

**Dottorato di Ricerca in**  
**Scienze e Tecnologie Fisiche, Chimiche e dei Materiali**  
*Dipartimento di Fisica*

**CICLO**  
**XXIX**

***Rischio Sismico Ambientale e degli Edifici:***  
***Analisi e tecnica HVSR - Aspetti teorici e Aspetti Sperimentali***

**Settore Scientifico Disciplinare Icar 08, Geo 11**

**Coordinatore:** Ch.mo Prof. Vincenzo Carbone  
Firma Vincenzo Carbone

**Supervisore/Tutor:** Ch.mo Prof. Raffaele Linno  
Firma Raffaele Linno

**Dottorando:** Dott./ssa Floriana Magarò  
Firma Floriana Magarò



***Rischio Sismico Ambientale e degli Edifici:  
Analisi e tecnica HVSR - Aspetti teorici e Aspetti  
Sperimentali***

***Seismic Risk Environmental and Building:  
Analysis and technical HVSR - Theoretical Aspects and  
Experimental Aspects***

*La presente tesi è cofinanziata con il sostegno della Commissione Europea, Fondo Sociale Europeo e della Regione Calabria. L'autore è il solo responsabile di questa tesi e la Commissione Europea e la Regione Calabria declinano ogni responsabilità sull'uso che potrà essere fatto delle informazioni in essa contenute.*

*Alla mia famiglia*

---

<b>Introduzione</b> .....	I
<b>Capitolo 1</b>	
<b>Stato dell'Arte</b> .....	<b>1</b>
1.1 Analisi del Rischio Sismico e analisi della Geofisica Applicata .....	1
1.2 Rischio sismico e macrozonazione sismica .....	5
1.3 Rischio sismico in Calabria .....	8
1.4 Onde sismiche .....	10
1.5 Microsismi .....	17
1.6 Sismica passiva .....	21
<b>Capitolo 2</b> .....	<b>23</b>
<b>Tecnica HVSR e strumentazione sperimentale</b> .....	23
2.1 Origine del rumore sismico ambientale (seismic vibration).....	24
2.2 Metodo H/V – Rapporto spettrale.....	25
2.3 Basi fisiche del metodo H/V .....	27
2.4 Rappresentazione del rumore sismico ambientale .....	32
2.5 Fenomeno della risonanza sismica .....	35
<b>Capitolo 3</b> .....	<b>40</b>
<b>Strumentazione per tecnica di sismica passiva HVSR</b> .....	41
3.1 Strumentazione per analisi del rumore sismico ambientale .....	41
3.2 Strumentazione sperimentale .....	45
3.3 Sperimentazione e taratura strumento sperimentale .....	54
3.3.1 Criteri di posizionamento della strumentazione di misura su edifici.....	55
3.3.2 Taratura strumentazione sperimentale .....	56

---

<b>Capitolo 4</b> .....	<b>68</b>
<b>Utilizzo di strumentazioni per la caratterizzazione dinamica di ponti in cemento armato: Aspetti teorici e aspetti sperimentali</b> .....	<b>68</b>
4.1 Sistema EARLY WARNING SISMICO (SEWS) per le grandi infrastrutture di trasporto .....	69
4.2 Gli strumenti di Misura .....	73
4.3 Strumenti e metodologie: Cases History .....	78
4.3.1 Ponte Caprovini di Cetraro (CS).....	78
4.3.2 Ponte Fiume di Mare – Fiumefreddo Bruzio (CS) .....	91
4.3.3 Ponte Longobucco (CS) .....	99
<b>Capitolo 5</b> .....	<b>117</b>
<b>Caso studio: studio di un versante in frana con tecnica HVSR e Laser Scanner</b> .....	<b>117</b>
5.1 Caratteristiche geotecniche e sismiche movimento franoso .....	118
5.2 Indagine geofisica mediante tecnica dei rapporti spettrali (HVSR) .....	123
5.3 Il rilievo della frana con Laser Scanner .....	134
<b>Capitolo 6</b> .....	<b>137</b>
<b>Routine MatLab® per analisi dati HVSR</b> .....	<b>137</b>
<b>Capitolo 7</b> .....	<b>142</b>
<b>Conclusioni e sviluppi futuri della ricerca</b> .....	<b>142</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>144</b>
<b>Allegati</b> .....	<b>158</b>
<b>A LINEE GUIDA PER LE MISURE HVSR PROPOSTE DA SESAME</b> .....	<b>I</b>
<b>A.1 CONDIZIONI SPERIMENTALI</b> .....	<b>II</b>
<b>A.2 PARAMETRI DI REGISTRAZIONE</b> .....	<b>III</b>
<b>A.3 DURATA DELLA REGISTRAZIONE</b> .....	<b>III</b>
<b>A.4 SPAZIATURA TRA LE MISURE</b> .....	<b>III</b>

---

<b>A.5</b>	<b>ACCOPPIAMENTO SUOLO-SENSORE IN SITO</b> .....	III
<b>A.6</b>	<b>ACCOPPIAMNETO ARTIFICIALE SUOLO-SENSORE</b> .....	IV
<b>A.7</b>	<b>CONDIZIONI DI AFFIDABILITA'</b> .....	V
<b>A.8</b>	<b>IDENTIFICAZIONE DELLA FREQUENZA <math>f_0</math> PICCO NITIDO</b> .....	VI
<b>B</b>	<b>LINEE GUIDA SETTAGGIO PROGRAMMA ACQUISIZIONE DATI HVSR – GEOPSY E DINVER</b> .....	VII
	<b>B.1 ELABORAZIONE PROVA HVSR</b> .....	VII
	<b>B.2 SCELTA DELLE FREQUENZE DI INTERESSE</b> .....	VIII
<b>C</b>	<b>SCRIPT MATLAB®</b> .....	X
	<b>Pubblicazioni Scientifiche</b> .....	A

**Capitolo 1**

**Figura 1.1** Schema Concettuale che lega le varie discipline per la riduzione e prevenzione del Rischio Sismico ..... 5

**Figura 1.2.1** Mappa pericolosità sismica del territorio italiano..... 7

**Figura 1.2.1.1** Terremoti storici dall’anno 1000 in Calabria.....10

**Figura 1.3.1** Fronte d’onda e raggi in un mezzo elastico omogeneo. b) Fronte d’onda e raggi in un mezzo non omogeneo.....12

**Figura 1.3.2** In un mezzo omogeneo, i fronti d’onda sferici, a grande distanza dalla sorgente, sono approssimabili con dei fronti d’onda piani .....13

**Figura 1.3.3** Rappresentazione onde sismiche in un sismogramma ..... 14

**Figura 1.3.4** Rappresentazione Accelerogramma in funzione del tempo.....14

**Figura 1.3.2.1** Onde di Rayleigh.....16

**Figura 1.3.2.2** Onde di Love.....17

**Figura 1.4.1** Tracce di rumore sismico ambientale della componente verticale registrate in due momenti differenti.....18

**Figura 1.4.2** Esempio di “Power Spectral Density (PSD)” di un microsisma relativa alla componente verticale del segnale.....19

**Capitolo 2**

**Figura 2.1** Schema della struttura di un bacino sedimentario e dei possibili punti di misura ..... 28

**Figura 2.2** Particelle motion di tre tipi di modi fondamentali delle onde di Rayleigh per un modello semplice a due strati ..... 29

**Figura 2.3** Ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh calcolato nel caso di uno strato sedimentario su roccia per differenti contrasti delle onde S ..... 30

**Figura 2.4** Ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh, funzione di trasferimento (calcolata per le onde SH incidenti verticalmente), e rapporti spettrali osservati per differenti contrasti d’impedenza tra i sedimenti e la roccia..... 31

**Figura 2.5** Rappresentazione metodo H/V ..... 32

<b>Figura 2.6</b> Rappresentazione grafica delle componenti di una Trasformata di Fourier .....	34
<b>Figura 2.7</b> Interazione manufatti ed il suolo di fondazione attraversato dalle onde sismiche .....	36
<b>Figura 2.8</b> Visione sismologica e ingegneristica del sistema Suolo-Struttura .....	36
<b>Capitolo 3</b>	
<b>Figura 3.1</b> Sensori velocimetri utilizzati all'interno della strumentazione .....	42
<b>Figura 3.2</b> Strumento per misure di rumore sismico ambientale .....	42
<b>Figura 3.3</b> Schema funzionamento scheda Theremino Datalogger per applicazioni HVSR .....	46
<b>Figura 3.4</b> Modulo Master Dil - V4 .....	46
<b>Figura 3.5</b> Theremino Adc24 utilizzato per la registrazione di segnali a bassa e media frequenza per applicazioni HVSR .....	47
<b>Figura 3.6</b> Conessioni tra il modulo ADC24 e il Master .....	49
<b>Figura 3.7</b> Schema collegamento sensori velocimetri al convertitore ADC24 .....	50
<b>Figura 3.8</b> Collegamenti cavi schermati al geofono .....	50
<b>Figura 3.9</b> Il grafico curva di risposta del geofono 4.5 Hz Senshe .....	51
<b>Figura 3.10</b> Interfaccia grafica del programma “Theremino Dolfrang” per acquisizione dati in entrata .....	52
<b>Figura 3.11</b> Interno tromografo sperimentale ed esterno tromografo sperimentale collegato al PC .....	53
<b>Figura 3.12</b> Spettri Asse X Y Z .....	58
<b>Figura 3.13</b> Grafico HVSR prova eseguita ed immagine conclusiva sintetica dell'HVSR .....	58
<b>Figura 3.14</b> Confronto del grafico HVSR acquisito con tromografo professionale ..	60
<b>Figura 3.15</b> Grafico spettri di registrazione segnali acquisiti .....	61
<b>Figura 3.16</b> Test di simmetria acquirettore sperimentale .....	62
<b>Figura 3.17</b> Acquisizione sperimentale .....	62

<b>Figura 3.18</b> Elaborazione H/V .....	63
<b>Figura 3.19</b> Elaborazione H/V a 500 Hz.....	64
<b>Figura 3.20</b> Elaborazione H/V picco di risonanza .....	66
<b>Figura 3.21</b> Omogeneità del segnale H/V acquisito .....	67
<b>Capitolo 4</b>	
<b>Figura 4.1</b> Principio di funzionamento del sistema di protezione passivo .....	70
<b>Figura 4.2</b> Principio di funzionamento del sistema di controllo attivo.....	71
<b>Figura 4.3</b> Principio di funzionamento del sistema di controllo semiattivo .....	71
<b>Figura 4.4</b> Diagrammi di accelerazione, velocità e spostamento.....	73
<b>Figura 4.5</b> Schema di funzionamento di un sismografo per la misura delle oscillazioni del terreno in direzione verticale (A) e orizzontale (B) .....	74
<b>Figura 1.6</b> Curve di risonanza in N°. Zona di funzionamento dei sismometri come misuratori di spostamento .....	75
<b>Figura 4.7</b> Curve di risonanza. Zona di funzionamento dei sismometri come misuratori di accelerazione .....	75
<b>Figura 4.8</b> Vari tipi di accelerometri .....	76
<b>Figura 4.9</b> Laser Scanner con sistema GPS .....	77
<b>Figura 4.10</b> Ponte Caprovini Cetraro (Cosenza).....	79
<b>Figura 4.11</b> Unione delle scansioni in 3D del Ponte Caprovini – Acquisizione con Laser Scanner RIEGL VZ 1000 .....	81
<b>Figura 4.12</b> Schema delle due configurazioni.....	84
<b>Figura 4.13</b> Forma modale (modo 1) con frequenza 2.4 Hz.....	86
<b>Figura 4.14</b> Forma modale (modo 2) con frequenza 7.0 Hz.....	87
<b>Figura 4.15</b> Ubicazione Sondaggi HVSR .....	88
<b>Figura 4.16</b> Risultati del rapporto H/V con evidenza del picco frequenza di risonanza a 2,5 Hz.....	89
<b>Figura 4.17</b> Spettri delle componenti X Y e Z.....	89

<b>Figura 4.18</b> Frequenze in funzione dell'ampiezza e Spettro orizzontale H/V .....	90
<b>Figura 4.19</b> Vista ponte Fiume di Mare Fiumefreddo Bruzio (Cosenza) .....	91
<b>Figura 4.20</b> Sezione longitudinale del Ponte Fiume di mare .....	92
<b>Figura 4.21</b> Sezione trasversale del Ponte Fiume di mare .....	92
<b>Figura 4.22</b> Schema del Ponte Fiume di mare .....	92
<b>Figura 4.23</b> Modello FEM in Abaqus .....	93
<b>Figura 4.24</b> Forma modale torsionale della modellazione FEM.....	94
<b>Figura 4.25</b> Forme modali flessionali della modellazione FEM.....	95
<b>Figura 4.26</b> Schema delle tre configurazioni .....	97
<b>Figura 4.27</b> Diagramma FFT dati.....	98
<b>Figura 4.28</b> Ubicazione Sondaggi HVSR .....	99
<b>Figura 4.29</b> Particolare strumento in acquisizione.....	99
<b>Figura 4.30</b> Rapporto spettrale H/V, con picco di frequenza a 10,5 HZ .....	101
<b>Figura 4.31</b> Componenti rapporto H/V Assi X, Y e Z. Le frequenze si assestano circa sui 4 Hz.....	101
<b>Figura 4.32</b> Vista ponte ad arco Longobucco (Cosenza).....	102
<b>Figura 4.33</b> Sezione longitudinale ponte Longobucco.....	103
<b>Figura 4.34</b> Pianta ponte ad arco Longobucco.....	103
<b>Figura 4.35</b> Sezione trasversale.....	104
<b>Figura 4.36</b> Vista dal basso ponte ad arco.....	104
<b>Figura 4.37</b> Modello FEM.....	105
<b>Figura 4.38</b> Forme modali della modellazione FEM.....	105
<b>Figura 4.39</b> Trasduttori di accelerazione.....	106
<b>Figura 4.40</b> Configurazione A accelerometri.....	107
<b>Figura 4.41</b> Configurazione B accelerometri.....	108
<b>Figura 4.42</b> Cross spectrum FFT.....	109
<b>Figura 4.43</b> Grafico dei picchi di frequenza del ponte di Longobucco .....	112
<b>Figura 4.44</b> Frequenza fondamentale del ponte di Longobucco – 2,6 Hz .....	113

<b>Figura 4.45</b> Componenti rapporto H/V Assi X, Y e Z .....	114
 <b>Capitolo 5</b>	
<b>Figura 5.1</b> Ubicazione movimento di versante in esame .....	118
<b>Figura 5.2</b> Abaco per trovare lo spessore dello strato superficiale .....	124
<b>Figura 5.3</b> Correlazione tra frequenza relative alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo .....	126
<b>Figura 5.4</b> Sondaggio HVSR eseguito sul movimento franoso .....	127
<b>Figura 5.5</b> Ubicazione sondaggio HVSR in prossimità del sondaggio geomeccanico .....	128
<b>Figura 5.6</b> Frequenza caratteristica del sito in esame .....	132
<b>Figura 5.7</b> Variazione di Vs con la profondità.....	133
<b>Figura 5.8</b> Modello del terreno ottenuto con Laser Scanner.....	135
<b>Figura 5.9</b> Modello ottenuto dalla cartografia 1:10000 .....	135
<b>Figura 5.10</b> Comparazione dei due modelli: Quello ottenuto tramite ricostruzione 3D a sinistra, e quello con rilievo Laser Scanner a destra .....	136
 <b>Capitolo 6</b>	
<b>Figura 6.1</b> Lettura segnali acquisiti senza filtraggio .....	139
<b>Figura 6.2</b> FFT segnale acquisito, rispetto l'asse X, Y, Z.....	140
<b>Figura 6.3</b> Rapporto H/V ottenuto elaborando i dati in esame .....	140



## Introduzione

Negli ultimi anni, secondo le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) si è diffuso, nella comunità scientifica sismologica e ingegneristica internazionale, il concetto di effetto di Sito o di Amplificazione topografica che indicano le deformazioni, che il campo d'onda sismico subisce in prossimità della superficie terrestre. La legislazione antisismica (NTC 2008) utilizza come parametro fondamentale per la stima degli effetti di sito la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo, parametro comunemente chiamato  $V_{s30}$ . I calcoli di  $V_{s30}$  sono perciò necessarie quasi ovunque per la microzonazione sia a grande scala che alla scala dei singoli edifici.

L'importanza dello studio delle strutture geologiche locali e superficiali è dato dal fatto che esse sono la causa determinante degli "effetti di sito" generati dalla propagazione delle onde di un terremoto. Da quando è nata la sismologia strumentale, fine del 1800, è stato possibile rappresentare, in diverse posizioni sul territorio, il moto del suolo durante un terremoto.

Quando si registra un terremoto, a questo si aggiungono anche altri segnali, che possono avere origine differente, rispetto alla sorgente sismica crostale, questi possono alterare la qualità del dato sismico. "In sismologia, qualunque segnale che interferisce con la registrazione di un terremoto viene generalmente considerato rumore (*noise*)". Affinchè, la qualità del segnale sismico possa essere utilizzato per poter analizzare la traccia sismica devono essere ridotti i rumori di fondo, in quanto deve essere utilizzata l'ampiezza relativa del segnale sismico rispetto a quella del rumore il quale è definito come rapporto Segnale/Disturbo. In alcune applicazioni sismologiche, però, il dato di interesse non è costituito dalla registrazione delle oscillazioni del terreno, ma dalla registrazione del rumore sismico ambientale che, invece, durante la registrazione di un terremoto costituisce una parte del *rumore*.

Il rumore sismico ambientale o detto anche microtremore, rappresenta un movimento del terreno caratterizzato da ampiezze non percepibili dall'uomo ( $10^{-4}$  –  $10^2$  mm), questo si può osservare su qualsiasi parte della superficie terrestre. Questi rumori, sono il prodotto di una molteplicità di sorgenti che possono avere varie frequenze; in particolare, sono attribuibili ad onde marine e perturbazioni atmosferiche, vento, traffico veicolare e attività industriali.

“Utilizzando le tecniche dei rapporti spettrali H/V, è possibile determinare l’amplificazione delle ordinate spettrali del moto orizzontale di un sito rispetto ad uno di riferimento (*SSR, Standard Spectral Ratio: Borchardt, 1970*), oppure è possibile restituire la funzione di trasferimento attraverso il rapporto tra lo spettro della componente orizzontale del moto rispetto a quella verticale (*HVSR, Horizontal to Vertical Spectral Ratio: (Nakamura, 1989)*”. Tali tecniche necessitano di un numero di dati statisticamente significativo, con un buon rapporto Segnale/Disturbo, in modo da rappresentare le proprietà medie del mezzo di propagazione.

La progettazione in zona sismica richiede la conoscenza delle accelerazioni (velocità o spostamenti) alle quali la struttura in progetto sarà assoggettata alle varie frequenze in caso di terremoto. Questi valori al bedrock, ossia sul livello stratigrafico che per definizione non amplifica il moto del terremoto, sono derivabili da mappe preposte (per es. mappe di  $PGA_0$ , Peak Ground Acceleration attesa al bedrock secondo diverse probabilità). Stabilire come essi vengano amplificati in superficie è un compito che può essere affrontato: 1) mediante specifiche analisi (es. analisi “agli accelerogrammi”) oppure 2) in modo semplificato, tramite la misura di parametri da mettere in relazione con l’amplificazione sismica di sito.

L’argomentazione di questa tesi di dottorato si è impostata principalmente sulla tecnica HVSR e dei rapporti spettrali H/V impiegando misure di *rumore* ambientale, applicati in modo del tutto innovativo per caratterizzare dinamicamente opere viarie e per trovare la frequenza fondamentale di siti soggetti a movimenti franosi. Tale metodo permette anche, di ottenere la quantificazione di specifici indicatori di vulnerabilità dell’edificio, attraverso appositi algoritmi applicati sulle misure di tremore ambientale effettuate all’interno e all’esterno degli edifici. Tale metodo, si è dimostrato essere affidabile, rapido e poco costoso. Per tal proposito, è stato costruito uno strumento sperimentale, per caratterizzare dinamicamente sia edifici o opere viarie quali viadotti, e per determinare la frequenza fondamentale di un sito d’interesse.

Il metodo geofisico (HVSR) strumentale, punta ad identificare la presenza di comportamenti di una struttura ritenuti critici in termini di risposta sismica. La valutazione della presenza dell’effetto della “doppia risonanza” tra sito ed edificio è molto importante, nonostante non sia espressamente contemplata nelle norme tecniche, perché può causare un incremento dell’azione sismica sulla struttura. Tale possibile “sincronizzazione” si valuta semplicemente comparando la frequenza

naturale del sito con quella dell'edificio. Le misure geofisiche di sismica passiva sulla struttura, consentono, anche di individuare effetti torsionali dovuti ad un danneggiamento; la loro eventuale presenza può incrementare le sollecitazioni su alcuni elementi strutturali, aumentando, conseguentemente, la vulnerabilità dell'edificio. Per gli studi ingegneristici, capire questi fattori, può essere di fondamentale importanza, soprattutto per quantificare il rischio sismico degli edifici.

Inoltre, tali studi sulle tecniche di sismica passiva, sono proposti per studiare le amplificazioni topografiche di aree sismicamente attive e per i fenomeni delle risonanze sismiche che si possono generare, considerando l'interazione terreno-struttura.

Alcuni aspetti teorici e sperimentali relativi alla tecnica HVSR sono stati descritti in questa tesi. La sua struttura e brevi spiegazioni dei capitoli sono illustrati di seguito:

- **Capitolo 1:** Il primo capitolo richiama i concetti essenziali riguardanti la propagazione delle onde in un mezzo elastico, sono illustrati i fenomeni fisici (riflessione, rifrazione e diffrazione) che queste subiscono all'interfaccia tra materiali caratterizzati da differenti caratteristiche meccaniche e che appaiono rilevanti per l'interpretazione dei fenomeni di amplificazione sismica locale. Particolare importanza e spazio è stato destinato al lavoro di analisi di letteratura.
- **Capitolo 2:** Il secondo capitolo può essere suddiviso in due parti: una prima parte dove si descrive la tecnica HVSR; una seconda parte dove verrà descritta la strumentazione sperimentale costruita.
- **Capitolo 3:** Nel terzo capitolo nella prima parte verrà presentato un quadro delle strumentazioni utilizzate per l'Early warning e l'utilizzo di tecniche di strumentazioni sperimentali per la caratterizzazione dinamica di ponti in cemento armato. La seconda parte verterà su casi studi e sui confronti dei dati ottenuti.
- **Capitolo 4:** Nel quarto capitolo si parlerà della tecnica HVSR utilizzata per la caratterizzazione sismica di un movimento franoso.
- **Capitolo 5:** Nel quinto capitolo sarà presentata una routine MatLab per l'analisi del rumore ambientale.
- **Capitolo 6:** Nel sesto capitolo saranno espone le conclusioni e le prospettive future per la ricerca.



# Capitolo 1

## 1.1 Analisi del Rischio Sismico e analisi della Geofisica Applicata

“L’Ingegneria Geotecnica Sismica è un ramo dell’Ingegneria Geotecnica; studia gli effetti dei terremoti sull’ambiente naturale e antropizzato, prendendo in considerazione l’effetto dell’interazione terreno – struttura, ed elaborando metodi finalizzati alla previsione e alla mitigazione di tali effetti” (*Gruppo di lavoro MS 2008 – Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica*). Le origini dello studio di questa materia si hanno durante i primi anni del 1950 e contestualmente al grande sviluppo demografico che interessava in quegli anni il mondo occidentale, si è avvertito il bisogno di identificare aree destinate all’ampliamento dei centri abitati che fossero compatibili con le caratteristiche sismiche del sottosuolo (*Gruppo di lavoro MS 2008 – Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica*).

L’evoluzione della materia è tuttora in attivo fermento, per quanto riguarda gli aspetti di carattere Geologico, Sismologico ed Ingegneristico; questa è una materia ad accezione spiccatamente multidisciplinare che coinvolge, anche nella sua realizzazione pratica, una grande varietà di competenze scientifico-professionali. Lo studio di questi fenomeni d’interazione tra terreno ed evento sismico, hanno come scopo ultimo quello di salvaguardare l’ambiente sia esso naturale che costruito, di proteggere vite umane, tutelare opere di interesse artistico e strategico, nonché di effettuare il controllo dell’equilibrio dei sistemi ambientali (stabilizzazione dei terreni liquefacibili, riduzione del rischio di dissesto).

La valutazione del pericolo connesso al danneggiamento di un territorio (*Gruppo di lavoro MS – AQ 2010*) o di una singola struttura si può riassumere mettendo a funzione la pericolosità sismica regionale (H) la vulnerabilità del sistema terreno-fondazione struttura (V) ed il grado di esposizione della comunità interessata al sisma (E). Si può ottenere il così il parametro (R) che sviluppa il concetto di rischio sismico mediante la seguente relazione:

$$R = H * V * E \quad (1)$$

L'output che si ottiene dallo studio dell'Ingegneria Geotecnica Sismica si può identificare quindi con i parametri H e V ovvero rispettivamente nell'analisi statistica degli eventi sismici passati e nella determinazione dei parametri geotecnici caratteristici del terreno di fondazione.

L'introduzione del concetto del **fattore di sito**, che deve essere considerato nella valutazione delle azioni sismiche trasmesse agli edifici e alle infrastrutture (*Gruppo di lavoro MS 2008 – Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica*), segna il passaggio definitivo tra una visione focalizzata alla sola risposta delle strutture e una visione che considera l'influenza e l'importanza delle caratteristiche fisiche, geometriche e meccaniche del terreno di fondazione e, più in generale, del sito. Il concetto di sito può essere interpretato in diversi modi a seconda delle esigenze di dettaglio che si desidera raggiungere; è possibile avviare un'analisi su scala di centro abitato o di singola opera o edificio. Gli effetti che caratterizzano la distribuzione areale della risposta del suolo alle sollecitazioni sismiche profonde sono definiti più semplicemente **effetti di sito**.

