempio del sito FANO, l'analisi del rumore sismico registrato accanto all'accelerometro non evidenziava le caratteristiche spettrali osservabili ai piani superiori. In altri casi, come quello del sito MTL1, in cui l'accelerometro è installato al piano terreno e poggia sulla struttura, le caratteristiche spettrali dei piani superiori vengono rilevate anche alla base dell'edificio (Figura 12). Infatti, il picco spettrale in direzione trasversale (blu) e longitudinale (rosso) osservabile nella misura al primo piano dell'edificio (CS06) è osservabile anche nella misura al piano terreno (CS04) vicino all'accelerometro permanente. In questo caso, bisogna portare maggiore attenzione nell'analisi delle forme d'onda degli eventi sismici per l'effetto dell'accoppiamento tra il sensore accelerometrico e la struttura.



**Figura 11** Polarigramma degli HVSR direzionali calcolati per la misura CS04 al 3° piano dell'edificio di FANO. Gli 0° del polarigramma indicano l'asse principale del sensore il quale è stato orientato lungo l'asse longitudinale dell'edificio (vedi Figura 8). Destra: orientazione del polarigramma rispetto al nord geografico (asse 0° del polarigramma = 40°N), raffigurato al disopra dell'edificio monitorato. Scala di colore: ampiezza dell'HVSR.

**Figure 11** Polar plot of HVSR calculated for CS04 measur on the 3rd floor of the FANO building. The 0° of the polar plot indicate the principal axis of the sensor which was oriented along the longitudinal axis of the building (see Figure 8). Right: polar plot oriented respect to geographical north (0° axis of polar plot = 40°N), represented over the building monitored. Color ramp: HVSR amplitude.



**Figura 12** Analisi spettrale direzionale dell'edificio di MTL1. Sinistra: spettri delle componenti orizzontali. Destra: HVSR. Rosso: direzione longitudinale. Blu: direzione trasversale. In alto: stazione CS06 installata al primo piano. In basso: stazione CS04 installata al piano terra.

**Figure 12** Spectral directional analysis of MTL1 building. Left: spectra of the horizontal components. Right: HVSR. Red: the longitudinal direction. Blue: the transverse direction. Top: station CS06 installed on the first floor. Bottom: station CS04 installed on the ground floor.

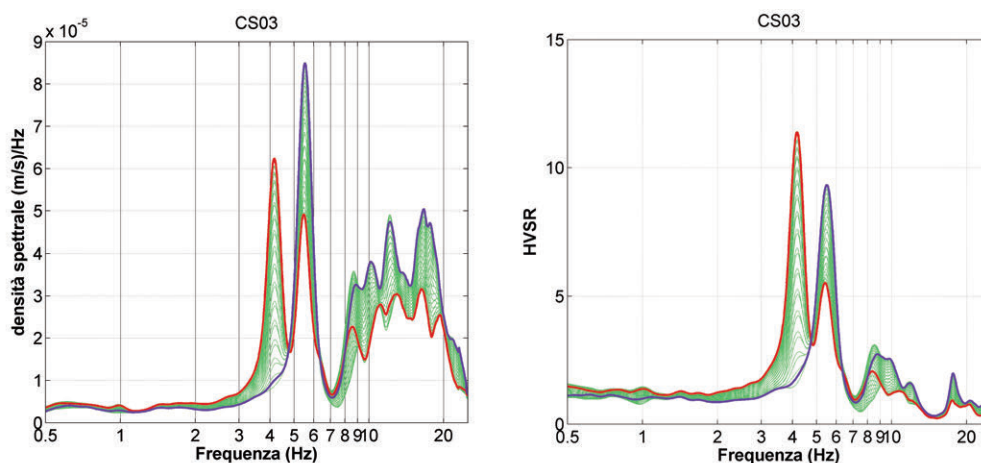
Sito	Fspe (Hz)	Azspe(°N)	Fhvsr (Hz)	Azhvsr(°N)	AzL (°N)	AzT (°N)	NPE
APEC	4.15	15	4.17	15	20	110	3
CRM1	3.92	15	3.87	15	40	130	3
FANO	4.83	90	4.77	90	40	130	4
FIU1	5.02	105	5.01	105	160	70	2
MCIF	6.37	20	6.16	15	0	90	2
MNTP	4.14	70	4.10	70	150	60	3
MTL1	3.15	90	3.08	95	0	90	3
SAIV	3.08	10	2.97	5	150	60	3
SSCV	7.22	90	7.15	90	10	100	2
SSM1	3.74	0	3.62	0	30	120	4
TRE1	4.04	55	3.96	55	150	60	3

**Tabella 5** Parametri dell'analisi spettrale delle misure effettuate ai piani alti degli edifici. SITO: codice del sito. Fspe: frequenza del primo picco spettrale. Azspe: direzione del primo picco spettrale. Fhvsr: frequenza del primo picco dell'HVSR. Azhvsr: direzione del primo picco dell'HVSR. AzL: direzione dell'asse longitudinale dell'edificio. AzT: direzione dell'asse trasversale dell'edificio. NPE: numero dei piani dell'edificio, compreso il piano terra.