Sulla base anche di semplici osservazioni sulla variabilità del danneggiamento sismico in direzione areale appare chiaro come non basti definire un terremoto atteso di riferimento su roccia in posto (bedrock) affiorante (outcropping) per progettare le caratteristiche sismoresistenti di una struttura, ma che occorra anche conoscere le modifiche in termini di ampiezza (*Gallipoli, M. R., Mucciarelli M. et alii 2004*), contenuto in frequenza e direzione di propagazione che le onde sismiche subiscono nella parte finale del loro viaggio dalla sorgente alla superficie (effetti di sito), attribuibili alle caratteristiche topografiche, morfologiche e geotecniche dei depositi che tali onde attraversano.

Questa rinnovata sensibilità si estende alle questioni di carattere non prettamente strutturale ma che influenzano il terreno non antropizzato quali ad esempio: la stabilità dei pendii (movimenti franosi, cedimenti e collassi generalizzati) e i fenomeni di liquefazione che possono talvolta causare il collasso anche di edifici concepiti con le più rigorose norme antisismiche. Tali aspetti possono essere racchiusi nella categoria degli effetti locali.

Effetti locali ed effetti di sito sono l'oggetto primario dello studio di microzonazione sismica e più in particolare dell'analisi di risposta sismica locale. Grazie all'evoluzione della Dinamica dei Terreni, che ha per oggetto lo studio, alle diverse

scale, del comportamento tensionale e deformativo dei terreni in presenza di azioni dinamiche e/o cicliche, è stato possibile ampliare le conoscenze sull'influenza del sito riguardo l'azione sismica e sulla stabilità delle strutture; così che, in alcune Normative europee e internazionali il concetto di sito e di terreno di fondazione ha assunto nel tempo pari dignità rispetto ad altri fattori su cui era basata in precedenza la protezione sismica.

La conseguenza diretta di ciò è venuta da una normativa europea contenuta all'interno degli Eurocodici; in particolare l'**Eurocodice 8** titolato: *Design of structures for earthquake resistance (Progettazione delle strutture per la resistenza sismica)*, il quale propone il recepimento nelle norme nazionali di standard di protezione più elevati, innalzando il grado di protezione sismica finora considerato nell'ambito del costruire. Il nostro paese ha tardivamente recepito le normative contenute nell'Eurocodice emanando il **D.M. 14 gennaio 2008 Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)**.

Il recepimento da parte degli stati membri degli Eurocodici è stato in generale assai lento per via delle ingenti complicazioni introdotte e per la vasta base di conoscenze ed esperienze sul territorio che esso richiede, traducendosi in un dispendio economico gravoso per le Amministrazioni Pubbliche. È necessario ricordare però, che la Dinamica dei Terreni non nasce solo ed esclusivamente con lo scopo di studiare il comportamento del terreno in caso di evento sismico, ma più in generale per definire il comportamento dinamico dei terreni di fondazione in presenza di carichi dinamici o ciclici come ad esempio per:

- a) La progettazione delle fondazioni di macchine, turbine, antenne radar, impianti industriali, centrali nucleari, etc.;
- b) Lo studio degli effetti indotti dalle vibrazioni prodotte dal traffico stradale e ferroviario, da macchine di cantiere, da sonde, magli, infissione di pali e di diaframmi, etc.;
- c) L'analisi degli effetti di esplosioni (accidentali e provocate);
- d) La progettazione di strutture offshore in presenza di azioni sismiche e/o moti ondosi eccezionali;
- e) Il calcolo delle strutture di fondazione e delle opere geotecniche nelle zone sismiche;

- f) La previsione degli effetti locali dei terremoti (frane, fenomeni di liquefazione del terreno, cedimenti ed effetti di amplificazione locale della risposta sismica);
- g) La messa a punto di tecniche di miglioramento dei terreni con metodi dinamici;
- h) L'esplorazione dei terreni con metodi geofisici.

L'Ingegneria sismica è un settore multidisciplinare(fig.1.1) dell'ingegneria civile che **studia la risposta ai terremoti dell'ambiente costruito e dei terreni**, al fine di: **progettare costruzioni nuove sicure e aumentare la sicurezza sismica delle costruzioni esistenti.**

Lo studio dei fenomeni che governano i terremoti non è parte propriamente detta dell'ingegneria sismica. E' la **geofisica** che fornisce le **mappe di pericolosità sismica**. Queste mappe forniscono il cosiddetto **terremoto di progetto**, usato dagli ingegneri per il dimensionamento delle strutture.

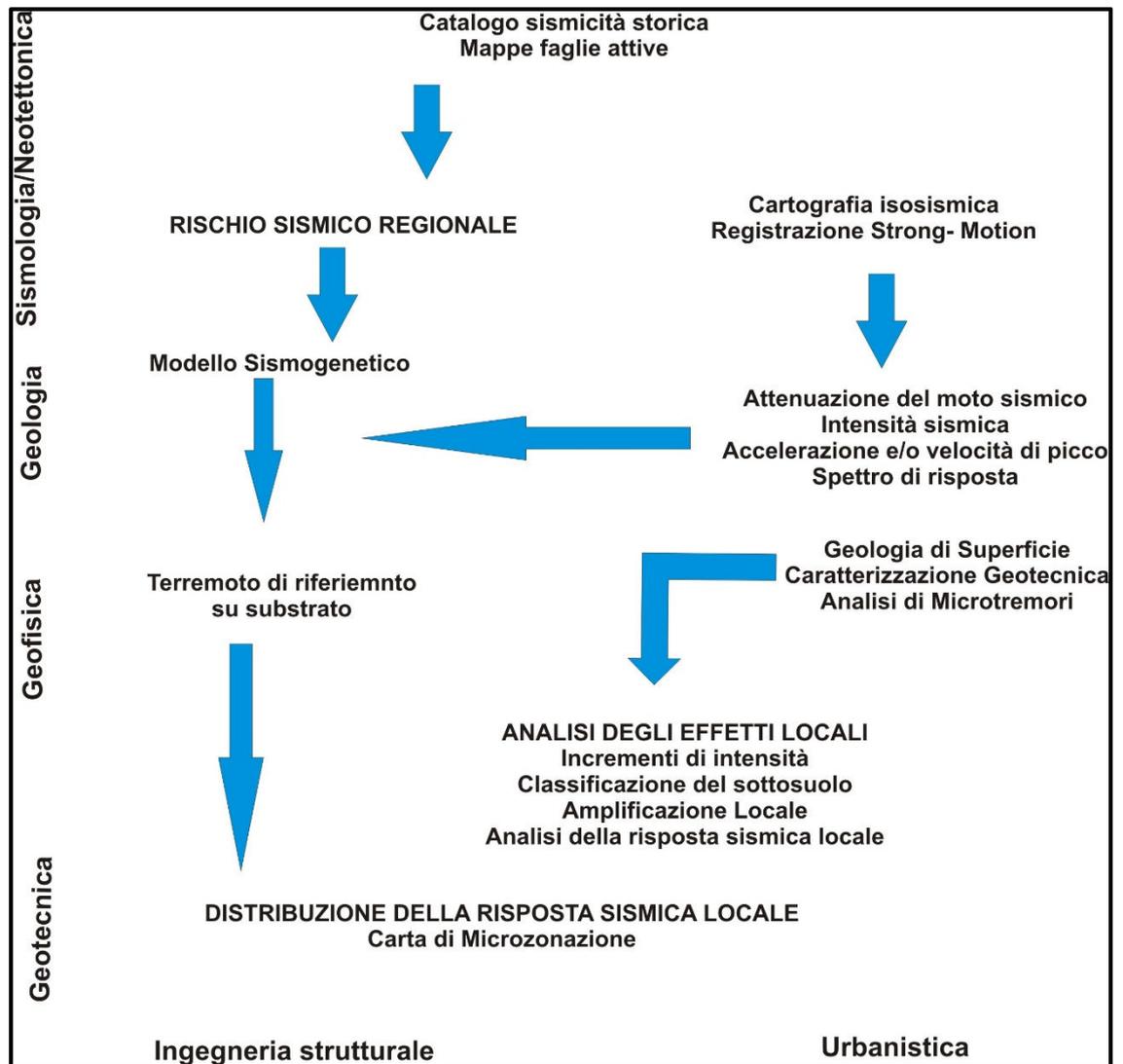


Figura 1.1 Schema Concettuale che lega le varie discipline per la riduzione e prevenzione del Rischio Sismico.

## 1.2 Rischio Sismico e Macrozonazione Sismica

La penisola italiana è una delle zone sismicamente più attive del Mediterraneo (fig. 1.2.1). Suddetta regione è stata inoltre, sede di alcune tra le più antiche civiltà, e ciò ha permesso la registrazione di notizie attendibili anche di eventi sismici molto antichi, ma solo a partire dal XIX secolo gli studiosi di sismologia hanno cominciato a stilare da queste cronache le informazioni riguardanti i terremoti nel tentativo di “scrivere” una storia sismica italiana. Dalla raccolta e classificazione sistematica di eventi sismici sono nati i primi cataloghi dei terremoti. La nuova versione del *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani* CPTI (*Gdl, CPTI, 1999*), detta CTPI2, aggiornata al 2002, è

stata realizzata utilizzando tutti gli studi macrosismici e strumentali resi disponibili dal 1999 in poi.

Numerosi studi hanno sottolineato che la pericolosità sismica non dipende solo dal tipo di terremoto, dalla distanza tra l'epicentro e la località interessata, ma, soprattutto, dalle caratteristiche geologiche dell'area di interesse. Infatti, la geometria della struttura del sottosuolo, le variazioni dei tipi di terreni e delle sue proprietà con la profondità, le discontinuità laterali, e la superficie topografica sono all'origine delle larghe amplificazioni delle vibrazioni del terreno e sono stati correlati alla distribuzione del danno durante i terremoti distruttivi (*Aki, 1993; Bard, 1994; Faccioli, 1991, 1996; Chavez-Garcia et alii, 1996*). Questi fattori sono particolarmente importanti per la corretta valutazione dell'azione sismica nell'ambito della difesa dai terremoti, per tale motivo, ai fini della riduzione del rischio sismico, è importante riconoscere le aree in cui le oscillazioni del suolo sono più ampie e definire le frequenze con le quali esse tendono ad oscillare.

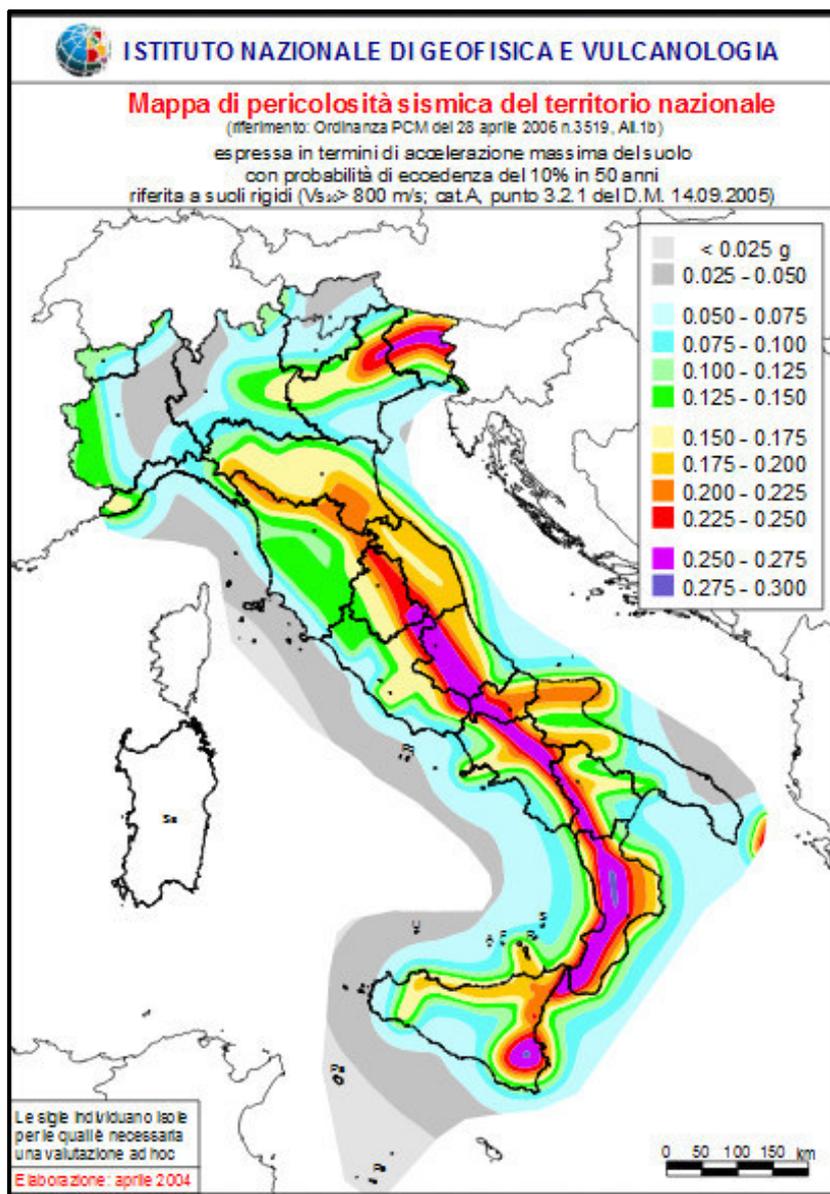


Figura 1.2.1 Mappa pericolosità sismica del territorio italiano. La valutazione delle distribuzioni di  $a_{max}^1$  con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, effettuate dal GdL INGV (2004) per la realizzazione della mappa di pericolosità sismica, sono state realizzate con il codice SEISRISK III, e nella valutazione sono state esplorate diverse alternative con un approccio ad albero logico (GdL, 2004). Fonte INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

La regione mediterranea è una regione geologicamente molto attiva, che sta subendo una deformazione piuttosto rapida ed è caratterizzata da una sismicità diffusa che non è ristretta solo lungo i bordi delle zolle (Vannucci et alii, 2004). La pericolosità sismica

<sup>1</sup> E' il principale parametro descrittivo della pericolosità di base utilizzato per la definizione dell'azione sismica di riferimento per opere ordinarie (Classe II delle Norme Tecniche per le Costruzioni). Convenzionalmente, è l'accelerazione orizzontale massima su suolo rigido e pianeggiante, che ha una probabilità del 10% di essere superata in un intervallo di tempo di 50 anni.

di base costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

Per *Zonazione Sismica* di un territorio si intende l'insieme di criteri geologici, geofisici ed ingegneristici atti ad individuare e a delimitare aree a risposta omogenea rispetto al rischio sismico. I criteri e le metodologie d'intervento dipendono dall'estensione delle aree che si prendono in considerazione. Si parlerà quindi di **Macrozonazione Sismica** o Zonazione di Primo Grado (*Int. Geot.Ass, TC4, 1999*) se la scala è a livello regionale; di **Microzonazione Sismica** o Zonazione di Secondo Grado (*Int. Geot.Ass, TC4, 1999*), se la scala d'indagine è comunale, e di **Risposta Sismica di Sito** o Zonazione di Terzo Grado (*Int. Geot.Ass, TC4, 1999*). Nell'effettuare la Macrozonazione Sismica esistono diversi parametri da valutare. Primo fra tutti il periodo di ritorno di interesse di un terremoto. In particolare, poiché il tempo di durata di un edificio è di cento anni, si considera che tale costruzione dovrà essere in grado di sopportare, senza riportare danni, il terremoto con periodo di ritorno di cento anni, e un terremoto di intensità maggiore che abbia periodo di ritorno più lungo, subendo dei danni che non comportino il rischio di vite umane. Altri parametri da valutare sono l'effetto legato a un evento sismico in un'area posta ad una certa distanza dall'area sismogenetica e l'accelerazione massima "a" del suolo durante il terremoto. Entrambi i parametri vengono calcolati mediante l'ausilio di relazioni empiriche.

### **1.2.1 Rischio Sismico in Calabria**

In questo paragrafo verrà illustrato il rischio sismico in Calabria, visto che la ricerca si è imposta sulla raccolta dati in questa regione, è giusto richiamare il concetto di Rischio Sismico in questa suddetta zona d'Italia.

L'alta sismicità della Calabria (fig.1.2.1.1) in pratica è una delle manifestazioni dei rapidi processi di evoluzione geologica in atto nella regione e nel centro del Mediterraneo. Poiché, i processi geologici, com'è noto, durano milioni di anni, è evidente che terremoti distruttori (come ad. es. quelli del 1638, 1783, 1888, 1905, 1908 che hanno gravemente colpito tutti i 409 comuni della nostra regione) continueranno a scuotere la Calabria ancora per molto tempo (*Moretti et alii 1976*). Così com'è altrettanto evidente che più ci si allontana dall'ultimo forte evento sismico, più aumentano le probabilità del suo ripetersi.

L'elevata sismicità, le condizioni di degrado del patrimonio edilizio (la Calabria è la regione italiana con il patrimonio edilizio più degradato e meno resistente alle

sollecitazioni prodotte dai sismi), il dissesto idrogeologico e, non ultima, la carenza di adeguati Piani comunali di Protezione Civile, sono i fattori che rendono estremamente elevato il rischio sismico in Calabria. Nella regione a più elevato rischio sismico d'Italia restano da mettere in sicurezza molti edifici pubblici ed in particolare molte delle scuole dei 409 comuni della Calabria.

In Calabria il numero degli edifici considerati a rischio è di circa 1800 dei quali oltre mille ricadenti in comuni classificati nella zona di massima pericolosità. In proposito va considerato che la più recente normativa antisismica suddivide il territorio nazionale nelle seguenti categorie:

Zona 1: E' la zona più pericolosa, dove possono verificarsi forti terremoti; comprende, in tutta l'Italia 708 comuni dei quali circa un terzo, esattamente 261 comuni, sono in Calabria.

Zona 2: Nei comuni inseriti possono verificarsi terremoti abbastanza forti e comprende complessivamente 2.345 comuni dei quali 148 della Calabria.

Zona 3: I 1.560 comuni ricadenti in questa zona possono essere soggetti a scuotimenti modesti.

Zona 4: E' la meno pericolosa con 3.488 comuni dove le possibilità di danni sismici sono basse.

In pratica, i comuni della Calabria ricadono tutti nella prima e seconda zona, e, quindi, nelle due più pericolose.

L'introduzione della nuova normativa (*Legge Regionale n. 37 del 28 dicembre 2015*), tra l'altro, ha comportato il passaggio nella zona a più elevata pericolosità di 114 comuni, come ad esempio Cosenza e Lamezia Terme, che con la precedente legge del 1984 erano classificati di seconda categoria. Per ogni zona sono inoltre previste norme precise e vincoli cui è obbligatorio attenersi per costruire nuovi edifici o ristrutturare quelli già esistenti. Inoltre, la nuova normativa prevede l'obbligo di procedere alla verifica su tutto il territorio degli edifici "strategici", per poi intervenire: in pratica scuole, ospedali, caserme, ponti e importanti vie di collegamento, che devono rispondere alla categoria di appartenenza.

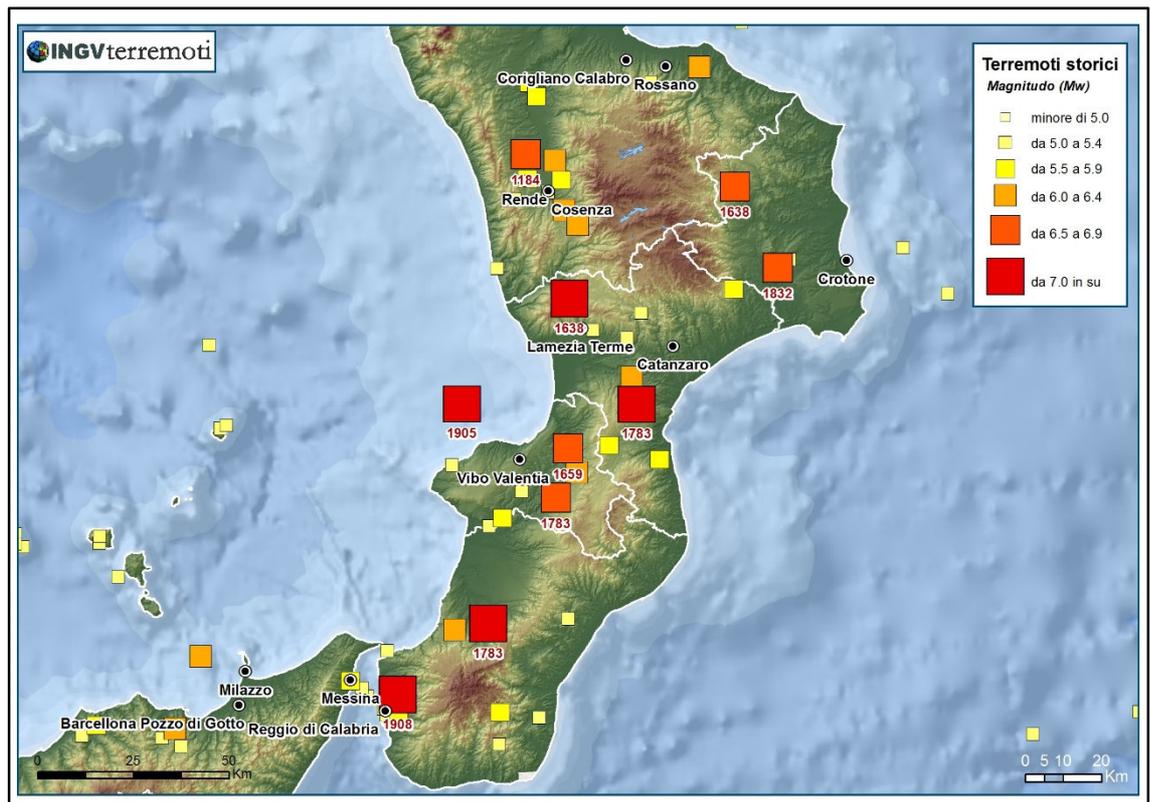


Figura 1.2.1.1 Terremoti storici dall'anno 1000 in Calabria. (Fonte Web, INGV).

### 1.3 Onde Sismiche

In questo paragrafo, si spiegherà in modo sintetico i concetti base delle onde sismiche; in particolare:

- Come si manifestano le onde
- Perché si utilizzano per investigare il sottosuolo

La descrizione della propagazione delle onde sismiche presuppone la conoscenza del comportamento meccanico delle rocce quando soggette a sollecitazioni di breve durata. L'onda sismica che si propaga nella materia produce uno spostamento delle singole particelle del mezzo (supposto continuo) rispetto alla loro posizione di equilibrio. Gli spostamenti prodotti dalle onde sismiche nella Terra si presumono essere associati a piccole deformazioni: le equazioni che governano la propagazione delle onde sono quindi ottenute a partire da questa ipotesi semplificativa, che consiste nel considerare piccole perturbazioni rispetto ad una posizione di equilibrio.

### 1.3.1 Le onde sismiche e la loro propagazione

Le onde sismiche si originano dall'attrito prodotto dallo scorrimento delle masse crostali lungo la superficie di faglia. Questa energia in parte è dissipata come lavoro (spostamento delle masse coinvolte) e in parte si trasmette nella roccia fino a interessare la coltre più superficiale della superficie terrestre. Questa porzione di energia che non interviene nello spostamento delle masse crostali si trasmette sotto forma di onde sismiche. “Esse sono classificabili come onde di tipo elastico, caratterizzate da un determinato contenuto energetico espresso dai parametri quali velocità di propagazione, ampiezza e contenuto in frequenza (*Albarello D., Lunedei E., et alii 2010*)”.

Durante il percorso che compiono le onde elastiche dall'origine del sisma (ipocentro) fino a giungere in superficie, esse incontrano strati di terreno o roccia caratterizzati da differenti caratteristiche fisiche (densità) e meccaniche (rigidezza), eventualmente soggette a discontinuità e a comportamento non perfettamente elastico (*Mechanical Sciences (CISM), Udine 2007*). Conseguentemente il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente ma a diventare il risultato di ulteriori due meccanismi eventualmente combinati:

- La propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base
- La risposta dinamica delle formazioni superficiali

Nell'attraversare questi differenti materiali le onde subiscono riflessioni e rifrazioni al punto che solo a una parte di esse giunge in superficie subendo importanti modifiche nella direzione di propagazione e comunque con una perdita di energia crescente con la distanza. Le principali modificazioni delle caratteristiche dell'onda sismica, che aumentano di entità all'aumentare dei volumi interessati dalla perturbazione, sono i seguenti:

- **Raddrizzamento della direzione** dell'onda sismica che giunge alla superficie libera con direzione perpendicolare al suolo generando un moto di tipo orizzontale
- **Un'attenuazione delle ampiezze** dovuta principalmente a: smorzamento geometrico prodotto dalla diffusione dell'energia sprigionata dal terreno su fronti d'onda di raggio crescente con la distanza della sorgente, da smorzamento per

scattering (riflessione e rifrazione) e per smorzamento interno (dissipazione da parte dei mezzi interessati).

La propagazione di un'onda (piana o non) può essere rappresentata, nel limite di alta frequenza, mediante vettori normali al fronte d'onda, che sono definiti *raggi*. Nel caso di un'onda piana, i raggi, essendo ortogonali a fronti d'onda piani, risultano essere paralleli tra loro. La traiettoria di un'onda è la curva descritta dai raggi sismici durante la propagazione dalla sorgente al ricevitore. Vedremo successivamente che in un mezzo elastico omogeneo (ossia nel quale la velocità delle onde elastiche  $v$  è uniforme) le traiettorie dei raggi sono linee rette, mentre sono generalmente curve nel caso di un mezzo di propagazione non omogeneo (Dal Moro G., 2005). D'altra parte le sorgenti di onde sismiche risultano confinate in una regione localizzata dello spazio e dunque ci aspettiamo che le onde emesse da sorgenti localizzate sviluppino dei fronti tridimensionali nel senso che la perturbazione in spostamento, ad ogni istante di tempo, sia funzione di  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Di conseguenza il fronte d'onda può assumere forma generalmente differente da un piano (fig.1.3.1):

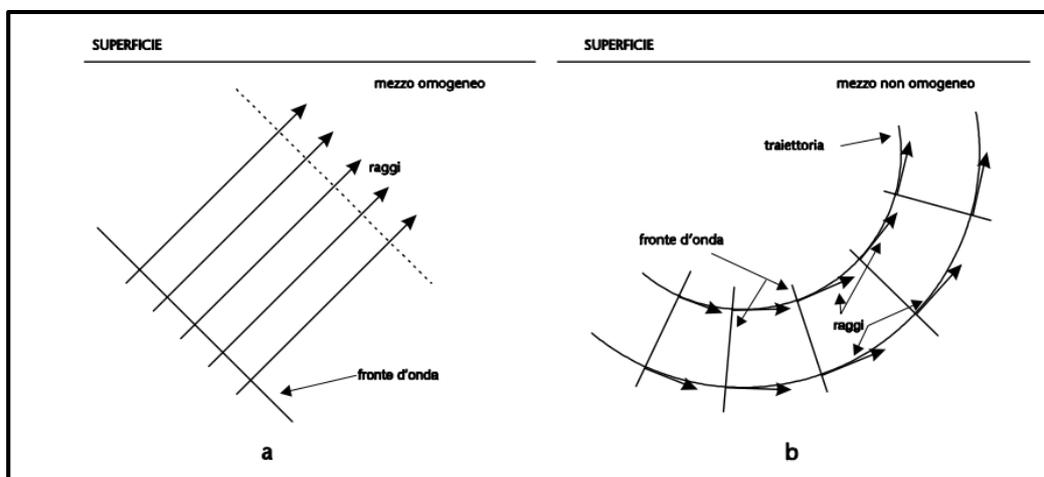


Figura 1.3.1 a) Fronte d'onda e raggi in un mezzo elastico omogeneo. b) Fronte d'onda e raggi in un mezzo non omogeneo. Fonte Web [http://www.openfisica.com/fisica\\_ipertesto/onde/fronti.php](http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/onde/fronti.php).

L'onda sferica (fig.1.3.2) è una perturbazione in spostamento che si propaga seguendo fronti d'onda di forma sferica, concentrici con la sorgente di emissione. In un mezzo in cui la velocità di propagazione delle onde sia uniforme, a grosse distanze dalla sorgente, il fronte d'onda sferico può essere approssimato da un fronte d'onda piano.

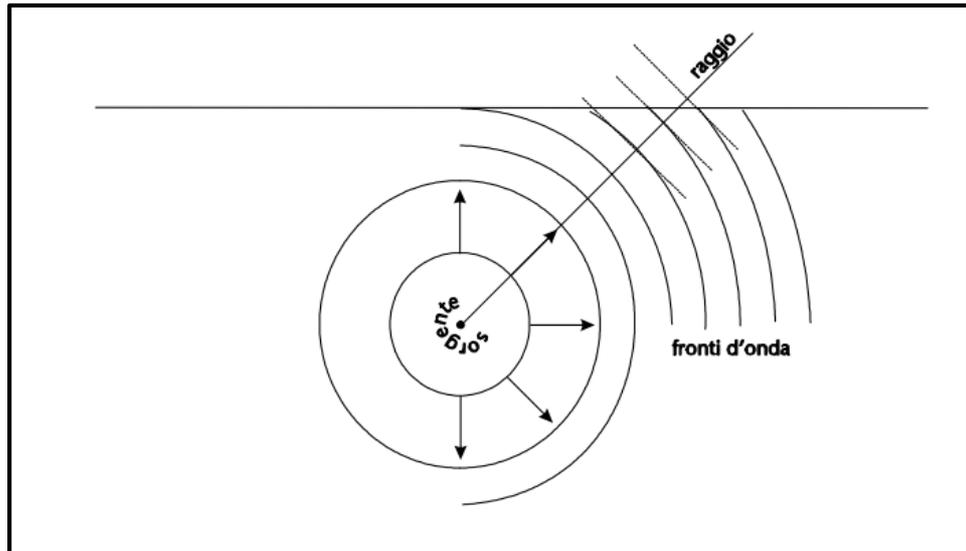


Figura 1.3.2 In un mezzo omogeneo, i fronti d'onda sferici, a grande distanza dalla sorgente, sono approssimabili con dei fronti d'onda piani. Fonte Web [http://www.openfisica.com/fisica\\_ipertesto/onde/fronti.php](http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/onde/fronti.php).

Le informazioni utili per la rappresentazione del moto sismico connesse a una registrazione sismologica sono essenzialmente (fig. 1.3.3):

- L'**ampiezza**: picco più alto, in valore assoluto, registrato per l'accelerazione, e calcolato generalmente per una delle componenti orizzontali e per la componente verticale;
- Il **contenuto in frequenza**: descrive come le ampiezze del moto sismico sono distribuite nelle varie frequenze, essa costituisce una informazione importante che deve essere tenuta in conto nella progettazione strutturale degli edifici;
- La **durata**: durata del fenomeno sismico relativa alla sola porzione strong motion (escludendo le porzioni ad intensità trascurabile) dell'*accelerogramma*.

Queste proprietà sono determinate dall'analisi degli **accelerogrammi**: diagrammi che rappresentano le accelerazioni, in funzione del tempo, indotte al suolo, in un dato sito in tre direzioni ortogonali, durante l'evento sismico (fig. 1.3.4).

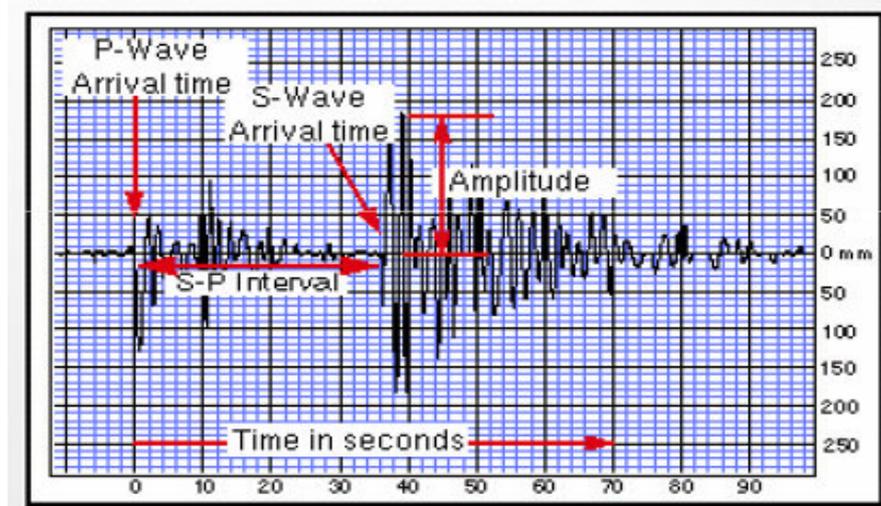


Figura 1.3.2 Rappresentazione onde sismiche in un sismogramma. Fonte: Corso Microzonazione Sismica di 1 Livello – Albarello.

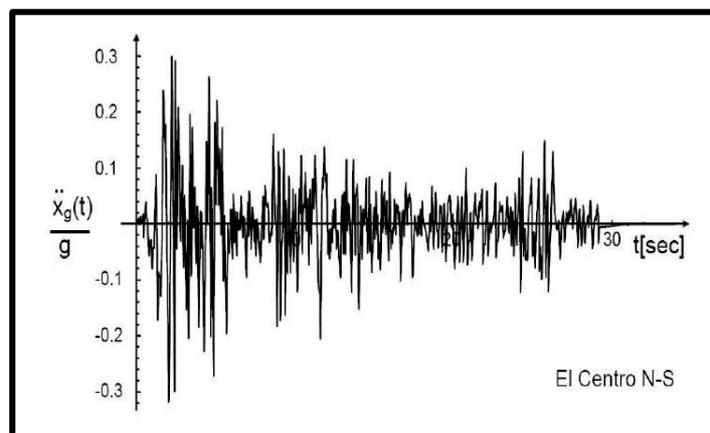


Figura 1.3.3 Rappresentazione Accelerogramma in funzione del tempo. Fonte: Corso Microzonazione Sismica di 1 Livello – Albarello.

La propagazione delle onde attraverso gli strati che compongono la crosta terrestre, come pure succede per qualsiasi altro materiale, produce una modificazione delle caratteristiche peculiari dell'onda emessa, in termine di amplificazioni o smorzamenti dell'energia veicolata e modifica dello spettro elastico. L'energia trasportata da queste onde si traduce, come effetti diretti, in sollecitazioni e deformazioni applicate al terreno superficiale e quindi in spostamenti; in letteratura questo fenomeno è meglio conosciuto come scuotimento sismico o terremoto<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Si tratta di un rilascio improvviso di energia per effetto di una rottura e di successivi spostamenti relativi in corrispondenza di una faglia. Gli spostamenti si trasmettono con la propagazione di onde sismiche nel terreno causando uno scuotimento del suolo alla base delle strutture.

### 1.3.1 Onde di Rayleigh e onde di Love

Verranno qua analizzate in modo sintetico le onde principali che vengono utilizzate in studi geologici e geotecnici (*Dal Moro G., 2005*).

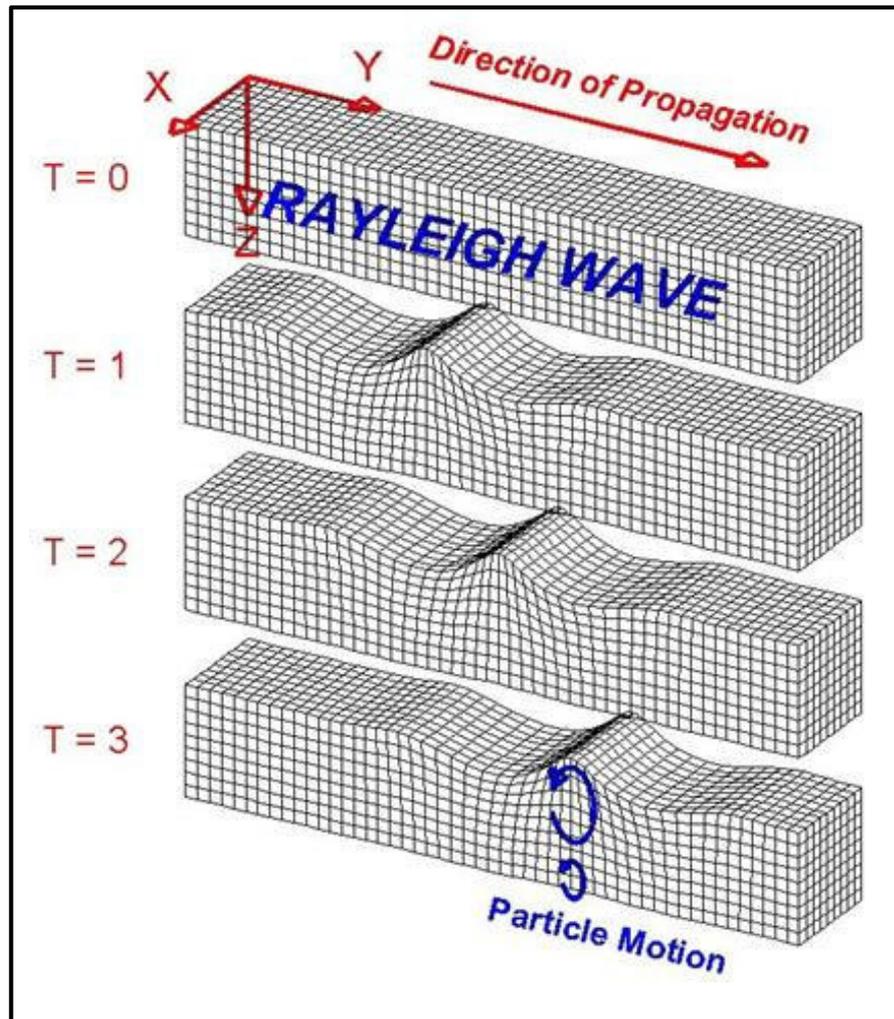
Le onde di superficie<sup>3</sup> che interessano chi si occupa di studi su terra ferma sono due: quelle di Rayleigh e quelle di Love<sup>4</sup>. Vengono qui schematizzate per snellezza alcune caratteristiche delle suddette onde:

La teoria di Rayleigh spiega in termini di onde di superficie, generate alla superficie libera della Terra, gli arrivi a bassa frequenza ( $< 0.1\text{Hz}$ ) di ampiezza dominante, osservati sulle registrazioni di terremoti a distanza telesismica ( $> 1000\text{ km}$ ). La velocità di propagazione dell'onda di Rayleigh è di pochi percento inferiore a quella delle onde S (per un solido di Poisson  $\nu = 0.25$  e  $v_R = 0.92 v_S$ ). La polarizzazione dell'onda di Rayleigh è di tipo ellittico (fig. 1.3.2.1) ed il vettore spostamento è compreso nel piano verticale, essendo quest'onda composta da moti di tipo P – S<sub>v</sub>. Il senso del movimento delle particelle associate alla propagazione di un'onda di Rayleigh può essere compreso assumendo come moto progrado quello di una palla che rotola dalla sorgente verso il ricevitore:

---

<sup>3</sup> Quando un'onda P o S impatta ad una superficie di discontinuità vengono generati quattro tipi di onde: due riflesse e due trasmesse. Nel caso di onde inomogenee, l'energia sismica resta confinata in prossimità della discontinuità a causa della drastica riduzione di ampiezza in funzione della distanza dell'interfaccia. L'accoppiamento del moto P e della componente S nel piano verticale (S<sub>v</sub>) genera un'onda che si propaga lungo la superficie di discontinuità.

<sup>4</sup> I nomi derivano da coloro che per primi ne hanno previsto e descritto il carattere: Rayleigh nel 1885 e Love nel 1911.



*Figura 1.3.2.1 Onde di Rayleigh.  $T$  rappresenta il passare del tempo. Si noti come le onde di Rayleigh si muovano tanto secondo una componente orizzontale (radiale o parallela rispetto la direzione di propagazione) che verticale (moto retrogrado) (fonte: [www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html](http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html)).*

L'onda di Love, ha le caratteristiche di un'onda di superficie. Essa è polarizzata linearmente nel piano orizzontale e produce un moto delle particelle analogo a quello associato alla componente orizzontale dell'onda di taglio  $S_H$ . La sua ampiezza decade esponenzialmente allontanandosi dalla superficie di discontinuità interna che l'ha generata (fig. 1.3.2.2):

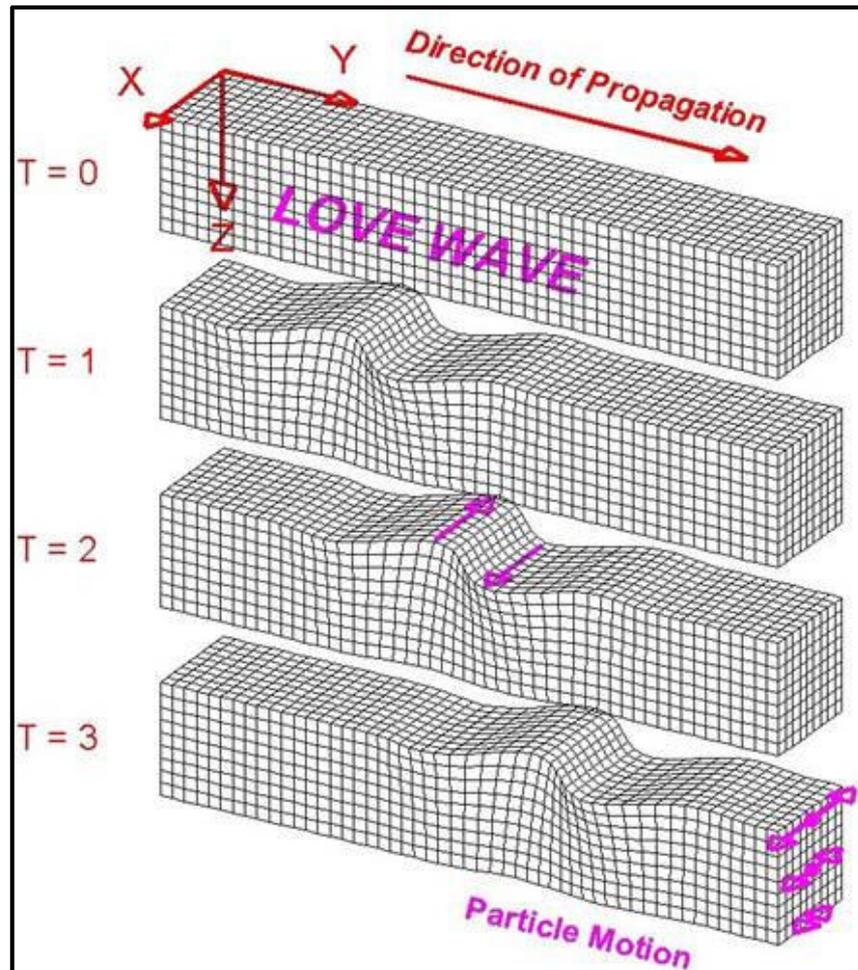


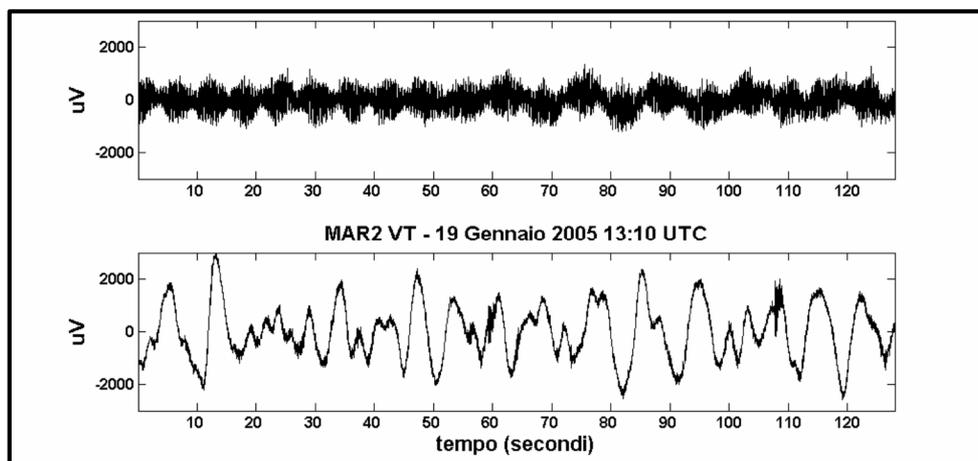
Figura 1.3.2.2 Onde di Love. Si noti come le onde di Love si muovano unicamente sul piano orizzontale (con moto perpendicolare alla direzione di propagazione) e non abbiano alcuna componente verticale (fonte: [www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html](http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html)).

#### 1.4 MICROSISMI

In questo paragrafo verranno analizzati i “microsismi”, sono questi ultimi su cui si basa il principio della tecnica HVSR: qui di seguito i dettagli: i microsismi sono registrati continuamente dai sensori sismici e determinano i livelli di rumore sismico nella banda di frequenza da 0.04 a 2 Hz (Essen et al., 2003; Bromirski et al., 2005). “Essi sono osservati in tutto il mondo con ampiezze maggiori nei siti costieri rispetto ai siti continentali (Bromirski, 2001). I microsismi sono stati rilevati fin dal momento in cui i sismologi hanno registrato il movimento della Terra per osservare i terremoti. Wiechert (1904) associa i microsismi alle onde dell’oceano ed ai frangenti costieri. Gutenberg (1912, 1921, 1947) studia i microsismi per più decenni ed a quel tempo era già chiara l’origine oceanica di questo segnale” ( Tesi S. Marzorati – Bicocca). La

prima teoria sui microsismi venne pubblicata nel 1950 (*Longuet-Higgins, 1950*). Questa teoria viene tutt'oggi utilizzata dalla comunità scientifica per la spiegazione del picco DF- Double Frequency peak: esso risulta dall'interazione non lineare tra componenti delle onde marine (*gravity waves*) che viaggiano in direzioni opposte e che possiedono la stessa lunghezza d'onda, questa interazione genera delle onde stazionarie con frequenza doppia rispetto alle onde marine; il meccanismo determina un trasferimento di energia nella crosta terrestre sotto forma di onde sismiche che vengono rilevate in siti continentali come microsismi.

In Fig.1.4.1 sono visualizzate due tracce di noise sismico ambientale, registrate con un sensore broad band in due finestre temporali differenti. Nel riquadro inferiore la traccia di noise sismico ambientale è visibilmente modificata dalla presenza di intensi microsismi, i quali raggiungono le ampiezze maggiori per frequenze intorno a 0.2 Hz. Lo spettro tipico di un segnale relativo ad un microsisma mostra due picchi dominanti: il picco più ampio e di frequenza maggiore (a circa 0.2 Hz) è chiamato "Double Frequency peak" (DF); il picco meno ampio è chiamato "Primary peak" o "Single Frequency peak" (SF).



*Figura 1.4.1 Tracce di rumore sismico ambientale della componente verticale registrate in due momenti differenti. La seconda finestra rappresenta un intervallo temporale in cui è presente un'intensa attività microsismica. (Fonte foto Web).*

Le frequenze che vanno da 0.1 a 0.5 Hz (*Bromirski, 2001*) riguardano il picco DF (fig.1.4.2). I microsismi si propagano principalmente come modo fondamentale delle onde di Rayleigh, questo è stato possibile tramite delle Analisi di particle motion e fase del segnale, sia in oceano (*Barstow et al., 1989*) che in siti continentali (*Haubrich e McCamy, 1969; Tanimoto et al., 2006*). Siccome le onde di Rayleigh si propagano a velocità elevate (circa 3.5 km/s) rispetto

alle gravity wave marine ( $< 20$  m/s), i sismometri posti in siti costieri rilevano i microsismi nel momento della loro generazione e riflettono le caratteristiche del campo delle *gravity wave* nel tempo (Bromirski, 2001).

Il picco SF (Single Frequency peak) si trova generalmente tra 0.04 e 0.15 Hz. Il meccanismo di generazione del picco SF è probabilmente il trasferimento di energia direttamente dalle onde marine nella terra solida; esso include al suo interno sia l'azione di pressione delle onde marine sui fondali poco profondi che il batimento diretto delle onde sulle coste (Hasselmann, 1963). In alcuni autori tra cui, Kibblewhite and Ewans (1985) e in Bromirski et al. (1999) viene osservata un'alta correlazione tra l'altezza delle onde marine locali e le ampiezze dei microsismi. Le ampiezze dei picchi SF dipendono dalla lunghezza d'onda, dall'ampiezza delle *onde gravitazionali* e dalla lunghezza della costa colpita (Bromirski 2001). “Quindi siccome i picchi SF si generano in acque poco profonde, osservare contemporaneamente picchi SF associati ai DF è un'importante indicazione del meccanismo di formazione di aree sorgenti di microsismi nelle vicinanze delle coste” (Tesi S. Marzorati).

Altri autori tra cui (Sutton e Barstow, 1990; Kibblewhite e Wu, 1993; Bradley et al. 1997; Webb, 1998; Stephen et al., 2003b; Bromirski, 2001; Bromirski et al. 2005; Dahm et al., 2006) affermano che i microsismi sono stati osservati anche sotto il fondo marino allo scopo di individuare le zone sorgenti e per osservare le caratteristiche di propagazione dei microsismi stessi, paragonando le osservazioni effettuate negli oceani e sui continenti.

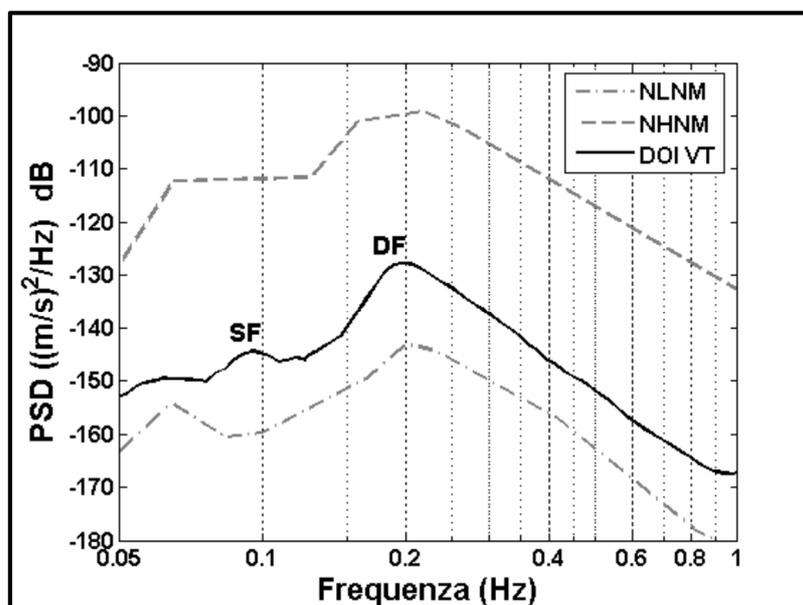


Figura 1.4.2 Esempio di Power Spectral Density (PSD) di un microsisma relativa alla componente verticale del segnale. SF: ‘Single Frequency peak’; DF: ‘Double Frequency peak’. Fonte tesi PhD S. Marzorati.