**Table 5** Parameters of the spectral analysis of the measurements performed on the upper floors of buildings. SITE: site code. Fspe: frequency of the first spectral peak. Azspe: direction of the first spectral peak. Fhvsr: frequency of the first HVSR peak. Azhvsr: the direction of the first HVSR peak. AzL: the direction of the longitudinal axis of the building. AzT: the direction of the transverse axis of the building. NPE: number of floors of the building, including the ground floor.

La Tabella 5 riporta i parametri risultanti dall'analisi spettrale direzionale, in particolar modo per quel che riguarda frequenze e direzione dei primi picchi spettrali. Le frequenze sono in gran parte comprese tra 3 e 5 Hz per gli edifici di 3-4 piani. Per gli edifici più bassi di MCIF e SSCV sono state stimate frequenze leggermente più alte tra i 6 e 7 Hz.

I risultati ottenuti con la tecnica dei rapporti spettrali HVSR ricalcano quelli degli spettri delle componenti orizzontali. In 4 casi (MNTP, MTL1, SSCV, TRE1) la direzione di oscillazione del primo picco spettrale si avvicina alla direzione dell'asse trasversale dell'edificio. Se l'edificio è isolato oppure è confinato da edifici sul lato corto, la direzione trasversale è



**Figura 13** Analisi spettrale direzionale al piano alto dell'edificio di APEC. Sinistra: spettri delle componenti orizzontali. Destra: HVSR. Rosso: direzione longitudinale. Blu: direzione trasversale.

**Figure 13** Directional spectral analysis on the top floor of the building of APEC. Left: spectra of the horizontal components. Right: HVSR. Red: the longitudinal direction. Blue: the transverse direction.



quella con maggior grado di libertà di oscillare.

Al contrario, nel caso di APEC il primo picco spettrale ha la sua massima ampiezza in direzione longitudinale all'edificio. L'analisi spettrale della misura al piano alto dell'edificio (Figura 13, sinistra) mostra un secondo picco spettrale a 5.52 Hz, più ampio del primo picco a 4.15 Hz. La massima ampiezza di questo secondo picco si esprime lungo la direzione trasversale dell'edificio. Anche l'analisi con l'HVSR restituisce lo stesso risultato (Figura 13, destra) ed inoltre aiuta a comprendere la natura delle ordinate spettrali > 10 Hz di probabile origine antropica (ad esempio lavori di cantiere o traffico veicolare), in quanto molto ampie anche sulla verticale.

## 5. Conclusioni

Da una proposta del Centro Funzionale del DPISPC della Regione Marche e della Sede di Ancona - INGV è stato avviato un progetto pilota per il monitoraggio sismico degli edifici pubblici all'interno del progetto europeo Holistic.

Per il progetto sono stati individuati 11 siti della rete sismica ReSIICO in cui sono installate stazioni sismiche accelerometriche permanenti alla base di edifici pubblici. Le serie temporali delle accelerazioni registrate al suolo sotto gli edifici sono trasmesse in tempo reale al centro di acquisizione in modo che si possa ricostruire una storia sismica degli scuotimenti subiti dagli edifici.

Per migliorare la conoscenza della vulnerabilità associata a queste strutture, è stata condotta una campagna di misure temporanee di rumore sismico ambientale all'interno ed all'esterno degli edifici. Queste misure hanno lo scopo di cogliere alcune caratteristiche vibratorie delle strutture e dei suoli su cui esse poggiano, in modo da raccogliere informazioni utili per eventuali interazioni suolo-struttura.

Per nove edifici è stato possibile eseguire una misura all'esterno dello stabile, mentre per due casi la mancanza di uno spazio nelle vicinanze dell'edificio ha impedito di registrare il rumore sismico sulla stessa formazione geologica su cui poggia l'edificio indagato, ma in ogni caso ai siti è stata associata una categoria di suolo e di morfologia topografica secondo le direttive EC8, utilizzando strumenti GIS e cartografia tematica digitale geologica.

Le misure temporanee all'interno degli edifici sono state eseguite almeno ad un piano superiore della struttura e vicino al sensore accelerometrico permanente. Attraverso un'analisi spettrale del rumore sismico, sono state individuate le frequenze e le direzioni del picco spettrale a più bassa frequenza, il quale generalmente indica il moto fondamentale di vibrazione dell'edificio.