Le aree sorgenti dei microsismi è determinata dal campo d'onda marino. Dorman et al. (1993) distinguono tra microsismi DF generati da onde lunghe (swell) le quali provengono da tempeste lontane in mezzo agli oceani e quelli generati dalle onde dei mari indotte dall'azione dei venti locali. I due tipi di fenomeni, spesso risultano nella scissione del picco DF in due picchi, il primo tra 0.085-0.20 Hz ed il secondo tra 0.2-0.5 Hz (Stephen et al., 2003b). Secondo l'autore Bromirski et al. (2005) i due tipi di microsismi DF vengono denominati Long Period DF (LPDF) e Short Period DF (SPDF). Le risonanze delle onde di taglio nei sedimenti sul fondo marino creano dei picchi sia alle frequenze dell'Holu spectrum sia alle frequenze dei microsismi SPDF (Stephen et al., 2003b). In dipendenza dello spessore e della rigidità dei sedimenti, le risonanze formano picchi spettrali evidenti che possono risultare nei microsismi SPDF più stretti ed ampi di quelli che si osserverebbero in assenza dei sedimenti.

“Perché i microsismi DF si possano generare lontano dai continenti, l'azione delle onde stazionarie in acque molto profonde dovrebbe essere ancora sufficiente a trasferire energia nella crosta oceanica; inoltre i microsismi DF così generati dovrebbero propagarsi fino ai siti continentali senza essersi attenuati significativamente. Le onde di Rayleigh crostali si propagano con una piccola attenuazione lungo regioni oceaniche e continentali (*Dorman et al., 1991*) e quindi possono, in teoria, contribuire significativamente ai livelli dei microsismi al di fuori delle aree di generazione”. Sono poche le prove dirette che identificano la posizione di una sorgente e comunque non ne danno una dimensione definita; inoltre è indubbio che i microsismi DF si generano per l'interazione delle onde marine con le onde che viaggiano in opposizione, riflesse dalle coste, ma non è del tutto chiaro se essi si possono anche generare lontano dalle coste per l'interazione di onde indotte dalle variazioni di pressione e direzione dei venti, dovute ai cicloni ed alle tempeste oceaniche.

## 1.5 Sismica Passiva

Le tecniche di misura HVSR o di sismica passiva<sup>5</sup> si basano sulla misura e sull'analisi delle vibrazioni del terreno prodotte da sorgenti non controllate. In particolare (*Albarello D., 2008*), l'ambient vibration seismology è basata sullo studio del cosiddetto "rumore sismico ambientale" (ambient vibrations).

Le vibrazioni ambientali sono costituite da piccole vibrazioni del terreno (spostamenti dell'ordine di  $10^{-4}$  -  $10^{-3}$  cm, in un intervallo di frequenze molto al di sotto della soglia di percezione umana) che è possibile osservare sperimentalmente in qualunque punto della Terra.

Viene di volta in volta anche designato con i termini di rumore sismico (seismic noise), microtremore (microtremor), microsismi (microseisms), rumore ambientale (ambient vibrations).

Questo tipo di fenomeno è stato indagato sin dai primordi della sismologia strumentale ma negli ultimi anni c'è stata una progressiva crescita interesse dei sismologi e degli ingegneri in vista delle sue potenziali applicazioni per la caratterizzazione dinamica del sottosuolo e delle strutture edilizie (*Mucciarelli M., 2005*).

In generale, studi di questo genere (*Gallipoli et alii 2005*) nel corso degli anni hanno messo in evidenza che il rumore ambientale può essere differenziato in tre domini di frequenza:

1. Bassa frequenza (<0.5 Hz) Microsismi

E' di origine essenzialmente naturale con sorgenti di grandi dimensioni spaziali (onde oceaniche, grandi perturbazioni atmosferiche, ecc.); ha un carattere stazionario (ovvero le sue proprietà statistiche non cambiano nel tempo) alla scala delle ore e dei giorni.

2. Alta frequenza (>1 Hz) Microtremore

E' di origine essenzialmente antropica (traffico veicolare e pedonale, attività industriale, ecc.) e talvolta naturale ma a scala locale (vento sugli edifici e le piante, ecc.);

3. Frequenza intermedia (<1 Hz e >0.5 Hz)

---

<sup>5</sup> Le misure di sismica passiva, vengono utilizzate per la tecnica HVSR, dove verrà analizzata nel capitolo successivo.

A seconda delle caratteristiche del sottosuolo, sia sorgenti naturali che antropiche possono condizionare le vibrazioni ambientali, con un livello di stazionarietà variabile da caso a caso. Fra le cause principali del rumore in bassa frequenza ci sono le perturbazioni atmosferiche e le onde marine, dove si è parlato nel paragrafo precedente.

# Capitolo 2

## **Tecnica HVSR e strumentazione sperimentale**

In questo capitolo si parlerà della tecnica HVSR, più nota come Metodo di Nakamura. Si tratta di un procedimento speditivo, economico ed affidabile che permette di mappare il territorio non più in conseguenza di un evento verificato ma in previsione di un evento atteso, in modo da poter conoscere il “modo di vibrare” proprio di ogni microzona per poter agire di conseguenza sugli edifici presenti.

La tecnica HVSR punta all'individuazione di possibili fenomeni di risonanza sismica ed alla determinazione delle corrispondenti frequenze di vibrazione. In questo lavoro di tesi, la tecnica viene applicata anche a registrazioni sulle strutture di opere civili. Inoltre, le funzioni H/V possono poi essere invertite per ricavare un modello di distribuzione di velocità delle Onde S nei vari strati di terreno. Il vantaggio nell'utilizzare le misure HVSR consiste nel fatto che non è necessario conoscere la registrazione del moto del substrato per ottenere la funzione di amplificazione, essa sarà ottenuta tramite il rapporto fra gli spettri di ampiezza delle componenti orizzontale e verticale del microtremore misurato.

## 2.1 Origine del rumore sismico ambientale (seismic vibration)

Con il termine “rumore sismico ambientale” si indica un elemento che generalmente è considerato di scarto (“noise/rumore”); esso si riferisce a vibrazioni del terreno e fornisce un’idea del fatto che tale elemento è sempre presente in ogni luogo (“ambientale”). Infatti sulla superficie terrestre sono costantemente presenti vibrazioni di ampiezza molto ridotte (dell’ordine di  $10^{-4} - 10^{-2}$  mm).

In ciò, si intendono tutte quelle sorgenti in grado di sollecitare la superficie terrestre generando delle vibrazioni.

Le sorgenti che producono rumore sono tutte quelle che interagiscono con la crosta terrestre o con il terreno in modo da generare onde elastiche che si propagano in ogni direzione.

Le sorgenti da cui può provenire il rumore sismico ambientale possono essere molteplici, ma queste si possono classificare in due grandi categorie: sorgenti naturali e sorgenti antropiche. “La caratteristica più evidente di tali categorie è il loro contenuto in frequenza; vari studi in letteratura (*Gutenberg, 1958; Asten, 1978; Asten e Henstridge, 1984*) riportano range di frequenza leggermente differenti in cui ricadono alcuni tipi di sorgenti ma fondamentalmente essi sono in accordo sul fatto che, genericamente, le sorgenti naturali agiscono essenzialmente a basse frequenze ( $< 1$  Hz) e quelle antropiche ad alte frequenze ( $> 1$  Hz)” (*S. Marzorati*). Le vibrazioni a basse frequenze ( $< 1$  Hz) sono definite ‘microsismi’, mentre quelle ad alte frequenze ( $> 1$  Hz) sono dette ‘microtremori’.

I fenomeni meteorologici sono la sorgente principale di rumore a basse frequenze, comprese tra 0.05 e 1 Hz; essi, tramite i gradienti di pressione che si generano in concomitanza con eventi ciclonici al di sopra delle masse oceaniche, creano fenomeni ondulatori marini stazionari che interagendo con le coste marine, inducono la propagazione di onde elastiche all'interno delle croste continentali; l'intensità di questi fenomeni varia mediamente con i cicli stagionali. Altre sorgenti di origine naturale sono i corsi d'acqua, i tremori da attività vulcanica, la circolazione di fluidi nel sottosuolo; essi agiscono in range di frequenze che si sovrappongono con quelli generati dall'attività antropica. Il vento è una delle maggiori sorgenti di disturbo naturale, il cui effetto può comparire in range di frequenza diversi a seconda degli oggetti con cui interagisce: ad esempio le irregolarità topografiche o la vegetazione (soprattutto tramite le radici) provocano segnali ad alta frequenza, mentre l'interazione

del vento con grandi oggetti come torri o costruzioni edili con un loro periodo di oscillazione immetteranno nel terreno energia a più bassa frequenza.

## **2.2 Metodo H/V – Rapporto spettrale**

La prova nota con il termine H/V, venne applicata per la prima volta da *Nogoshi e Igarashi* (1970), e fu resa popolare da *Nakamura* (1989). Tale tecnica è una valutazione sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie del terreno misurati tramite appositi sismometri a tre componenti. Per tale ragione, la prova viene comunemente detta HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o prova di “Nakamura”.

Dai risultati di questa prova si ottiene una curva sperimentale, la quale rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alla quali la curva H/V mostra dei picchi massimi, sono legate alle frequenze di risonanza del terreno considerato sotto il punto di misura o dell’edificio in esame. Lo scopo principale della prova HVSR è quello di portare alla luce la presenza di risonanza sismica, ad esempio tra il terreno investigato e la struttura, in modo da consentire una stima delle frequenze alle quali il moto del terreno o della struttura può risultare amplificato a causa di questi fenomeni. In generale, la stima della frequenza di risonanza  $f$  sarà tanto più precisa quanto maggiore risulterà essere il contrasto di impedenza sismica responsabile di tale fenomeno, cioè dove sono maggiori gli effetti potenzialmente pericolosi. Tramite opportune analisi numeriche, oppure in associazione ad altre prove come ad esempio le curve di dispersione delle superficiali, si possono ottenere dalla prova HVSR, i profili di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo.

Agli inizi del 1900 uscirono degli studi finalizzati alla comprensione della natura del rumore sismico, cioè sulla composizione del campo d’onda che lo costituisce. L’autore *Banerji* (1924) lega le variazioni del rumore sismico alla presenza dei monsoni ed associa i microsismi ad onde di Rayleigh generate sul fondo dell’oceano. La supposizione che nel rumore sismico siano presenti onde superficiali porterà allo sviluppo di tecniche in array (*F-K: Capon et al. 1967, Capon 1969, Lacoss et al. 1969; SPAC : Aki 1957, 1965*) basate sulle proprietà dispersive di tali onde.

Inoltre, dopo il terremoto di Guerriero – Michoacàn (Messico) del 1985, venne dato un impulso all'utilizzo dell'HVSR.

Essendo una tecnica relativamente giovane, sono ancora dibattuti gli aspetti teorici e pratici ad essa connessi per quel che riguarda la valutazione degli effetti di sito.

“I primi studi pionieristici che tentarono di investigare gli effetti di sito dei terremoti (*Kanai et al., 1954; Kanai and Tanaka, 1961*) si basavano sull'osservazione degli spettri delle componenti orizzontali dei microtremori; questo approccio assumeva che i moti orizzontali dei microtremori consistono principalmente di onde di taglio incidenti verticalmente per periodi inferiori ad 1 sec, in ciò lo spettro incidente è bianco” (S.Marzorati).

L'utilizzo della Tecnica di Nakamura vista la sua semplicità e i costi ridotti, inizia a prendere piede anche tra la comunità scientifica occidentale fin dai primi anni '90 del XX secolo. L'utilizzo ampio della tecnica, a fronte di una scarsa conoscenza dei processi fisici che lo regolano, incutono un certo scetticismo tra molti ricercatori del genere; questo spinge l'attenzione verso studi che investigano le basi teoriche del metodo (*Field and Jacob, 1993; Nakamura, 1996 e 2000; Bard, 1998; Fäh et al., 2001*). In vari articoli viene proposto un modello HVSR utilizzando le onde di Rayleigh (*Field and Jacob, 1993, 1995; Lachet e Bard, 1994; Bonilla et al., 1997; Bard, 1998; Konno e Ohmachi, 1998; Athanasopoulos et al., 2000; Liu et al., 2000*), seguiti da chi nota discrepanze tra i risultati ottenuti con il metodo HVSR ed altre tecniche (*Castro et al., 1997; Raptakis et al. 1998, 2000*) proprio dovute all'intervento delle onde di superficie. Uno sforzo per cercare di mettere un pò d'ordine è stato fatto con il progetto europeo *SESAME (2005)*, in cui una delle attività principali è stata quella di trovare uno standard per la raccolta ed il processing dei dati: sono stati testati diversi sensori sismici, diversi acquisitori, diverse condizioni ambientali, diverse condizioni di installazione dei sensori. Inoltre sono state adottati diversi metodi di analisi del segnale per valutare l'influenza del *processing* sui risultati. Come uno dei risultati del progetto sono state indicate delle linee guida<sup>1</sup> per applicare correttamente sul campo, seguendo degli standards, la Tecnica di Nakamura.

---

<sup>1</sup> Vedi allegato A LINEE GUIDA PER LE MISURE HVSR PROPOSTE DA SESAME 2005.

## 2.2 Basi fisiche del metodo H/V

Nel campo delle vibrazioni ambientali rientrano sia le onde di volume (P e S) e sia le onde di superficie (Love e Rayleigh). La parte di energia associata alla componente delle onde di volume rispetto a quelle di onde superficiali varia da caso a caso e dipende dall'intervallo di frequenza considerato (*D. Albarello, Castellaro*). Se venisse considerato un intervallo di tempo dell'ordine di qualche decina di minuti, le proprietà medie del campo di onde sismiche verrebbero generate da una molteplicità di sorgenti diverse, distribuite in modo casuale intorno ad un punto di misura. Queste onde avrebbero un andamento che non dipenderebbe dalle singole sorgenti ma solo dalle proprietà del mezzo in cui tali onde si propagano. In media, le componenti orizzontali e verticali del moto del suolo tendono ad essere sollecitate alla sorgente in modo uguale, con un'ampiezza media pari al livello medio del rumore in quell'intervallo di tempo. Assumendo questa ipotesi, i rapporti fra le componenti verticali e quelle orizzontali del moto (H/V), saranno statisticamente indipendenti dalle caratteristiche delle sorgenti e quindi saranno influenzati dalle sole caratteristiche del mezzo attraversato.

Un elemento importante per l'interpretazione delle curve H/V è quello di definire quali sono le fasi sismiche che sono responsabili dei massimi picchi osservati. Sono state avanzate diverse ipotesi in riguardo a ciò, dove ciascuna di questi elementi è potenzialmente presente nel campo delle vibrazioni ambientali; le ipotesi sono:

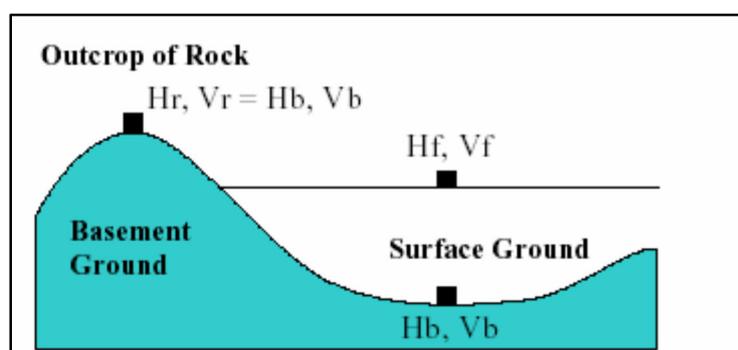
1) **Risonanza onde di volume:** Se le vibrazioni ambientali fossero costituite da onde di volume stazionarie emergenti secondo una direzione perpendicolare alla superficie, il rapporto H/V avrebbe dei picchi massimi in corrispondenza delle frequenze di risonanza delle onde S negli strati di copertura, cioè quando l'ampiezza di suddette onde è relativamente maggiore.

Secondo Nakamura (1989, 2000), il microtremore può contenere sia onde di Rayleigh sia altri tipi di onde. Gli spettri orizzontale (Hf) e verticale (Vf) registrati sulla superficie di un bacino sedimentario (Fig.2.1); essi sono espressi analiticamente come segue:

$$\mathbf{Hf} = \mathbf{Ah} * \mathbf{Hb} + \mathbf{Hs} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{Vf} = \mathbf{Av} * \mathbf{Vb} + \mathbf{Vs} \quad (2.2)$$

dove  $A_h$  e  $A_v$  sono i fattori di amplificazione dei moti orizzontali e verticali delle body waves incidenti verticalmente;  $H_b$  e  $V_b$  sono gli spettri dei moti orizzontali e verticali registrati sul basamento al di sotto del bacino sedimentario;  $H_s$  e  $V_s$  sono gli spettri orizzontali e verticali delle onde di Rayleigh.



*Figura 2.1* Schema della struttura di un bacino sedimentario e dei possibili punti di misura (Nakamura, 2000) modificata da S. Marzorati.

“I fattori di amplificazione orizzontali ( $T_h$ ) e verticali ( $T_v$ ) alla superficie del bacino sedimentario, calcolati rispetto ad un riferimento posto sul bedrock (roccia), sono espressi dai seguenti rapporti”:

$$T_h = H_f / H_b \quad (2.3)$$

$$T_v = V_f / V_b \quad (2.4)$$

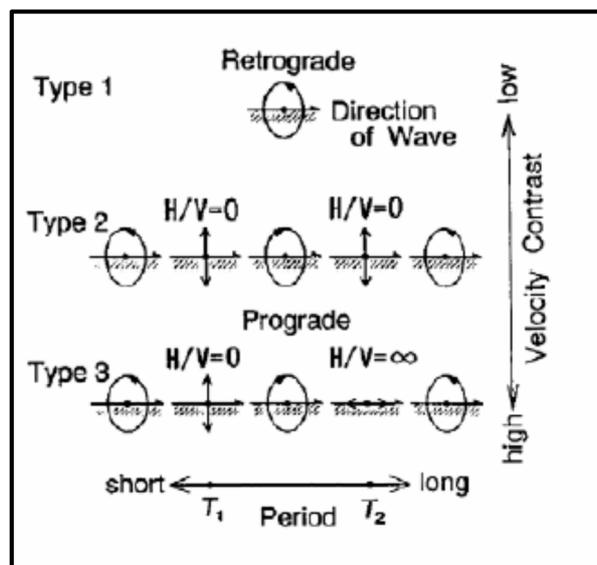
In ultimo, un altro fattore che interviene nell'identificazione del picco di amplificazione è il contrasto di impedenza tra il basamento e gli strati sedimentari del bacino dato dal rapporto dei prodotti tra velocità di fase e densità dei mezzi considerati.

**2) Ellitticità delle onde di Rayleigh:** se invece il campo d'onda è dominato dalle onde superficiali, sarà l'ellitticità delle onde di Rayleigh (cioè il rapporto fra le componenti orizzontali e verticali del moto ellittico associato a questo tipo di onda) e l'ampiezza delle onde di Love le quali agiscono sul piano orizzontale in modo che vanno a condizionare l'andamento della curva H/V. Argomentazioni teoriche, permettono di stabilire che in presenza di basamento rigido con relativa copertura sedimentaria, la componente verticale delle onde di Rayleigh si annulla per frequenze corrispondenti alla frequenza di risonanza delle onde S per la struttura. Le onde superficiali sono molto determinanti nel valutare la natura del rumore ambientale. Di conseguenza, dai microtremori è possibile estrarre le curve di dispersione delle onde superficiali, proprio perché esse sono più coerenti di altre fasi (Picozzi, 2005). Bard (1998) individua una serie di lavori che concordano con

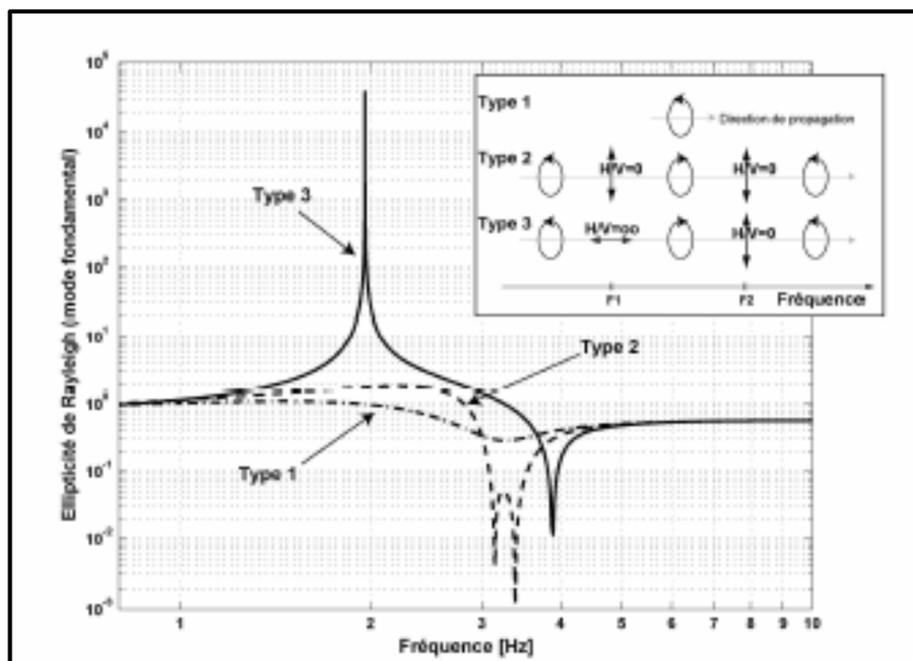
la relazione tra HVSR e ellitticità delle onde di Rayleigh (tra gli altri: Nogoshi and Igarashi, 1971; Lachet and Bard, 1994; Tokimatsu, 1997; Konno and Ohmachi, 1998; Fäh et al., 2001). La relazione è giustificata dalla considerazione che le onde di Rayleigh sono onde energetiche preferenzialmente sulla componente verticale dei microtremori.

Una delle caratteristiche principali delle curve teoriche dell'ellitticità delle onde di Rayleigh è la loro dipendenza dalla frequenza.

“Dalla loro simulazione (Fig. 2.2) si osserva come per un basso contrasto di impedenza, l'orbita del moto è retrograda ad ogni frequenza. Con un contrasto di circa 2.5 (appena alto) il moto diventa successivamente retrogrado, solo verticale, progrado e nuovamente solo verticale” (Tesi PhD S.Marzorati). Con alti contrasti di impedenza si realizza la scomparsa della componente verticale, permettendo il solo moto orizzontale; così l'orbita risultante, partendo dai corti periodi verso i più lunghi, è successivamente retrograda, solo verticale, prograda, solo orizzontale e nuovamente retrograda.



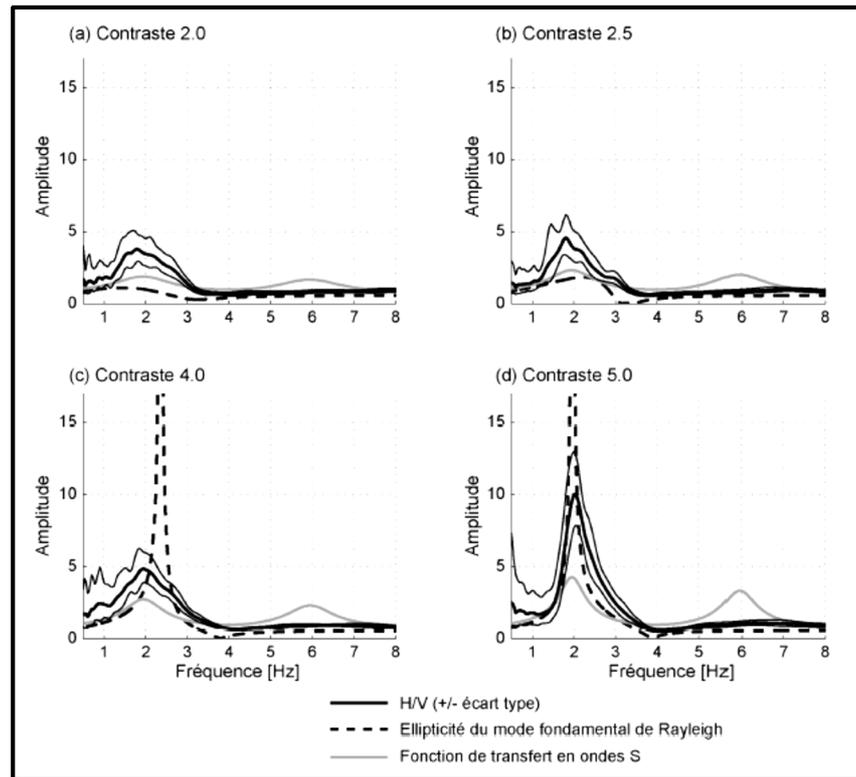
**Figura 2.2** Particle motion di tre tipi di modi fondamentali delle onde di Rayleigh per un modello semplice a due strati (da Konno and Ohmachi, 1998). Immagine tratta da Picozzi (2005). Immagine modificata da S.Marzorati.



*Figura 2.3 Ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh calcolato nel caso di uno strato sedimentario su roccia per differenti contrasti delle onde S : 1) contrasto debole (type 1); 2) forte contrasto (Type 3). Negli esempi, lo spessore dello strato sedimentario è tale da ottenere una frequenza di risonanza pari a 2 Hz. (immagine tratta da Bonnefois-Claudette, 2004). (Immagine modificata da S. Marzorati tesi PhD).*

La curva di ellitticità di Rayleigh viene influenzata anche da un altro fattore che è il coefficiente di Poisson. Sempre nel caso di uno strato sedimentario su substrato rigido, qualunque sia il valore del coefficiente di Poisson, “la curva dell’ellitticità di Rayleigh non presenta picchi per contrasti di impedenza inferiori a 3; per più alti contrasti di impedenza, il coefficiente di Poisson ha l’effetto di avvicinare la frequenza del picco dell’ellitticità di Rayleigh alla frequenza del picco della funzione di trasferimento 1D, ottenuta per onde SH incidenti verticalmente: lo scarto tra le due frequenze è tanto minore all’aumentare del coefficiente di Poisson (Bonnefois-Claudette, 2004)” (S. Marzorati 2005).

Dalla figura seguente si può notare (Fig.2.4), che per alti contrasti di impedenza (ed un alto valore del coefficiente di Poisson), “il picco della funzione di trasferimento e quello dell’ellitticità di Rayleigh praticamente coincidono e quindi l’ampiezza del picco dell’HVSr è maggiore che nel caso a minor contrasto. Per un contrasto debole, il moto di Rayleigh non presenta picchi e l’HVSr corrisponde unicamente al picco della funzione di trasferimento anche se sovrastimato in ampiezza” (S. Marzorati 2005).



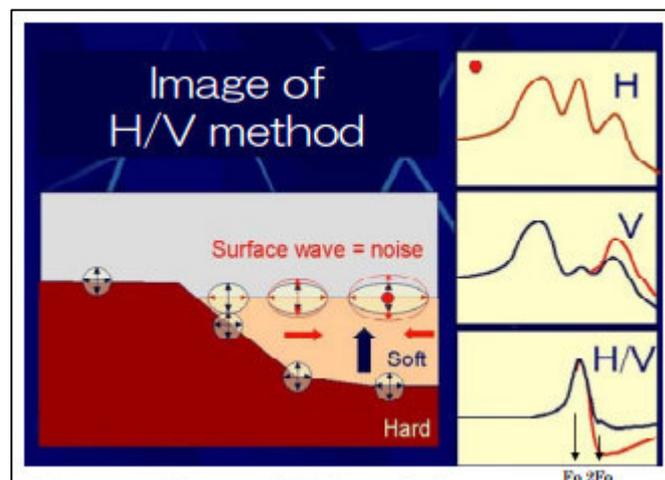
*Figura 2.4 Ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh, funzione di trasferimento (calcolata per le onde SH incidenti verticalmente), e rapporti spettrali osservati per differenti contrasti d'impedenza tra i sedimenti e la roccia (caso di un solo strato sedimentario): a) contrasto debole pari a 2; b) contrasto debole pari a 2.5; c) contrasto moderato pari a 4; d) forte contrasto pari a 5. Bonnefoy-Claudet (2004). Immagine tratta da tesi PhD S. Marzorati.*

- 3) Fasi di Airy delle onde di Love:** anche la fase di Airy delle onde di Love presenta un massimo in corrispondenza delle frequenze di risonanza delle onde S. Questa generale concordanza ha origine nel fatto che le onde di Love e Rayleigh (nella componente orizzontale) sono figlie dell'interferenza di onde di volume (segnatamente le componenti SH) con la superficie del terreno: risulta quindi ragionevole che tutte risentano in qualche modo dei fenomeni di risonanza relativi alle onde S. Questo implica che, indipendentemente dalla natura del campo d'onde, la funzione H/V sarà sempre caratterizzata da valori massimi in corrispondenza della frequenza di risonanza delle onde S. In assenza di contrasti di impedenza alla base della copertura, il rapporto H/V sarà all'incirca unitario, sia nel caso di rumore ambientale dominato da onde di volume, che da onde di superficie. Studi teorici e osservazioni sperimentali mostrano che esiste una relazione non lineare tra l'ampiezza dei massimi della curva H/V e l'entità del contrasto di impedenza

sismica alla base della copertura. Altri fattori che influenzano l'ampiezza dei massimi H/V sono il contributo delle diverse fasi sismiche, lo smorzamento, il rapporto di Poisson nelle coperture e la distribuzione delle sorgenti attorno al ricevitore (*Lunedei e Albarello, 2010*). Non è possibile prevedere a priori per un dato sito l'entità del contributo relativo delle onde di volume e delle onde di superficie (nei diversi modi di propagazione) al campo d'onda delle vibrazioni ambientali. I rapporti H/V relativi delle diverse fasi cambiano in funzione delle frequenze, della situazione stratigrafica e della distribuzione delle sorgenti all'intorno della stazione di misura. Tuttavia questa eterogeneità non influenza la stima della frequenza di risonanza fondamentale ma solo l'ampiezza della curva H/V in corrispondenza di  $f$ , ampiezza che va quindi interpretata con cautela.

### 2.3 Rappresentazione del rumore sismico ambientale.

L'analisi degli spettri di Fourier è un primo e fondamentale passaggio per individuare le caratteristiche ed il contenuto del segnale rumore/noise. “Siccome il rumore ambientale è prodotto da una serie di sorgenti spazialmente distribuite, spesso agenti in modo continuo, non correlate tra loro, esso viene assimilato ad un processo stocastico stazionario” (*Bormann, 2002*) (Fig. 2.5).



*Figura 2.5 Rappresentazione metodo H/V*

Un processo random è un **processo stocastico** (o **processo aleatorio**) è la versione probabilistica del concetto di sistema dinamico. Un processo aleatorio è un insieme ordinato di funzioni reali di un certo parametro (in genere il tempo) che gode di determinate proprietà statistiche. In generale è possibile identificare un processo stocastico come una famiglia ad un parametro di variabili casuali reali rappresentanti

le trasformazioni dello stato iniziale nello stato al tempo; il valore limite della frequenza relativa è chiamato probabilità dell'evento random, gli autori (*Scales e Snieder, 1998*). *Nogoshi e Igarashi (1971)* mostrano come la frequenza di occorrenza delle ampiezze dei microtremori tendono ad una distribuzione normale tanto più è maggiore il numero di campioni analizzato. *Sakaji (1998)*, oltre alle analisi dei precedenti autori, calcola la funzione di autocorrelazione applicandola ai microtremori per esaminarne la stabilità temporale. “Non esiste una chiara conclusione a riguardo della stazionarietà del rumore sismico; infatti, come osservato ad esempio in *Okada (2003)*, il noise sismico ha una variabilità temporale e spaziale”.

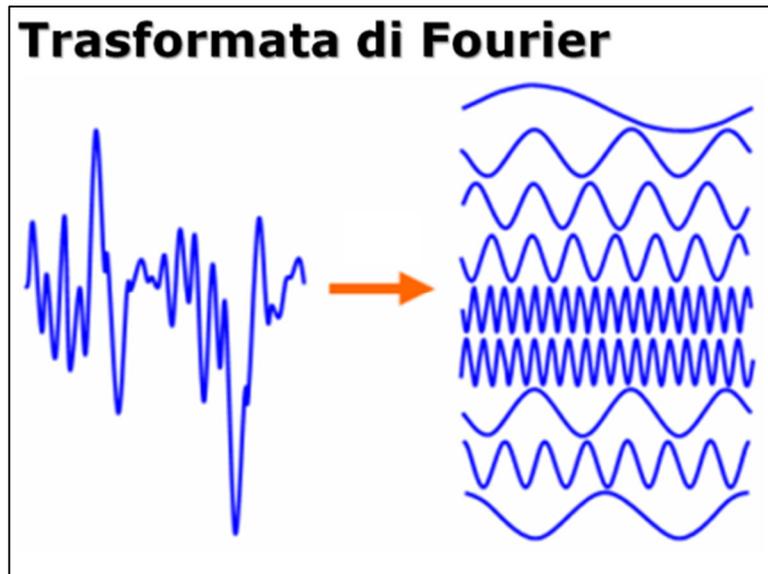
La variabilità temporale è dovuta al tipo di sorgenti che generano il rumore; così ad esempio per frequenze minori di 1 Hz, si ha una variabilità legata al susseguirsi dei fenomeni meteorologici, mentre a frequenze maggiori di 1 Hz l'attività umana induce variazioni molto più frequenti del rumore sismico. La variabilità spaziale del rumore sismico è osservata a seconda che i siti di registrazione siano più o meno “rumorosi” (*Bormann, 2002*). Una rappresentazione comune del contenuto di un segnale registrato in un punto di misura è la distribuzione delle ordinate spettrali in funzione delle frequenze. Il segnale che si propaga da una sorgente sismica, come un'esplosione o un movimento di faglia, ha la caratteristica di avere una durata finita e può essere rappresentato secondo il teorema di Fourier da funzione arbitraria transiente  $f(t)$  nel dominio del tempo o dall'equivalente  $F(\omega)$  nel dominio della frequenza (*Bormann, 2002*):

$$f(t) = (1 / 2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (2.5)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt = |F(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) \quad (2.6)$$

L'equazione (2.7) rappresenta la trasformata di Fourier di  $f(t)$ .  $|F(\omega)| = A(\omega)$  è la densità di ampiezza spettrale che nel caso della rappresentazione dello spostamento ha dimensione m/Hz;  $\omega = 2\pi f$  è la frequenza angolare e  $f$  è la frequenza in Hz;  $\varphi(\omega)$  è lo spettro di fase, il quale può essere espresso in gradi, rad o  $2\pi$ rad. Per il teorema di Fourier una serie temporale finita può essere descritta come la somma di funzioni periodiche monocromatiche (Fig.2.6) nella forma:

$$f(t) = (1 / 2\pi) \sum |F(\omega)| \exp(i[\omega t + \varphi(\omega)]) \Delta\omega \quad (2.7)$$



**Figura 2.6** Rappresentazione grafica delle componenti di una Trasformata di Fourier (immagine tratta da <http://mariovalle.name/teaching/amite.html>).

Il rumore sismico non ha una durata finita nel tempo e le sue caratteristiche, determinate da sorgenti spesso continue, distribuite casualmente nello spazio e indipendenti tra loro, sono quelle di un processo stocastico stazionario. A causa della natura stocastica del noise, l'eq.(2.7) non converge; di conseguenza la densità di ampiezza spettrale  $A(\omega)$  e lo spettro di fase  $\phi(\omega)$  non possono essere calcolati.

Per poter rappresentare le ordinate spettrali del rumore sismico, viene calcolata la *power density function (PSD)* ossia la densità di potenza spettrale  $P(\omega)$ . Essa è la trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione  $p(\tau) = \langle f(t) f(t + \tau) \rangle$  (il simbolo  $\langle \rangle$  indica il valor medio):

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad (2.8)$$

Se  $f(t)$  è espresso in spostamento, velocità o accelerazione,  $P(\omega)$  sarà espresso rispettivamente in  $(m)^2/Hz$ ,  $(m/s)^2/Hz$  o  $(m/s^2)^2/Hz$ . Approssimando il movimento del terreno  $x(t)$  del rumore sismico tramite un'onda sinusoidale  $x(t) = a_d \sin(\omega t)$ , dove  $a_d$  è l'ampiezza dello spostamento, è possibile convertirlo in velocità derivando secondo  $dx/dt$ , o in accelerazione secondo  $dx^2/dt^2$ ; le rispettive ampiezze risultano  $a_v = a_d\omega$  e  $a_a = a_d\omega^2$ . Quindi conoscendo la PSD  $P_d(\omega)$  relativa allo spostamento, si ottengono le  $P(\omega)$  per le velocità e le accelerazioni:

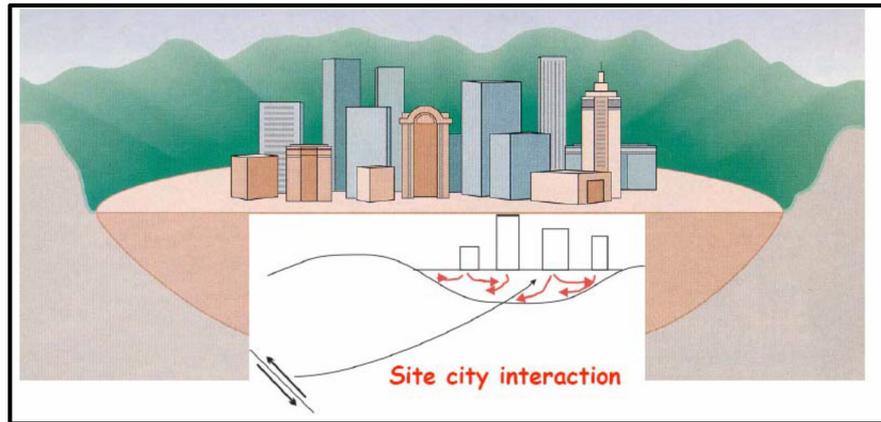
$$P_v(\omega) = P_d \omega^2 = 4\pi^2 f^2 P_d \quad (2.9)$$

$$P_a(\omega) = P_d \omega^4 = 16\pi^4 f^4 P_d = 4\pi^2 f^2 P_v \quad (2.10)$$

Come per il campo dell'acustica, il segnale sismico relativo alla potenza del rumore  $(a_2/a_1)^2$  viene espresso in dB (deciBel).

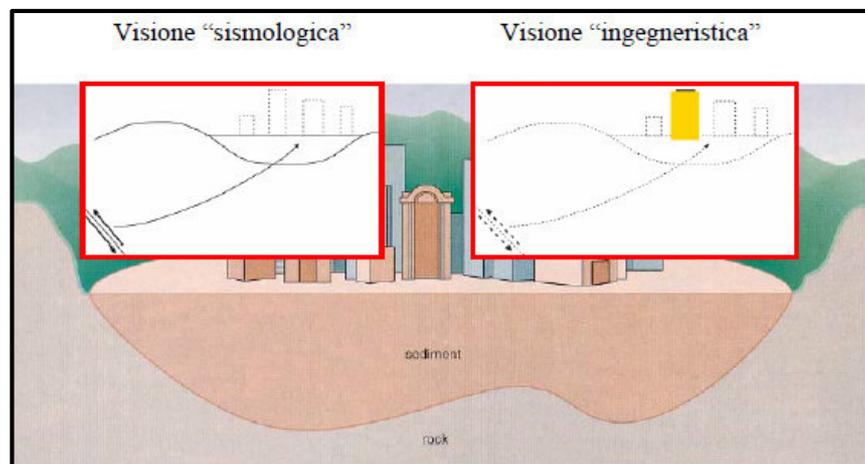
#### **2.4 Fenomeno della risonanza sismica**

Quando si verifica un terremoto, se la frequenza di risonanza del sottosuolo coincide con quella degli edifici presenti, può avere luogo un fenomeno di accoppiamento fra le due modalità di vibrazione e dare luogo a fenomeni di risonanza sismica. Questo effetto di amplificazione sismica produrrà un grande aumento della sollecitazione sugli edifici. L'amplificazione sismica è la prima causa dei danni indotti dal terremoto, anche più importante della dimensione del terremoto stesso. L'obiettivo è quello di **“prevedere”** il comportamento dinamico di una struttura come effetto dello scuotimento indotto da un evento sismico (*Mucciarelli 2005*). Il meccanismo atteso è quello del trasferimento di energia dal suolo al manufatto attraverso le fondazioni. Il problema viene solitamente affrontato secondo uno sviluppo lineare che va dalla definizione del moto sismico al suolo (parte sismologica) alla stima della risposta del manufatto sottoposto alla sollecitazione (parte ingegneristica). In sintesi, quello che può danneggiare l'edificio è la sua deformazione ovvero il movimento relativo fra le sue parti (p.es. fondamenta-solaio). Questo moto (risposta) è diverso dal moto del suolo e dipende dal periodo della sollecitazione in rapporto alle caratteristiche della struttura considerata (periodo proprio o frequenza propria della struttura). Quando queste coincidono, l'effetto dello scuotimento è massimo. Il modello elementare di una struttura attraversata dalle onde sismiche, è quello di un oscillatore semplice più o meno complesso sollecitato alla sua base da uno scuotimento di andamento noto. In realtà, il problema dinamico è più complesso. Innanzitutto esiste un problema di interazione suolo-struttura: in qualche misura (dipendente dalle caratteristiche del terreno e delle fondazioni) il terreno partecipa al moto della struttura. Inoltre, il manufatto, una volta messo in movimento trasmette al terreno dell'energia ed questo meccanismo condiziona i fenomeni di dissipazione. Infine i manufatti (Fig.2.7) possono interagire dinamicamente fra loro condizionando l'effetto complessivo del terremoto.



**Figura 2.7** Interazione manufatti ed il suolo di fondazione attraversato dalle onde sismiche. (Fonte Corso di Microzonazione di 1° Livello ordine dei Geologi della Calabria)

Quindi una stima realistica della vulnerabilità deve considerare nel suo complesso un “sistema” costituito da elementi che interagiscono dinamicamente nel corso dell’evento sismico. Questo implica il superamento di un “dualismo” disciplinare che produce due visioni del fenomeno sismico complementari e indipendenti: quella “sismologica” e quella “ingegneristica” (Fig.2.8).



**Figura 1.8** Visione sismologica e ingegneristica del sistema Suolo-Struttura (Fonte Corso di Microzonazione di 1° Livello ordine dei Geologi della Calabria)

In casi semplici (coperture soffici al di sopra di un basamento sismico rigido), è possibile stabilire una relazione fra lo spessore  $h$  dello strato soffice, la velocità media delle onde S all’interno di quest’ultimo ( $V_s$ ) e la frequenza di risonanza fondamentale  $f$  dello strato, nella forma:

$$f = \frac{V_s}{4h} \quad (2.11)$$

“Dall’equazione 2.11 appare come la tecnica H/V possa fornire anche dettagli di carattere stratigrafico: a partire da una misura di vibrazioni ambientali che vincola il valore di  $f$ , nota la  $V_s$  delle coperture, si può infatti stimare la profondità dei riflettori sismici principali o viceversa. La prima applicazione in questo senso risale al 1999 ad opera di *Ibs-von Seht e Wohlenberg*, che ricostruirono la profondità del basamento sismico lungo il bacino del Reno in Germania a partire da misure di risonanza del sottosuolo” (*Albarello, Castellaro*).

Come conseguenza di queste considerazioni si ha che la dinamica di una struttura va studiata nel suo specifico contesto geomorfologico e stratigrafico. In particolare, la stima della **vulnerabilità sismica** va affrontata con un approccio integrato che tenga conto del complesso delle interazioni dinamiche presenti nello specifico contesto. La risposta a questo genere di esigenza, va cercata nella messa a punto di tecniche di indagine a basso costo, capaci di fornire risultati adeguati anche se non esaustivi, utili almeno ad individuare le situazioni più critiche sulle quali indirizzare gli interventi più urgenti. Lo strumento base per questo genere di analisi è stata la misura a stazione singola della risposta dinamica dei terreni e delle strutture utilizzando il rumore sismico ambientale. Da molti anni il rumore sismico ambientale viene utilizzato per l’analisi della risposta dinamica dei terreni e degli edifici:

Questi elementi sono due:

1. Si tratta di misure asincrone a stazione singola
2. Vengono misurate congiuntamente le proprietà del suolo di fondazione e della struttura separando gli effetti delle une e delle altre.

Come il sottosuolo, eccitato dalle onde che lo attraversano, presenta più modi di vibrare anche le strutture e gli edifici in c.a. presentano a loro volta delle frequenze di risonanza proprie dell’edificio.

E’ opportuno evitare i fenomeni di doppia risonanza cioè quei casi in cui la frequenza propria del terreno ha picchi con frequenze di risonanza simili a quelle dell’edificio. Se le risonanze suolo-struttura coincidono la situazione è sfavorevole dal punto di vista della vulnerabilità sismica, così come se la risonanza della struttura è a frequenze di poco superiore a quelle del sottosuolo la situazione è ugualmente sfavorevole perché:

- a) gli edifici con il proprio danneggiamento diminuiscono la loro frequenza di risonanza;
- b) il sottosuolo può manifestare modi di vibrare di ampiezza maggiore e a frequenza maggiore rispetto a quella visibile con i microtremori.

Quindi è opportuno che la frequenza di risonanza della struttura risulti sempre lontana dal picco di risonanza del terreno, soprattutto se questo è molto pronunciato. Il metodo geofisico-strumentale mira ad identificare la presenza di comportamenti di un edificio ritenuti critici in termini di risposta sismica, attraverso l'interpretazione di misure strumentali di tremore ambientale effettuate all'interno e all'esterno dell'edificio stesso. Nello specifico consiste nell'effettuare delle misure di tremore (ad es. tramite uno o più sismometri tridirezionali, con relativo sistema di acquisizione) all'interno dell'edificio e nel sito ove esso è ubicato. L'analisi spettrale dei segnali consente di osservare i dati registrati nel dominio delle frequenze. Per interpretare il comportamento del sito, viene applicata la tecnica HVSR (rapporto tra le componenti spettrali orizzontali e verticale).

Le misure di rumore sismico ambientale sono utilizzate, in particolare, per conoscere, strumentalmente, alcuni indicatori di vulnerabilità del sistema sito-edificio.

Nello specifico, le misure di tremore sul sito consentono di:

- Definire la presenza di un significativo contrasto di impedenza che può causare l'incremento dell'azione sismica in superficie (tecnica HVSR);
- Valutare la frequenza naturale del sito (tecnica HVSR);
- Identificare la presenza di variabilità laterale della geometria del bedrock (rotazione del componenti spettrali).

Le misure di tremore effettuate all'interno di un edificio consentono invece di:

- Risalire alle frequenze naturali dell'edificio.
- Stimare e individuare la propensione a subire effetti torsionali.

Conoscendo le frequenze naturali del sito e dell'edificio è possibile valutare la propensione alla doppia risonanza tra sito e struttura.

La frequenza naturale di un edificio è considerata il parametro fondamentale per valutare l'azione sismica a partire dallo spettro di progetto; generalmente viene stimata attraverso formule empiriche anche se diversi studi hanno dimostrato che i valori ottenuti non sempre sono in buon accordo con quelli rilevati mediante osservazioni dirette (si veda ad esempio *Gallipoli et al. 2009*). La frequenza naturale può essere direttamente stimata individuando i picchi presenti nei rapporti tra gli spettri dell'edificio e del sito. La valutazione della presenza dell'effetto della “doppia risonanza” tra sito ed edificio è altrettanto importante, nonostante non sia espressamente contemplata nelle norme tecniche, perchè può causare un incremento dell'azione sismica sulla struttura.

Tale possibile sincronizzazione si valuta semplicemente comparando la frequenza naturale del sito con quella dell'edificio. Le misure geofisiche di tremore sull'edificio consentono anche di individuare la propensione a subire effetti torsionali; la loro eventuale presenza può incrementare le sollecitazioni su alcuni elementi strutturali, aumentando, conseguentemente, la vulnerabilità dell'edificio.

## Capitolo 3

“Le misure di microtremore a stazione singola si effettuano per mezzo di sismometri tricomponenti sufficientemente sensibili nell’intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (0.1-20 Hz, corrispondenti alle frequenze dei modi di vibrare della maggior parte delle strutture). Per definirsi sufficientemente sensibile, lo strumento deve esser in grado di rilevare segnale anche nei punti più silenziosi della superficie terrestre. Di fatto non esistono modelli statisticamente affidabili che descrivono il minimo del rumore di fondo su roccia in tutta questa banda di frequenze poiché si tratta un intervallo di modesto interesse sismologico, che tradizionalmente si concentra su frequenze inferiori”.

In generale si può affermare che tale minimo nei termini di intensità di potenza spettrale varia in modo non lineare da  $4^{10-21}$  (m/s)<sup>2</sup>/Hz (a 10 Hz) a  $10^{-16}$ (m/s)<sup>2</sup>/Hz (a 0.1 Hz) *McNamara e Buland (2004), Berger et al. (2004) Castellaro e Mulargia (2011)*.

### 3.1 Strumentazione per analisi del rumore sismico ambientale

Per la misura della funzione H/V viene richiesto l'acquisizione del rumore sismico ambientale su tempi dell'ordine di diverse decine di minuti, in genere per una buona acquisizione i tempi di registrazione vanno dai 20 ai 30 minuti di registrazione in continuo. Questa durata ha lo scopo di garantire la misura del campo di rumore generato da una molteplicità di sorgenti dalle diverse direzioni dello spazio. Dal punto di vista della sperimentazione, la metodologia H/V richiede l'esecuzione di misure di rumore mediante un sistema di acquisizione tri-direzionale, caratterizzato da una terna di velocimetri (Fig.3.1) o geofoni<sup>1</sup>, disposti secondo l'asse X Y e Z di un piano orizzontale, tutto caratterizzato da sufficiente sensibilità (Fig.3.2). La sensibilità dell'apparecchio di misura deve avere delle frequenze comprese tra 0.5-10 Hz e sia un'adeguata frequenza alla bassa ampiezza del segnale. Sensori di tipo velocimetrico sono da preferirsi a sensori di tipo accelerometrico data la scarsa sensibilità di questi ultimi. Siccome la metodologia è basata sui soli rapporti di ampiezza spettrale, l'impiego di sensori con uguali caratteristiche e con una ragionevole linearità nella funzione di risposta per le tre componenti non è necessaria la correzione strumentale del segnale in fase di elaborazione. E' necessario utilizzare un apparato di registrazione dotato di grande dinamica (dell'ordine dei 24 bit equivalenti) con basso rumore elettronico. Per la registrazione del segnale non è richiesta una grande capacità di memoria: infatti frequenze di campionamento comprese fra i 128 e i 512 Hz sono sufficienti a garantire un campionamento adeguato del campo di rumore per frequenze inferiori ai 10 Hz. "La sincronizzazione delle misure (per esempio mediante segnale GPS) non è strettamente necessaria (*Gruppo di lavoro MS, 2008*)".