L'analisi spettrale del movimento orizzontale e dei rapporti HVSR hanno restituito risultati simili e l'analisi spettrale direzionale è risultata utile per interpretare le irregolarità dei

picchi spettrali risultanti dall'analisi ottenuta con la sola composizione delle componenti orizzontali. Infatti, è possibile discriminare i casi in cui il primo picco spettrale è associabile ad una vibrazione lungo uno degli assi principali dell'edificio (longitudinale o trasversale).

Le analisi effettuate permettono altresì di confrontare le caratteristiche del moto ai piani superiori degli edifici con il moto registrato in prossimità delle stazioni accelerometriche e di valutare se la vibrazione dell'edificio risulta molto attenuata alla base.

Un possibile sviluppo del progetto potrebbe essere l'installazione di un secondo sensore ai piani superiori degli edifici, in modo da confrontare le forme d'onda registrate durante eventi sismici con quelle rilevate alla base degli edifici.

In definitiva, l'avvio del progetto pilota di monitoraggio degli edifici permette di aumentare le conoscenze relative al rischio sismico e di seguire la storia sismica dello scuotimento associata alle strutture indagate, utilizzando un approccio che potrebbe permetterne una diffusione capillare sul territorio.

## 6. Ringraziamenti

La realizzazione del progetto descritto è stata possibile grazie alla collaborazione e al contributo della Regione Marche e delle Amministrazioni Locali dei Comuni e Uffici Tecnici dove sono installate le stazioni, le quali hanno messo a disposizione dati e hanno supportato gli operatori INGV sul campo durante le indagini.

Si ringrazia la Commissione Rete Mobile dell'INGV per aver supportato il progetto con sei stazioni sismiche mobili che hanno permesso la realizzazione delle misure temporanee sul campo.

Il progetto è stato cofinanziato dall'Unione Europea - Instrument for Pre-Accession Assistance (IPA).

Si ringrazia il revisore per i suggerimenti utili al miglioramento del testo.

## Bibliografia

- Amato A. and Mele F.M., (2008). *Performance of the INGV National Seismic Network from 1997 to 2007*. *Annals of Geophysics*, 51, 2/3, 417-431.
- ENV1998-1-1, EUROCODE8, Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Seismic Actions and General Requirements of Structures, CEN/TC 250, Draft, May 2002.
- Ladina C., Lovati S., Marzorati S. and Massa M., (2009). *Spectral ratio techniques as a tool for soil structure interaction assessment*. Poster Session, European Geosciences Union, General Assembly 2009, Vienna,

Austria, 19-24 Aprile 2009.

- McNamara D.E., Buland R.P., (2004). *Ambient noise levels in the continental United States*. Bulletin of the Seismological Society of America, 94 (4), 1517-1527.
- Marzorati S., Ladina C., Piccarreda D., Ameri G., (2010). *Campagna di Misure Sismiche nella conca Subequana*. Rapporti Tecnici INGV, n. 156.
- Massa M., Marzorati S., Ladina C. and Lovati S., (2010). *Urban seismic stations: soil-structure interaction assessment by spectral ratio analyses*. Bulletin of Earthquake Engineering, vol 8, issue 3, pp 723-738. doi: 10.1007/s10518-009-9138-1.
- Monachesi G., Cattaneo M., Ladina C., Marzorati S., D'Alema E., Frapiccini M., Carannante S., Ferretti M., Sebastianelli M., Delladio A., Selvaggi G., (2013). *Esperienze di monitoraggio integrato: il caso della Rete Sismometrica dell'Italia centro orientale e dei suoi servizi*. Quaderni di Geofisica, n. 106.
- Moretti M., Govoni A., Colasanti G., Silvestri M., Giandomenico E., Silvestri S., Criscuoli F., Giovani L., Basili A., Chiarabba C. and Delladio A., (2010). *La Rete Sismica Mobile del Centro Nazionale Terremoti*. Rapporti Tecnici INGV, n. 137.
- OPCM, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica (Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/03). Ordinary supplement of Gazzetta Ufficiale 8/03/2003,105, (Roma 2003).
- Rao S., Salvaterra L., Acerra C., (2010). *Software per l'installazione e la configurazione della stazione sismica GAIA2*. Rapporti Tecnici INGV, 130, 52.
- Pessina V., Fiorini E., (2014). *A GIS procedure for fast topographic characterization of seismic recording stations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 63, 248-258.
- Peterson J., (1993). *Observations and modeling of background seismic noise*. U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 93-322.

# Indice

<b>Introduzione</b>	5
<b>1. Stazioni accelerometriche all'interno degli edifici</b>	5
<b>2. Campagna di misure di rumore sismico ambientale</b>	7
<b>3. Caratterizzazione geologica e morfologica dei siti</b>	8
<b>4. Analisi dei dati di rumore sismico ambientale</b>	10
<b>5. Conclusioni</b>	17
<b>6. Ringraziamenti</b>	17
<b>Bibliografia</b>	17

# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2015 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**