---

<sup>1</sup> Il geofono è un trasduttore che trasforma il movimento del terreno sollecitato dal terremoto o da azioni artificiali in variazioni di corrente convertite dall'ADconverter del sismografo in dati numerici digitali.



Figura 3.1 Sensori velocimetri<sup>2</sup> utilizzati all'interno della strumentazione. Foto concessa dalla ditta Senseshe.

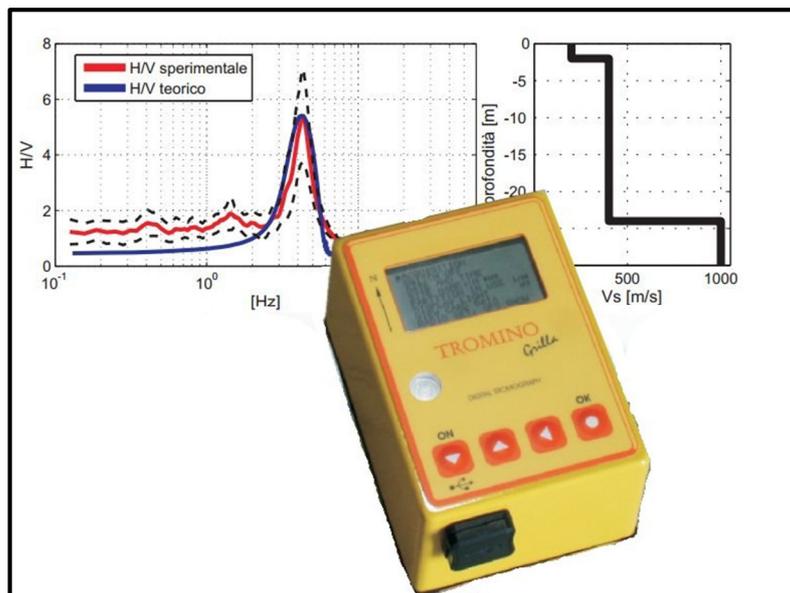


Figura 3.2 Strumento per misure di rumore sismico ambientale, noto come "Tromino" o tromografo. Fonte Web.

La possibilità di interpretare i massimi della funzione H/V dipende dalla validità delle assunzioni di base, ovvero che il rumore sia generato da una molteplicità di sorgenti distribuite casualmente attorno al punto di misura; inoltre, dove possibile, vanno rispettate 2 regole fondamentali per l'acquisizione:

- 1) La serie dei valori del rapporto spettrale abbia carattere stazionario nel tempo;

<sup>2</sup> Per le caratteristiche tecniche di tali sensori si rimanda al paragrafo 2.4

- 2) Gli eventuali massimi H/V siano quelli dedotti dal rumore sismico e non da interferenze spurie (rumore elettromagnetico di origine antropica, movimenti dello strumento di misura).

Nel corso della misura non è possibile sapere se le condizioni necessarie al funzionamento della procedura a fini geognostici (campo d'onda diffuso) siano o meno verificate. Oltre alla stima della curva H/V, risulta quindi utile valutare l'eventuale presenza di fenomeni direzionali (eterogeneità nel campo di rumore) e la stabilità nel tempo della funzione H/V durante la misura (stazionarietà). In presenza di un campo di rumore diffuso il valore della funzione H/V non deve cambiare nel tempo o al variare della direzione di polarizzazione. Al contrario, la presenza di sorgenti dominanti o il cattivo posizionamento dello strumento (basculamento) si manifesta come una variazione direzionale e/o temporale dei rapporti H/V. Sperimentalmente, l'analisi di qualità della misura può essere effettuata confrontando le ampiezze spettrali medie del rumore misurato lungo le due componenti orizzontali, oppure calcolare diversi valori della funzione H/V di volta in volta proiettando lungo direzioni differenti le ampiezze spettrali ottenute sul piano orizzontale. “La stazionarietà nel tempo, invece può essere valutata rappresentando in funzione del tempo le funzioni H/V ottenute nelle diverse finestre temporali considerate (*Gallipoli et al. 2008*)”. La presenza di marcate eterogeneità azimutali e/o di variazioni temporali nelle caratteristiche del campo misurato possono indicare la presenza di fenomeni capaci di invalidare le ipotesi di base della procedura. In questi casi la misura deve essere ripetuta fino a ottenere condizioni sperimentali ritenute soddisfacenti. Un importante effetto di disturbo è quello associato alla presenza di intense sorgenti di rumore elettromagnetico (apparati radar, motori elettrici, impianti industriali, ecc.). La presenza di queste sorgenti viene messa in evidenza da massimi spettrali molto ben definiti su tutte e tre le componenti del segnale. In situazioni di questo tipo, la banda di frequenza interessata dal rumore elettromagnetico non va considerata nella fase di interpretazione del segnale. Infine, un buon indicatore della qualità del picco H/V può essere ottenuto dall'esame degli spettri singoli. “Infatti, massimi fisicamente significativi sono generalmente associati a valori di ampiezza spettrale minima sulla componente verticale (*Gruppo di lavoro MS, 2008*)”. Alcuni criteri in proposito sono stati determinati nell'ambito del *progetto europeo SESAME* di cui si riporta un estratto in Allegato A. I vantaggi sono costituiti dalla possibilità di eseguire ed elaborare una grande quantità di misure in modo semplice e veloce mantenendo una buona qualità

nei risultati. Dato che il rumore sismico è presente in ogni parte della superficie della terra ed è costituito da fasi sismiche che spesso hanno attraversato porzioni significative del sottosuolo, le misure sismiche passive con tromografi, sono caratterizzate da un'applicabilità virtualmente illimitata e risultano più efficaci proprio laddove le tecniche attive (sia di superficie sia in foro) sono fortemente penalizzate proprio dalla presenza di un forte rumore ambientale (es. in aree urbane caratterizzate da un intenso traffico veicolare). Inoltre, dato che non richiedono forme di energizzazione artificiali, le tecniche passive sono caratterizzate da un ingombro relativamente ridotto e da bassi costi di esplorazione per unità di volume di sottosuolo indagato. La tecnica HVSR costituisce un prezioso aiuto nella preparazione di una carta di microzonazione: in particolare, si utilizza la carta geologica per guidare il tracciamento dei limiti tra le aree con diversa classificazione dei suoli, a partire dai dati puntuali da terremoti o da profili di VS e aiutandosi con la mappa dei valori di iso-frequenze ottenuti dai dati HVSR si confermano o meno i domini spaziali da assegnare alle varie classi di suolo. Oltre al segnale, per poter condurre un esperimento in condizioni controllate, è fondamentale capire quanto la strumentazione impiegata è in grado di restituire un dato, il quale rispecchi il più fedelmente possibile l'oggetto che si vuole rappresentare. Il segnale del noise sismico ambientale investe un'ampia banda di frequenze, la quale non è ricoperta completamente da un singolo sensore sismico; inoltre le ampiezze coinvolte possono essere così ridotte da non essere riprodotte dal sistema di registrazione, sia per i limiti di fabbricazione (dinamica, risoluzione, campionamento, ecc.) sia per il rumore strumentale che ogni strumento possiede. Quindi, studiando il noise sismico ambientale, è necessario utilizzare uno strumento che rappresenti le frequenze volute e conoscere se esso è in grado di restituire un segnale non degradato. Questa ricerca fornisce alcuni esempi sperimentali in cui sono impiegati strumenti differenti, sia per quel che riguarda il sensore sismico, sia per l'apparato di acquisizione e registrazione del segnale.

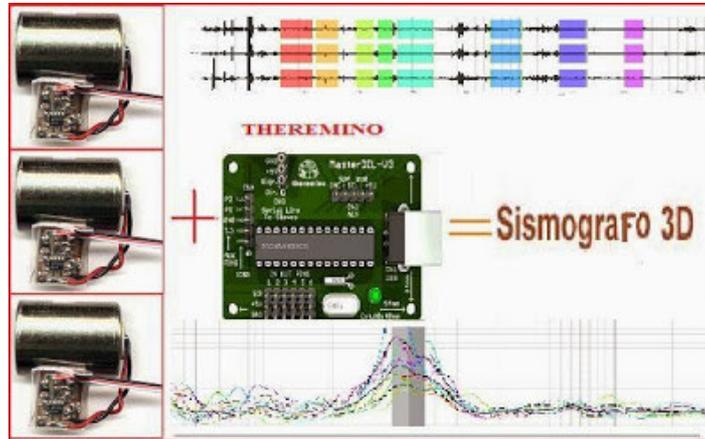
### 3.2 Strumentazione Sperimentale

In questo paragrafo, si riportano le principali caratteristiche dello strumento sperimentale. Le misure raccolte nell'ambito di questo lavoro di tesi sono state effettuate mediante un sismometro digitale di tipo Tromografo Sperimentale (Fig.3.11 a,b), uno strumento appositamente progettato per le misure di microtremore nell'intervallo di frequenze compreso fra 0,1 e 500 Hz, realizzato nel laboratorio SmartLab del dipartimento Dimes dell'Università della Calabria. Tale strumento risulta essere portatile, leggero (2 kg) e di ridotte dimensioni (18 x 14 x 8 cm) con basso consumo di energia. Lo strumento impiega masse molto ridotte ed una struttura rigida non risonante costruita con materiali non diffrangenti. I sensori sono costituiti da una terna di velocimetri smorzati criticamente che trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale, tramite scheda "Datalogger Theremino". Le applicazioni qui presentate, si rivolgono prevalentemente al caso degli edifici e ponti per uso viario. Tra i vari temi di Ingegneria Civile si focalizza l'attenzione sull'approfondimento della conoscenza mediante misure sperimentali sia per gli edifici e sia per i ponti. Per l'identificazione dinamica di una struttura il confronto tra il modello matematico dell'edificio e una misura del modo di vibrare fondamentale consente di tarare lo strumento, quindi di focalizzare l'attenzione sulla probabile presenza di un difetto strutturale. Questo è nello spirito del metodo di Nakamura (elaborazione dei segnali acquisiti con lo strumento di cui si tratta) applicato agli edifici.

In dettaglio, com'è costruito tale strumento:

**Hardware:** Il Datalogger Theremino (hardware libero) è un sistema di acquisizione dati (ADConverter) economico ma nello stesso tempo con grandi prestazioni e semplicità d'uso (Fig.3.3). Sono molte le possibili applicazioni nel campo della geologia - geofisica, geotecnica, idrogeologia, sismologia e monitoraggio ambientale. Il sistema, può utilizzare i seguenti trasduttori: geofoni, accelerometri, inclinometri, magnetometri, fessurimetri, fotoresistenze, estensimetri, sensori per stazione meteo e quasi tutti i sensori in commercio. **Theremino** è un sistema Open Source, completamente "free" e "open", progettato per interfacciare Windows, Linux, OSX e Android con il mondo esterno. I moduli del sistema possono comunicare tra loro, anche via Web. Si tratta di un dispositivo di Input/Output, direttamente collegabile via

USB a vari tipi di PC, senza necessità di appositi driver, utilissimo per sperimentazioni con sensori di vario genere e molto semplice nelle modalità di funzionamento. La gestione del dispositivo avviene tramite il software open source HAL (*Hardware Abstraction Layer*) di immediata comprensione, facile da gestire e ben documentato.



*Figura 3.3 Schema funzionamento scheda Theremino Datalogger per applicazioni HVSR. Foto concessa da A.Dolmetta.*

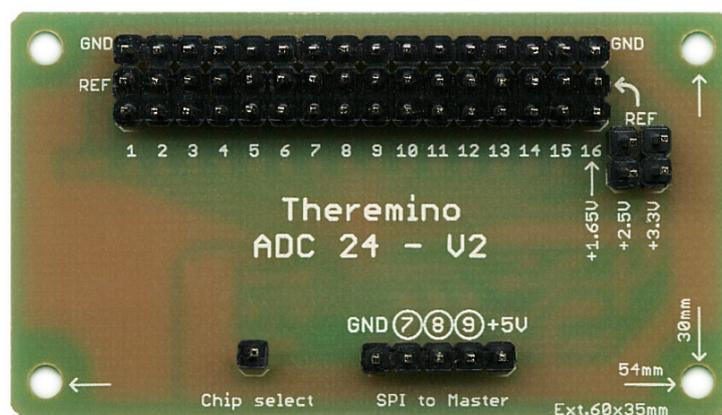
Il modulo “Master” (Fig.3.4) si collega a una porta USB (usb1, usb2 o usb3), fornisce alcuni Pin Generici di InOut (6, 10 o 12 a seconda delle versioni) e una linea di trasmissione seriale, verso i moduli Slave.



*Figura 3.4 Modulo Master Dil - V4, utile per numerose applicazioni nel campo della geologia, geotecnica geofisica e misure ambientali.*

Il connettore “USB” può essere collegato a una o due prese USB, per prelevare una corrente di 500mA o di 1A. Il connettore “Serial Line to slaves” normalmente viene collegato alla linea seriale che va ai moduli slaves con 3 fili (GND/+5V/Dati). Il quarto polo (Dir) era pensato per collegare il dispositivo “Master\_ISO”, di isolamento ottico. Ora è usato come Pin 10 e l’isolamento, se necessario, si effettua con isolatori USB commerciali. Nelle ultime versioni sono presenti anche i Pin 11 e 12.

Per prove HVSR, viene connesso al modulo Master Dil, un convertitore AD7124-8 (Fig. 3.5). Si tratta di un convertitore “Sigma Delta” ad altissime prestazioni, progettato nel 2015, al culmine di decenni di esperienza di Analog Devices in questo campo. Oltre al basso rumore e alla grande flessibilità questo Adc consuma pochissimo, circa 900 micro Ampere. La velocità di campionamento è selezionabile in un campo molto vasto (da 10 fino a 19200 campioni al secondo) e sono disponibili 8 livelli di filtraggio, per scegliere il migliore compromesso tra velocità di risposta e riduzione del rumore. Le varie configurazioni di ingresso (Differenziale, Pseudo o Single Ended), permettono di collegare sensori di ogni tipo.



*Figura 3.5 Il Theremino Adc24 è utilizzato per la registrazione di segnali a bassa e media frequenza per applicazioni HVSR. La sua flessibilità e il suo rapporto segnale/rumore sono superiori a ogni altro strumento simile. Per cui è lo strumento ideale per la registrazione di microtremori e terremoti, ma anche di segnali provenienti da altri trasduttori come: potenziometri lineari per la rilevazione di spostamenti e fratture, celle di carico, bilance analitiche, misuratori di pressione, sensori di flessione, fotodiodi per illuminazioni debolissime, magnetometri, microbarometri.*

Di seguito le caratteristiche del Theremino Adc24 per utilizzo di microtremori e in Sismologia:

Alimentazione: 5 Vdc

Consumo di energia: < 5 millesimi di Watt (900 uA a 5 Volt)

Numero di canali: Da 1 a 16 canali a 24 bit ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) (8 differenziali, 15 pseudo o 16 single ended)

Range dinamico: 127 dB @ 100 SPS (con tre canali contemporanei e guadagno 1)

Campionamento: Configurabile da 1 a 16 canali “Differenziali”, “Pseudo” o “Single Ended”

Sampling rate: Da 10 a 19200 campionamenti al secondo  
Fondo scala: +/- 3.3 Vpp (Differenziale) oppure da 0 a 3.3 Volt (Pseudo e Single)  
Adc step (x 1): 0.4 uV (Differenziale) - 0.2 uV (Pseudo e Single)  
Adc step (x 128): 3.2 nV (Differenziale) - 1.6 nV (Pseudo e Single)  
Impedenza di input: Praticamente infinita (> 100 mega ohm)  
Corrente di input: Inferiore a +/- 4 nA  
Corrente di input: Variazione con la temperatura +/-25 pA/°C  
Tensione Massima: Da -0.3 Volt a +3.6 Volt (tensione massima applicabile agli ingressi)  
Corrente Massima: +/-10 mA (corrente massima applicabile agli ingressi)  
ESD Rating HBM: Human Body Model = 4 kV  
ESD Rating FICDM: Field-Induced Charged Device Model = 1250 V  
ESD Rating MM: Machine Model = 400 V  
Uscita 3.3 Volt: Fino a 300 mA, accuratezza (1%), stabilità (48 ppm/°C).  
Uscita 2.5 Volt: Fino a 10 mA, accuratezza (0.2%), stabilità (2 ppm/°C tipica).  
Uscita 1.6 Volt: Solo per polarizzare i sensori (accuratezza e stabilità pari al 3.3 Volt)  
Interfaccia dati: SPI a tre fili, QSPI™, MICROWIRE™ e DSP  
Formato dati: Protocollo di Analog Devices  
Velocità linea seriale: Da 30 baud a 5 mega baud  
Precisione di tempo: Circa 500 uS o inferiore  
Temperatura: Da -40°C a +105°C (funzionale)  
Temperatura: Da -65°C a +150°C (in magazzino) Dimensioni: 60 x 34 x 12 mm  
Conformità: Nessuna certificazione, è un componente quindi non certificabile

Le connessioni tra il modulo ADC24 e il Master Dil si effettuano con i cavetti “Dupont” femmina-femmina schermati (Fig. 3.6):

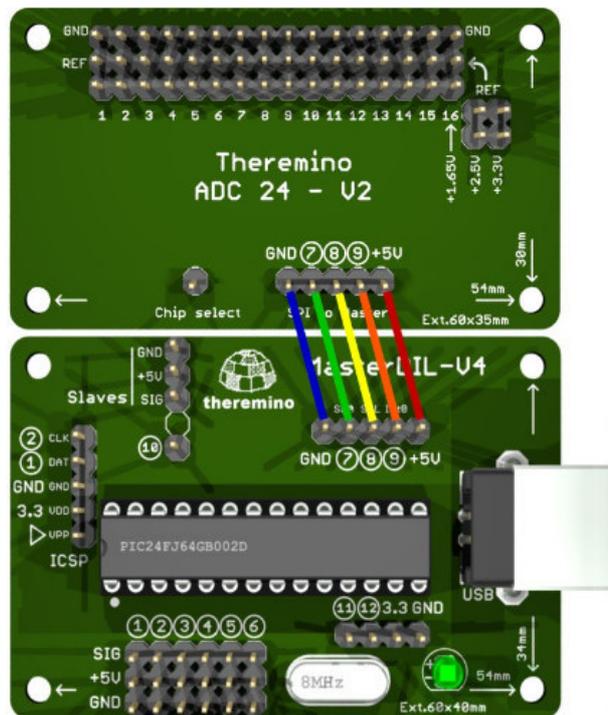
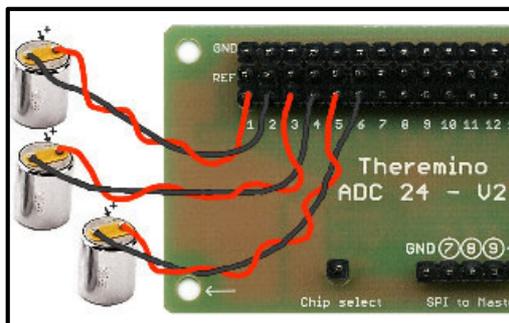


Figura 3.6 Connessioni tra il modulo ADC24 e il Master. I collegamenti vanno fatti correttamente con i cinque cavetti. Il giusto ordine di collegamento è GND, 7, 8, 9, +5V, come in figura.

Connessa la scheda Master Dil al convertitore ADC24(Fig. 3.7), si passa al collegamento dei sensori velocimetri o geofoni. Le analisi dei microtremori sono facilmente disturbate dai rumori periodici, anche se di bassissima intensità ma prolungati nel tempo. Questi rumori periodici appaiono nelle analisi di spettro come picchi e possono trovarsi a qualunque frequenza da meno di 1 Hertz a centinaia di Hertz. I disturbi provenienti dall'impianto elettrico sono a 50, 100 e 150 Hz, ma possono fare battimenti con la frequenza di campionamento e produrre qualunque altra frequenza. Spesso questi disturbi sono così bassi da venir mascherati dai segnali dei Geofoni, ma possono ugualmente falsare le analisi perché, prolungandosi nel tempo, hanno un forte effetto negli algoritmi di calcolo basati sulla divisione del segnale verticale per quello orizzontale (HVSr). Le prove effettuate con la nuova applicazione “Theremino AdcTester” hanno evidenziato che l'Adc24 ha un rumore bassissimo (0.17 uV) intermodulazione praticamente non misurabile (0.02 uV) e guadagno identico su tutti i canali.

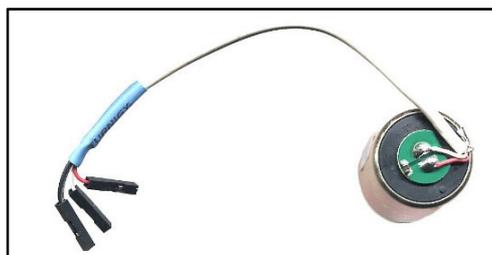
Prima di fare le connessioni, bisogna collegare e attorcigliare bene i fili, in modo da ridurre i rumori captati per via capacitiva e magnetica. Tenuti ben stretti i fili, (con

inversioni ogni pochi millimetri), si ottiene una buona azione schermante, nonché un filo più morbido e un cablaggio più ordinato.



*Figura 3.7 Schema collegamento sensori velocimetri al convertitore ADC24.*

I cavi utilizzati sono schermati tra i Geofoni e l'Adc24, come visibile nella immagine seguente (Fig.3.8):



*Figura 3.8 Collegamenti cavi schermati al geofono. Il filo rosso è il positivo e va collegato al primo Pin della coppia (Adc24\_ch). Il filo bianco è il negativo e va collegato al secondo Pin (Adc24\_ch\_b). Il filo nero è lo schermo e va collegato a massa dell'Adc24 (GND).*

Il cavo schermato è anche saldato su un lato del Geofono in modo da schermare anche l'avvolgimento interno. Per fare questa operazione bisogna saldare bene il cavo, limare con cura una piccola sezione di involucro metallico, preparare sia il Geofono che la calza del cavo. La saldatura va fatta con molta attenzione in modo da non sporgere sul fianco e facendo attenzione che non sia una “saldatura fredda” che potrebbe staccarsi. Il cavo schermato deve essere piccolo (2 o 3 mm di diametro esterno) e morbido (gommoso) in modo da non generare sforzi che potrebbero causare vibrazioni al cambiare della temperatura quindi creare dei disturbi che possono alterare la misura.

I geofoni utilizzati per la costruzione del tromografo sperimentale sono prodotti dalla ditta SENSHE (Fig. 3.9). I geofoni da utilizzare nel campo sismologico e HVSR (capsula geofoniche per i tromografi Sperimentali) sono: N ° 1 geofono verticale a 4,5 Hz, N ° 2 geofoni orizzontali a 4,5 Hz; per misure HVSR si utilizzano geofoni con frequenza di 4,5 Hz, proprio perché in termine di guadagno riescono a captare i

microtremori. La vivacità del segnale permette di ricevere segnali meno lisciati dall'inerzia propria dei geofoni a bassa frequenza permettono di vedere veloci cambiamenti in frequenza ed in ampiezza quando il segnale sismico viene riflesso da rifrattori anche modesti. Di seguito una breve descrizione dei geofoni analizzando il guadagno e il rumore prodotto:

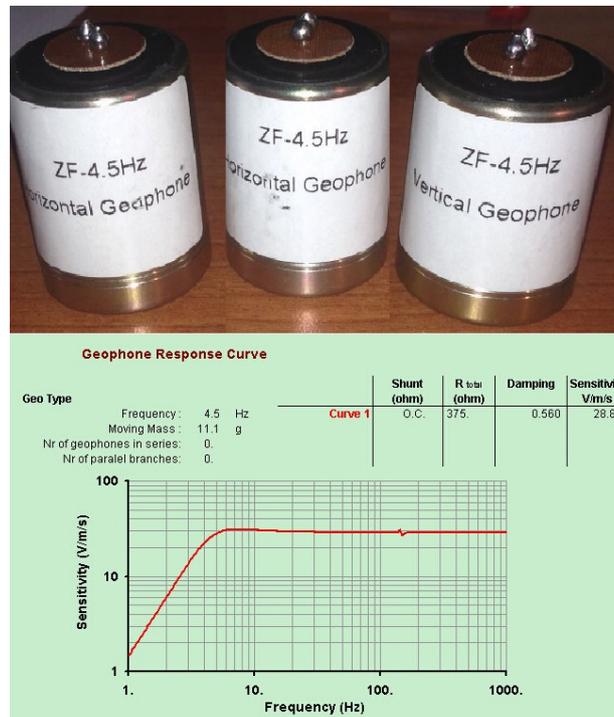


Figura 3.9 Il grafico visualizza la curva di risposta del geofono 4.5 Hz Senshe. Se si prende in considerazione la curva del grafico, si vede che la risposta da 5 Hz fino a 1000 Hz rimane costante e si aggira attorno al valore di velocità corrispondente al valore di "sensitivity" = 28,8 v/m/s, quindi i valori dei dati acquisiti con tali frequenze non subiscono alterazioni dovuti alla meccanica del geofono e quindi non sono da correggere nella fase di equalizzazione del segnale a 4 Hz l'ampiezza del segnale si riduce a 20.1 V/m/s circa; a 3 Hz ; il valore si riduce ulteriormente a 12 V/m/s circa; a 2 Hz scende a 6,0 V/m/s circa; a 1 Hz scende a 1,6 V/m/s circa per continuare a diminuire ulteriormente riducendo la frequenza del segnale. Ciò vuol dire un aumento del rapporto rumore / segnale pari a 18 volte superiore per le frequenze a 1 Hz rispetto a frequenze > di 5 Hz, causa di aperture a ventaglio del segnale HVSR alle basse frequenze, disallineamento dell'offset del rapporto HVSR e grafici con molto rumore. L'equalizzazione in pratica corregge l'array FFT delle ampiezze moltiplicandolo per l'inverso del decadimento del segnale per ogni frequenza considerata linearizzando il segnale in modo da rendere confrontabili i dati acquisiti in termine di ampiezza per le frequenze da 0,5 Hz fino ai fatidici 100 Hz come avviene con l'utilizzo degli accelerometri, di conseguenza il risultato aspettato per tutta la gamma di frequenze a parità di ampiezza avremo un grafico lineare per tutto il campo di misure come avviene con gli accelerometri che non sono soggetti ad alcun decadimento del segnale tra 0,5 - 1000 Hz avendo come frequenza di risonanza valore ben più bassi di frequenze di 0,25 - 0,5 Hz.

Fatti tutti i collegamenti del caso, si passa all'acquisizione dati tramite programma "open source" "Theremino Dolfrang" (Fig.3.10) è una applicazione semplice e leggera, usabile anche su computer molto lenti. Su computer mediamente veloci si possono acquisire fino a 24 canali, 500 volte al secondo, mentre si visualizzano i dati e contemporaneamente li si scrivono su disco. Il formato dei file di uscita è il SAF (*SESAME ASCII*), che può essere letto da tutti i più importanti software per la geologia. I campi sono separati con un carattere di tabulazione in modo da facilitare l'importazione in Excel. I valori sono tarati in Milli Volt o in Micro Volt, tenendo anche conto del guadagno in tensione dei pre-amplificatori. Il numero di decimali è variabile in modo da avere sempre la massima risoluzione, con il minimo possibile di caratteri.

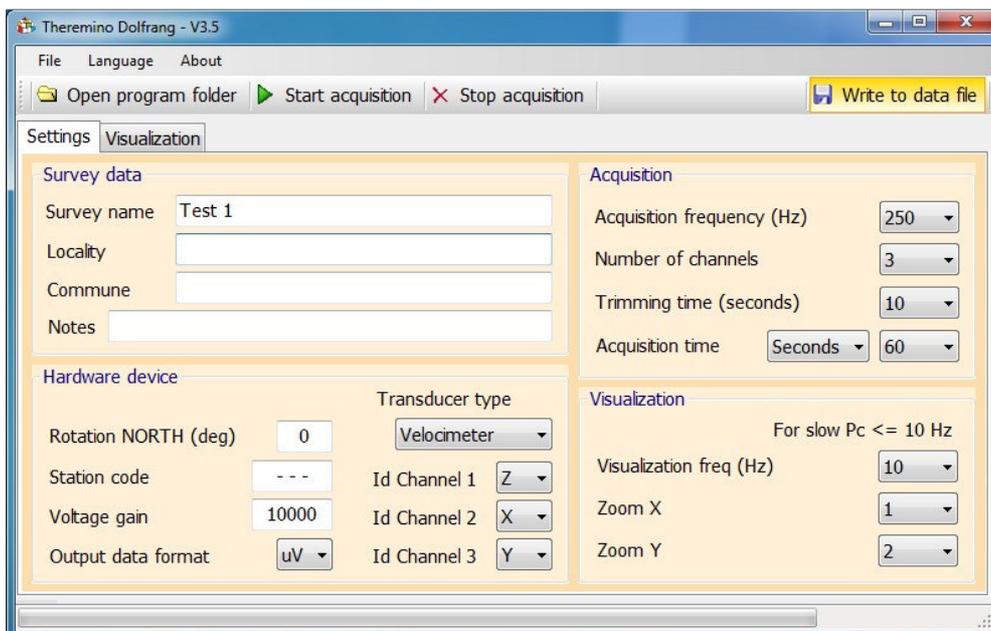
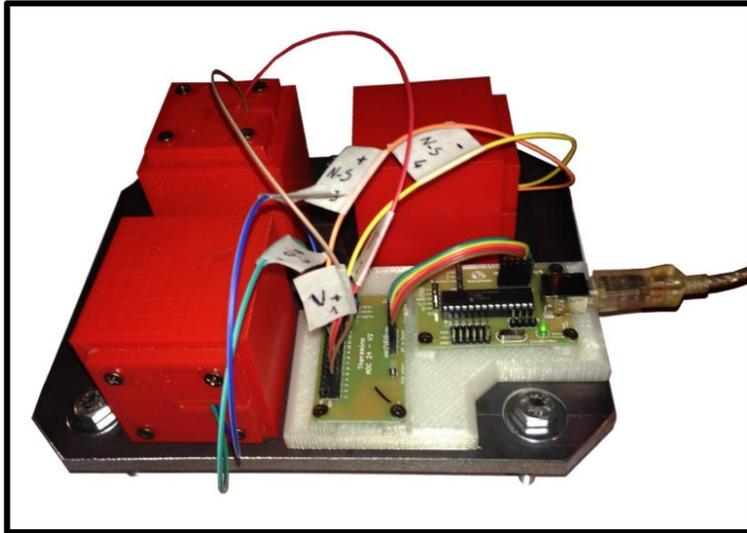


Figura 3.10 Interfaccia grafica del programma Theremino Dolfrang per acquisizione dati in entrata.



*Figura 3.11 a) Interno tromografo sperimentale. Sono presenti le 3 capsule geofoniche ed il sistema di acquisizione hardware con cavo Usb da collegare ad un PC.*



*Figura 3.11 b) Esterno tromografo sperimentale collegato al PC.*

### 3.3 Sperimentazione e taratura strumento sperimentale

Dalle sperimentazioni avvenute su terreni con condizioni antropiche ed ambientali diverse, hanno portato ad individuare quali sono i principali criteri di progettazione di un acquirente per prove HVSR; Da ciò si sono dedotti i seguenti punti:

- 1) Il contenitore della strumentazione elettronica deve essere più simmetrico possibile, ideali sono le forme quadrate o rotonde. L'involucro di plastica o di lamiera servirà solo per attutire le vibrazioni.
- 2) Il peso deve essere superiore a 1,5 kg, fino ad un massimo di 5 Kg, pesi eccessivi portano ad avere inerzie della meccanica, aumentando il peso deve aumentare anche l'area di posa dei punzoni o "spike".
- 3) I geofoni non vanno fissati alla plastica del contenitore e non devono essere bloccati con fascette, ciò può provocare in caso di rumori antropici e di vento inutili vibrazioni che sporcano il segnale e rende necessaria l'equalizzazione del segnale per rendere simile la risposta dei tre segnali.
- 4) I geofoni devono essere collegati al terreno in maniera diretta e tra di loro collegati da una struttura rigida. Per questo motivo si è scelto il sistema con cubo in legno, in futuro si passerà ad un cubo in alluminio, molto più pesante.
- 5) Gli spikes non devono sporgere oltre a 1 - 3 cm dal fondo dello strumento.
- 6) Il rapporto tra la distanza media dei tre puntali (che deve essere il più possibile uguale) e l'altezza del baricentro da terra deve essere il minimo possibile per garantire stabilità in caso di rumori antropici e vento.
- 7) La forma del contenitore deve essere limitato in altezza per ridurre l'azione del vento e di forma il più possibile aerodinamica.
- 8) Il sistema deve essere stagno e predisposto per lavorare anche in situazioni ambientali avverse, neve, polvere e fango.

Fatte queste accortezze, si può passare alla registrazione delle tracce del Noise. Queste, verranno processati con software open source Geopsy – Dinver. Il programma Geopsy - Dinver ed altri programmi possono essere scaricati gratuitamente da [www.geopsy.org](http://www.geopsy.org).

### **3.3.1 Criteri di posizionamento della strumentazione di misura su edifici**

La stima delle frequenze proprie di un edificio ha senso solo se questo può essere considerato come un'unica entità strutturale; la presenza di giunti tecnici, sismici o altre discontinuità strutturali, fa sì che le parti giuntate si comportino indipendentemente le une dalle altre e che quindi possano avere frequenze tra loro diverse. Anche la presenza di ampie zone con solai non rigidi nel proprio piano può comportare che parti diverse della struttura vibrino con frequenze differenti, proprio perché non rigidamente collegate tra loro. Una volta identificate le singole unità strutturali, è opportuno cercare di eseguire le misure di tremore in corrispondenza del piano più elevato raggiungibile, tipicamente il sottotetto, dove gli spostamenti della struttura sono massimi e quindi, oltre ad essere soggetti ad un errore relativo inferiore, sono più facilmente rilevabili. La misura nel sottotetto ha, inoltre, il vantaggio di essere meno disturbata dal rumore antropico, maggiormente presente ai piani inferiori. In tal modo le registrazioni possono essere eseguite anche durante le ore di normale affollamento dell'edificio. Allo scopo di ridurre la possibilità di registrare moti locali caratteristici di singole parti e non dell'intera struttura, si deve posizionare lo strumento di misura in prossimità di elementi portanti verticali (muri portanti, pilastri, setti, ...), evitando le zone in campata dei solai e la vicinanza a tramezzi e divisori. Anche per quanto riguarda la stima dell'entità degli effetti torsionali valgono le stesse considerazioni fatte per la misura del periodo proprio della struttura. In questo caso, però, è necessario effettuare almeno due misure, possibilmente contemporanee e quanto più possibile distanti tra loro. Quest'ultima accortezza consente di poter successivamente tracciare la deformata con maggior facilità. La contemporaneità delle registrazioni non è indispensabile ma rende più immediato stabilire se i punti misurati si spostino in fase (stesso verso) o in opposizione di fase (verso opposto). La realizzazione di un numero maggiore di misure consente di compensare eventuali errori e di meglio stimare la deformata, ma per contro allunga i tempi di sopralluogo e di elaborazione.

In generale lo strumento deve essere posizionato, nei diversi punti di misura, con l'accortezza di porre sempre le componenti nella stessa direzione, ad esempio dirette lungo il nord geografico. Nel caso di edifici di modesta dimensione, o con configurazione planimetrica di tipo simmetrico, può essere conveniente orientare il sensore di misura lungo una delle direzioni principali dell'edificio oppure proprio

secondo uno degli assi di simmetria; ciò può semplificare le elaborazioni successive. Per la misura esterna sul sito, si deve avere l'accortezza di disporre il sismometro lontano da fonti di rumore che potrebbero sfalsare la misura. Si deve quindi evitare di posizionare il sismometro nelle vicinanze di strade, alberi o altre fonti di rumore. Nel caso in cui non ci si possa tenere a debita distanza da tali elementi (ad es. contesto urbano) è preferibile effettuare le misure in orari o periodi in cui il disturbo sia minimo. È fondamentale prestare particolare attenzione nel disporre la stazione sul sito in modo che le componenti abbiano la stessa direzione di quelle nell'edificio o, eventualmente, effettuare un'opportuna rotazione dei segnali prima dell'elaborazione. La vicinanza della misura all'edificio è anche un parametro da tenere in considerazione; misure troppo prossime possono registrare le frequenze proprie dell'edificio stesso.

### **3.3.2 Taratura strumentazione sperimentale**

Di seguito, verranno esaminati dei casi di messa a punto della strumentazione sperimentale. Sono state fatte delle acquisizioni con strumentazioni professionale, i dati ottenuti, con il tromografo sperimentale, sono in ottimo accordo con strumentazione professionale. Le acquisizioni sono state fatte in giorni diversi sempre nello stesso punto. Si è notato, che lo strumento sperimentale, non ha subito fenomeni di staratura, quindi i dati possono considerarsi attendibili. In questo lavoro, verranno presentati solo i casi più significativi.

#### **1) Test:**

N° canali attivati 3

Asse considerato X Y Z

Frequenza di campionamento 500 hz

Durata acquisizione 20 minuti

Frequenza propria geofoni 4,5 hz

Gain applicato 10.000

Filtraggio software passa banda applicato 0,50 - 100 hz

Note: la prova è stata eseguita al 1 piano di un palazzo.

La prova di durata 20 minuti è stata eseguita con due acquisitori: quello sperimentale, e un ottimo strumento professionale posti nelle immediate vicinanze (Fig. 3.12).

L'elaborazione del segnale è stata fatta utilizzando 30 tracce più significative, non necessariamente nel medesimo istante di registrazione.

Questo fattore e le diversità hardware e di amplificazione dei 2 acquisitori hanno fatto sì di non avere le medesime ampiezze in termini di spettro anche se correlabili tra loro. In termini di frequenza, si sono ottenuti gli stessi risultati, da tener presente che la meccanica del geofono 3d dello strumento sperimentale è ancora in fase di messa a punto.

L'ampiezza del segnale acquisito su fabbricati è generalmente 10 - 20 volte più alta di quelle generata dai microtremori sul terreno a causa dell'altezza del fabbricato, in particolare le azioni orizzontali dovute al rumore antropico e al vento. In questo caso occorre usare con il prototipo un'amplificazione con  $gain \leq 1000$  invece dei normali 10.000 x per non mandare il segnale in saturazione. Ai fini dell'HVSR non interessa l'ampiezza assoluta degli spettri ma dal rapporto vibrazioni delle azioni orizzontali / verticali.

Molti sono i fattori che fanno variare l'ampiezza degli spettri, in particolare i bit dello strumento utilizzato, la durata del sondaggio, il gain applicato. La sensibilità massima dello strumento, la frequenza propria dei geofoni, il decadimento del segnale prodotto dagli amplificatori in funzione della frequenza, il decadimento del segnale prodotto dal geofono al di sotto dei 4,5 hz, ecc.

Per poter avere segnali confrontabili (Fig.3.13) occorre eseguire l'operazione di equalizzazione del segnale acquisito che riporta i dati acquisiti a sistemi di riferimento confrontabili, ad esempio accelerazione, velocità, spostamento.

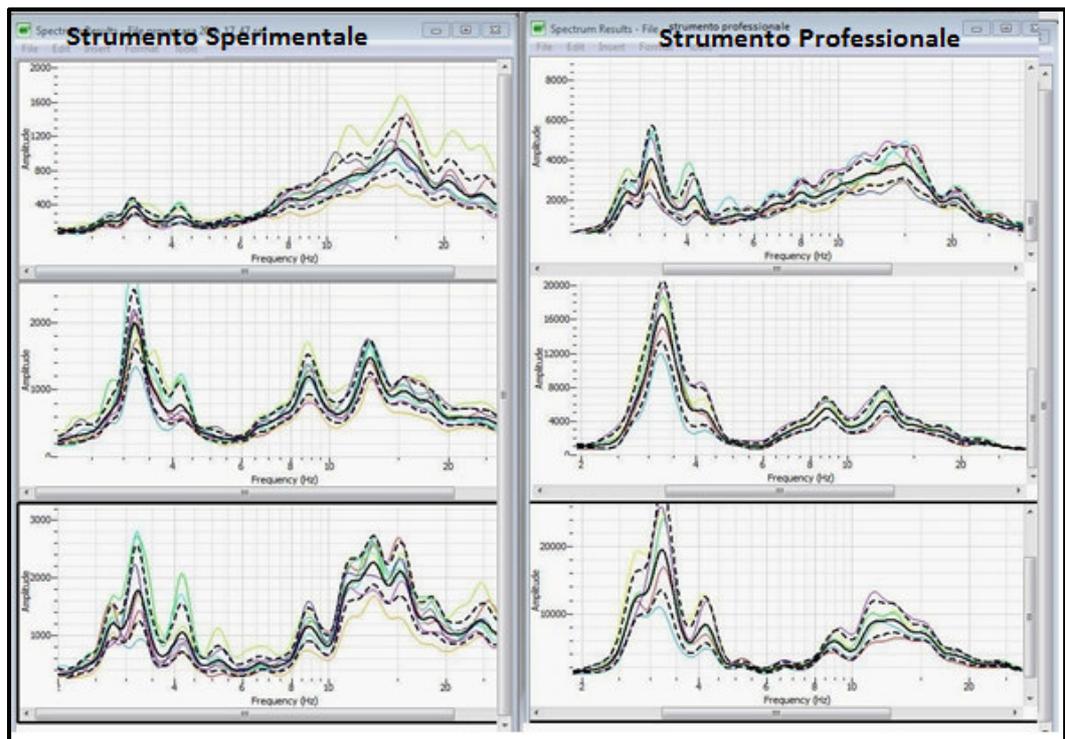


Figura 3.12 Spettri Asse X Y Z

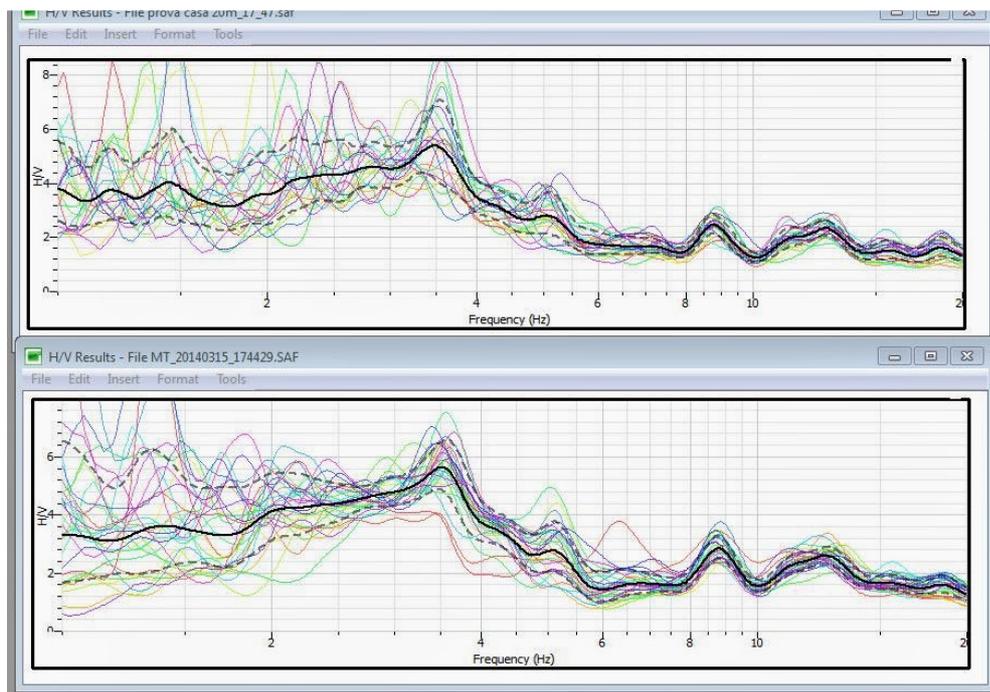
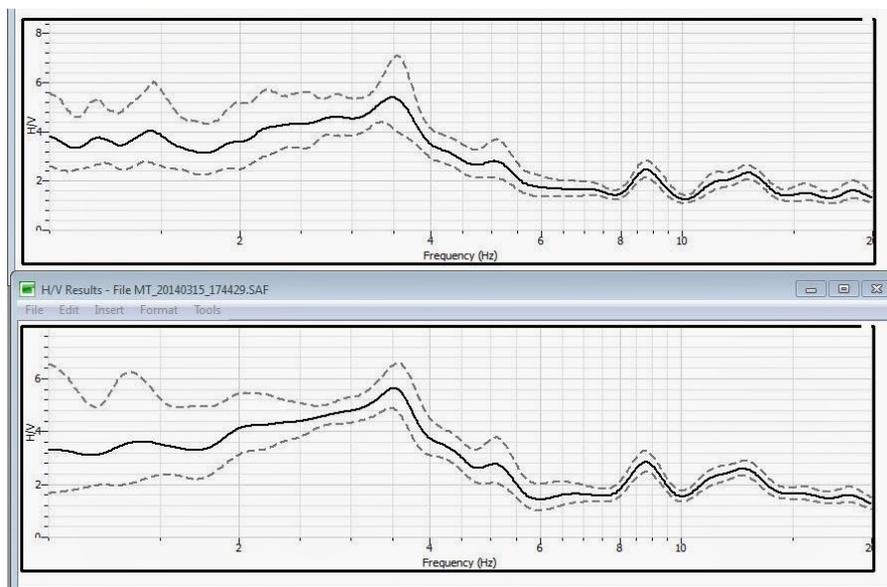


Figura 3.13a Grafico HVSR della prova eseguita: con acquisitore sperimentale in alto, con acquisitore professionale in basso. Stessa acquisizione figura 3.12.

Il calcolo dell'HVSR, come detto in precedenza rappresenta il rapporto tra le azioni orizzontali e quelle verticali per cui non è influenzato come nel caso dell'analisi spettrale delle variazioni in termini di ampiezza assoluta degli spettri rilevati per tanto l'operazione di equalizzazione non è necessaria.

Al contrario del precedente confronto degli spettri, (figura 3.12) i due grafici HVSR ottenuti sono sovrapponibili sia in termini di frequenza che di ampiezza nonostante le diversità hardware dei due strumenti utilizzati come si vede nelle seguenti figure (Fig.3.13):

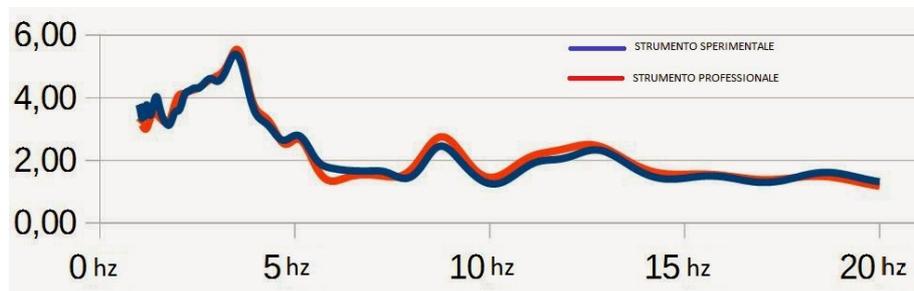


*Figura 3.13b Immagine conclusiva sintetica dell'HVSR - stessa acquisizione figura precedente - si nota la perfetta somiglianza delle due acquisizioni. Sopra il grafico HVSR calcolato con lo strumento sperimentale. Sotto lo stesso grafico ottenuto con lo strumento professionale. Al di sotto dei 2 hz il segnale è meno dettagliato per lo strumento professionale forse a causa delle maggiori dimensioni, peso e volumetria dello strumento, nonostante che in tutte e due le elaborazioni sia stato usato lo stesso coeff. di smoothing = 45. Avvicinandosi alle basse frequenze lo strumento professionale mostra un aumento dell'allargamento a "ventaglio" del segnale.*

In tutti i casi l'apparente maggior dettaglio sotto 1 hz dello strumento sperimentale è gran parte dovuto anche dal contributo degli spettri iesimi anomali entrati e considerati per eseguire il calcolo. Tali variazioni sono dovute anche dal fatto che pur selezionando 30 tracce (windows) più significative non è detto che nelle due elaborazioni fatte contemporaneamente vengano selezionate per il calcolo tutte le medesime tracce temporali e quindi gli spettri ottenuti e relativi HVSR non sono perfettamente sovrapponibili. Avere due elaborazioni simili e non uguali succede anche eseguendo due o più elaborazioni dello stesso sondaggio acquisito con il medesimo strumento variando anche di poco i parametri di elaborazione e a maggior ragione elaborando due acquisizioni consecutive eseguite anche in questo caso con il medesimo strumento.

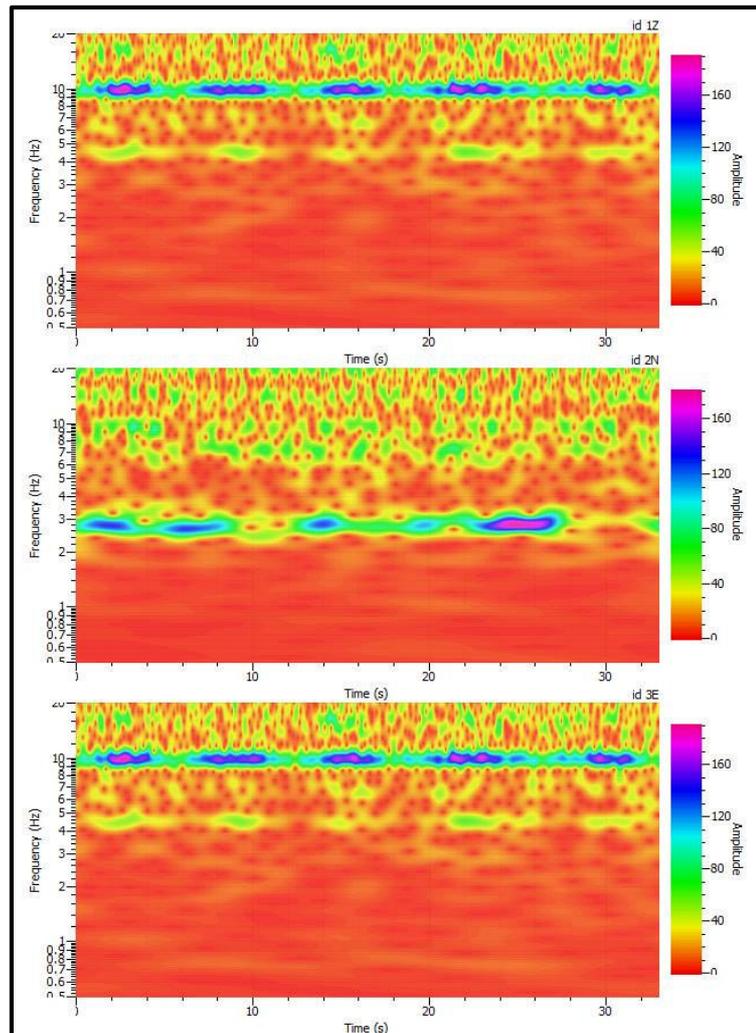
Solo allungando a 30 - 60 minuti la durata dell'acquisizione si ha una maggiore sovrapposizione dei dati acquisiti avendo a disposizione un maggior numero di dati rendendo le operazioni di elaborazione maggiormente affidabili.

Nella figura 3.14 sono stati riportati i valori di HVSR ottenuti con i due strumenti su un grafico frequenza - HVSR, si è nota una differenza media tra i due grafici pari a un fattore 0,09  $H_v$ , normale per aver fatto una acquisizione al 1° piano di un. Si fa presente che le piccole variazioni tra la traccia rossa e blu si hanno anche quando si elabora lo stesso sondaggio acquisito dal medesimo acquisitore più volte variando anche di poco i parametri di settaggio.



*Figura 3.14 Confronto del grafico HVSR acquisito con: tromografo sperimentale in ( blu ) e tromografo professionale in (rosso).*

La stazionarietà del segnale acquisito è rappresentata in Fig. 3.15:



*Figura 3.15 Grafico spettri di registrazione segnali acquisiti. In questi tre grafici si può vedere che cosa succede nei primi 35 secondi di registrazione a livello di spettro: 1) In alto si nota una frequenza con valori di  $\mu V = \max$  di 160 di ampiezza corrispondente ad una frequenza di 10 Hz ed una secondaria attorno a 4,5 hz. 2) Nel centro asse nord sud a 2,9 hz di ampiezza max 160  $\mu V$ . 3) in basso una frequenza a 10 hz con ampiezza max di 160  $\mu V$  ed una secondaria a 4,5 hz circa il rapporto tra le frequenze dei geofoni orizzontali con quello verticale permette di ricavare il grafico HVSR la stazionarietà del segnale nel tempo può raddoppiare in corrispondenza di picchi con attimi meno rumorosi.*

## 2) Test di simmetria

Questo test è servito a verificare che non ci siano situazione di errore nell'acquisizione, nell'hardware e/o nella costruzione del geofono 3d sperimentale. La prova consiste nel fare due acquisizioni facendo ruotare nella seconda il geofono 3d di 90 gradi. La prova si ritiene superata se il grafico del primo sondaggio è simile al terzo del secondo sondaggio (Fig.3.16): stessa cosa per il terzo della prima prova simile al secondo della seconda prova. Avendo fatto ruotare il geofono 3D si sono scambiati i riferimenti asse x con asse y. La prova per essere certi dell'esattezza dei risultati dovrebbe essere

di durata non inferiore ai 30 minuti, nel nostro caso è di soli 5 minuti ma si può già vedere che gli spettri contrassegnati dalla freccia rossa e blu sono simili. Questa prova è stata fatta in varie sequenze temporali.

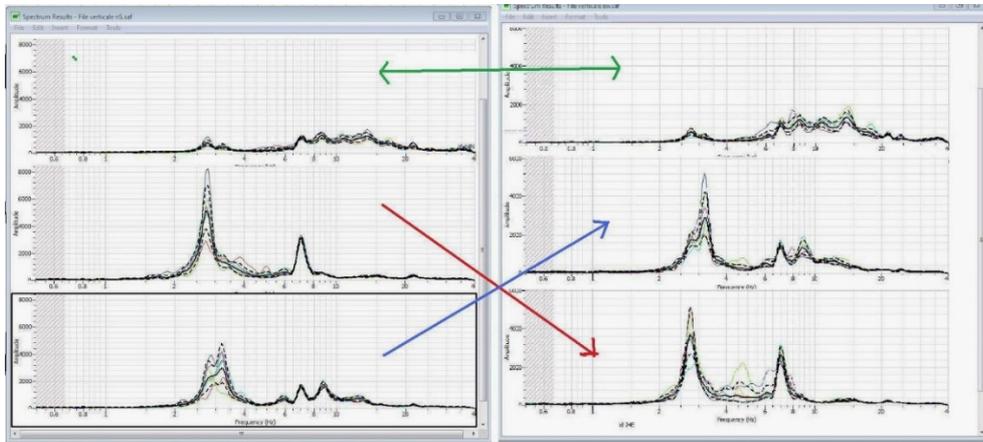


Figura 3.16 Test di simmetria acquisitore sperimentale.

### 3) TEST CON FREQUENZA DI ACQUISIZIONE A 125 hZ, 250 hz E 500 hz

Le acquisizioni sono state fatte al 3° piano di un fabbricato in calcestruzzo.; di ogni acquisizione viene visualizzato il rapporto HVSR e l' FFT del segnale acquisito. La meccanica del geofono 3D sperimentale- acquisitore usb utilizzata è quella del prototipo con cubo in legno, con una piastra in ferro del peso di 2.2 kg ( per un peso totale di 2,8 kg). Il tutto a baricentro basso. Nella figura 3.17a (Fig.3.17b FFT segnale) l'acquisizione fatta a 125 Hz:

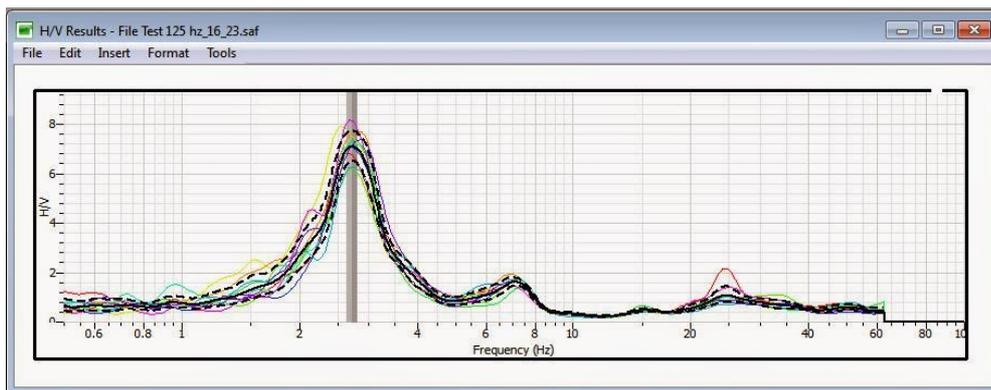
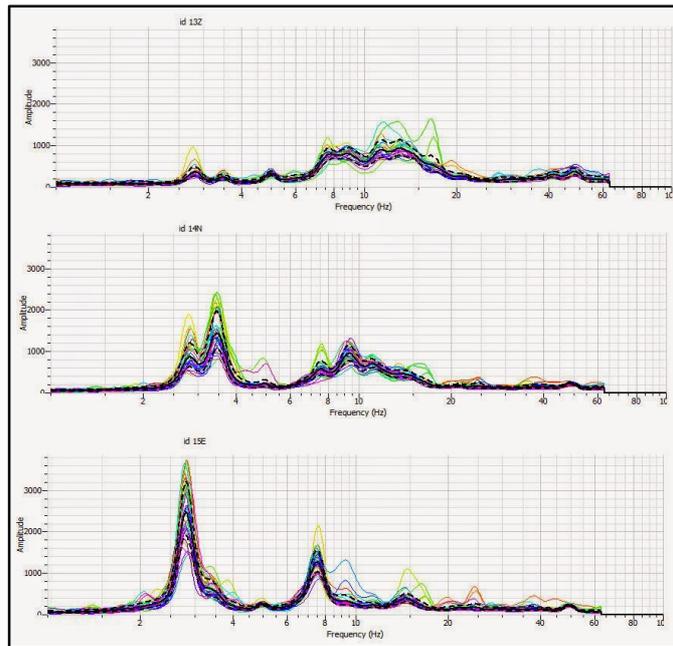
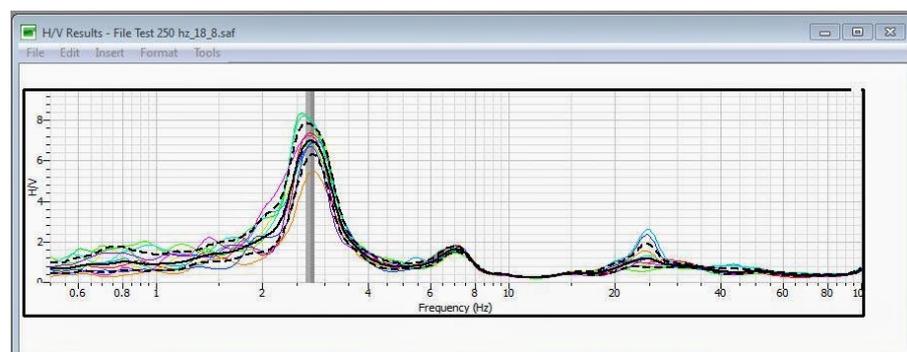


Figura 3.17 a) Acquisizione a 125 Hz. Il segnale a causa di un numero limitato di dati è più piatto e liscio specialmente da 10 a 60 hz rispetto alle acquisizioni fatte con 250 e 500 hz.

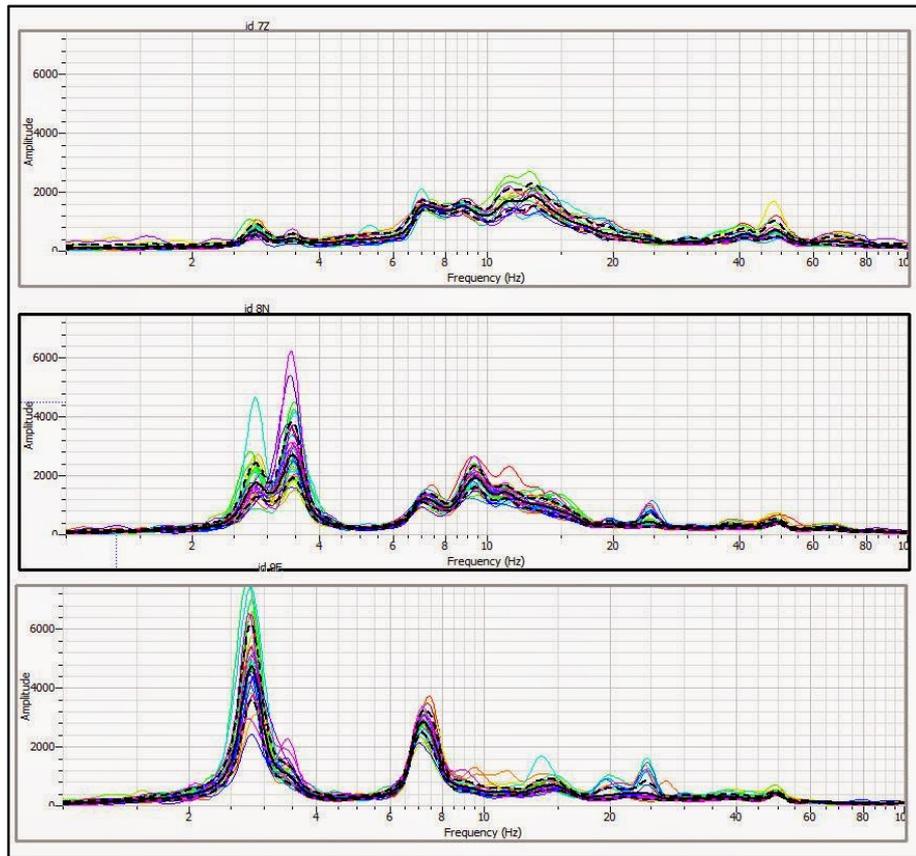


*Figura 3.17b FFT a 125 HZ. La frequenza di campionamento più opportuna è quella a 500 Hz in quanto offre la possibilità di acquisire un maggior numero di dati utili per eseguire una buona FFT del segnale a parità di durata dell'acquisizione. Il numero di dati acquisiti per la durata di 30 minuti è pari a quella di 1 ora ottenuti con frequenza di campionamento di 250 Hz e di 2 ore di registrazione acquisendo a 125 Hz). In questo il segnale è affidabile fino e oltre ai 100 Hz. Maggiore sarà anche il dettaglio per le frequenze inferiori a 1 Hz. Le ampiezze ottenute dei picchi HVSR sono simili, le piccole diversità sono dovute al fatto che i tre sondaggi non sono stati fatti contemporaneamente.*

Nel caso di acquisizione a 250 Hz (Fig. 3.18a e b) si hanno un maggior numero di dati acquisiti quindi il grafico si può arricchire di un maggior dettaglio spettrale. In questo caso non si hanno dati utili fino a 125 Hz e abbiamo ancora perdita di dettaglio nel segnale da 50 a 100 Hz ed oltre. Il numero di campioni è praticamente il doppio del test 1 a 125 Hz.

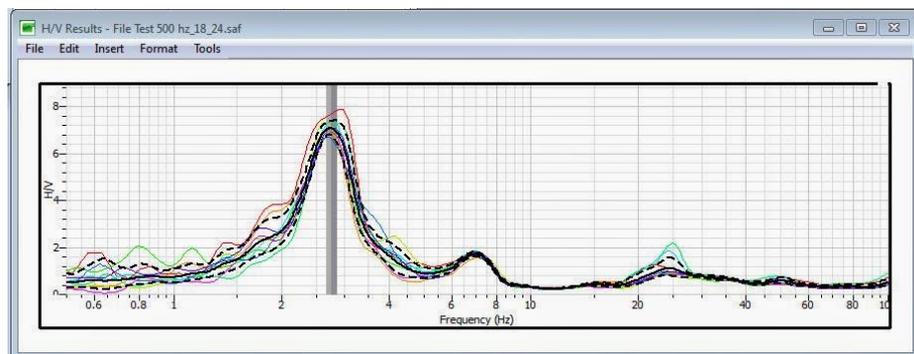


*Figura 3.18a ) Acquisizione a 250 Hz.*

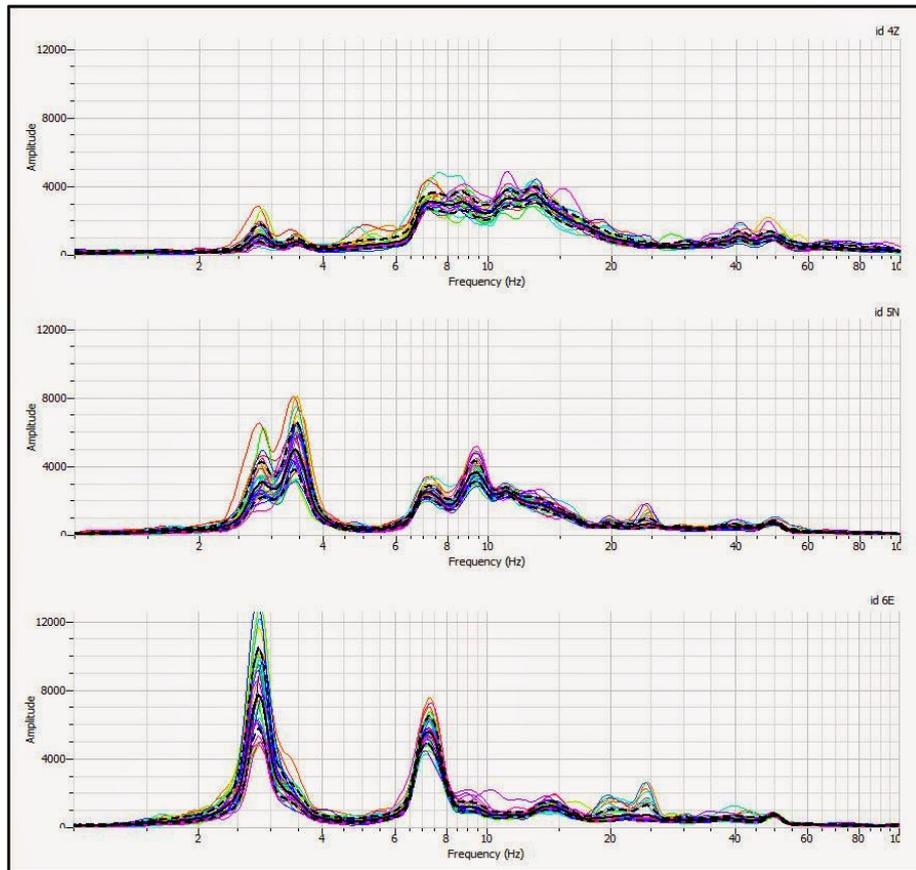


*Figura 3.18 b FFT a 250 Hz. Valgono le stesse considerazioni del caso precedente, si ha una maggiore ampiezza dell'FFT ne consegue un maggior dettaglio specie nelle basse frequenze.*

Infine, l'ultima acquisizione a 500 Hz (Fig. 3.19 a,b) è del tutto simile a quella campionata a 250 Hz. Anche in questo caso il numero di campioni è il doppio dei campioni a 250 Hz, per cui la curva dei rapporti spettrali H/V è molto ravvicinata in termini di ampiezza dello spettro.



*Figura 3.19 a) Acquisizione a 500 Hz.*



*Figura 3.19 b) FFT a 500 Hz. Considerazioni uguali al caso precedente. Si ha una ulteriore maggiore ampiezza dell'FFT ne consegue un maggior dettaglio specie nelle basse frequenze. I valori in ampiezza del picco massimo di frequenza di 2,7 hz è praticamente triplicato rispetto a quello registrato con frequenza di campionamento a 125 hz. Anche gli spettri si presentano meno dispersi. Si fa presente che avendo usato trasduttori velocimetrici (geofoni) l'ampiezza vera dei segnali FFT va a decadere da i 4,5 hz in direzione zero hz.*

#### **4) Test misura picco di risonanza struttura**

**Tipo di edificio:** edificio singolo, costituito da telaio in c.a. centrale e 2 solai laterocementizi; composto da un piano seminterrato un piano rialzato, una mansarda; misure in pianta 10.60m x 10.30m.

**Data e periodo di acquisizione:** 05.03.2015 ore 18:00÷20:00.

**Condizioni meteo esterne:** assenza di vento; assenza di pioggia; esterno: temperatura 10°C, umidità relativa 21% interno: temperatura 19.0°C, umidità relativa 43%

**Assi considerati:** X, Y, Z;

**Acquisitore USB:** 23/02/2015. Frequenza propria dei 3 geofoni: 4.5 Hz.

**Frequenza di campionamento:** 333Hz

**Nota:** edificio collocato in ambiente urbano in zona residenziale. Al momento del test le vie intorno l'edificio sono interessate da scarso traffico.

**Obiettivo:** misura sperimentale della frequenza propria dell'edificio.

**Software acquisizione:** Dolfrang ver. 4.2; Theremino HAL ver. 5.1

**Software elaborazione:** Geopsy ver. 2.10

**Quota:** +6.30m rispetto quota terreno sul perimetro esterno dell'edificio.

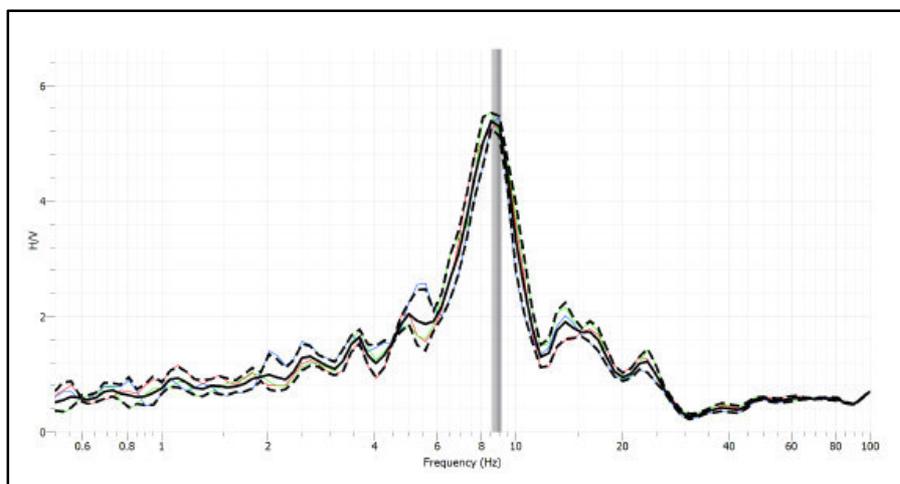
**Durata dell'acquisizione:** 40 minuti. Numero di dati: 1.200.000,  $\Delta t$  0.002 secondi.

Una prima valutazione del 1° periodo proprio della struttura (Fig.3.20) si può svolgere con la relazione:

$$T = \text{numero di piani} / 10 = 1.2 / 10 = 0.12 \text{ secondi}$$

Da cui

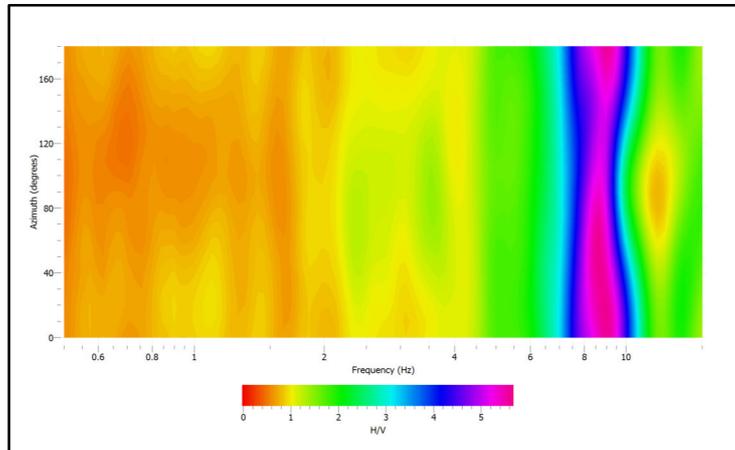
$$F = 1/T = 1/0.12 = 8.33 \text{ Hz}$$



*Figura 3.20 Elaborazione H/V. Si nota il Picco di risonanza H/V a circa 8 Hz.*

La direzionalità del rapporto H/V (Fig.3.21) è l'informazione che riguarda la direzione di provenienza del segnale sul semipiano orizzontale, ciò consente di osservare una eventuale polarizzazione del segnale lungo una certa direttrice. Nel caso in esame, leggendo il grafico focalizzando l'attenzione ai valori più elevati del rapporto H/V con riferimento al solo asse delle ascisse (ossia per individuare l'intervallo di frequenze in cui collocare il periodo proprio dell'edificio) si nota una certa omogeneità del rapporto

H/V nella fascia individuata in precedenza quale valore della frequenza fondamentale dell'edificio, confermando i risultati ottenuti.



*Figura 3.21 Omogeneità del segnale H/V acquisito. Da notare l'ottima stazionarietà del segnale evidenziata dai colori sul magenta. Nonostante sia uno strumento sperimentale, il segnale viene acquisito privo di rumori che vanno ad alterare la misura.*

## Capitolo 4

### **Utilizzo di strumentazioni per la caratterizzazione dinamica di ponti viari in cemento armato: ASPETTI TEORICI E SPERIMENTALI.**

Caratterizzare dal punto di vista dinamico una struttura e un terreno significa determinarne le caratteristiche di rigidità e di massa (o, meglio, gli spessori degli strati, nel caso del terreno), che, insieme, rappresentano i modi di vibrare nei termini di frequenze, ampiezze e smorzamenti. La conoscenza della risposta dinamica di una struttura e di un terreno è un passo necessario nella progettazione antisismica, negli interventi di adeguamento antisismico e nella pianificazione territoriale ed urbanistica. In questo capitolo, verranno affrontati studi di caratterizzazione dinamica di opere viarie quali dei ponti situati nel territorio calabrese. Gli strumenti utilizzati per questa campagna di studi sono stati: Accelerometri, Laser Scanner e Tromografo Sperimentale.

Sono state ampiamente impiegate le tecniche geomatiche per il rilievo ed i risultati sono stati utilizzati oltre che per scopi di documentazione e rappresentazione, anche per la ricostruzione dei procedimenti costruttivi, per la modellazione agli elementi finiti e per la simulazione del comportamento strutturale in caso di sisma. Le prove di caratterizzazione dinamica sono state effettuate a mezzo di accelerometri sismici. Si è proceduto ad usare il rumore sismico ambientale (NSA) per identificare le frequenze proprie di vibrazione di una infrastruttura mediante il tromografo digitale sperimentale. I dati così raccolti, sono stati utili per studi di Early Warning Sismico (SEWS).

#### 4.1 SISTEMA EARLY WARNING SISMICO (SEWS) PER LE GRANDI INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

Il Sistema di Early Warning<sup>1</sup> Sismico (SEWS) consente tra gli altri scopi di anticipare informazioni relative all'intensità di un terremoto alcuni secondi prima che lo stesso si verifichi presso il sito di interesse. Esso fu inizialmente introdotto come strumento per consentire rapidi interventi di soccorso in caso di evento sismico. Mentre le onde sismiche viaggiano dall'ipocentro verso un certo sito, una rapida analisi delle proprietà principali del terremoto lascia un certo margine di tempo per lanciare l'allarme e determinare l'interruzione repentina di attività la cui esposizione all'evento sismico è potenzialmente molto pericolosa (centrali nucleari, treni ad alta velocità in corsa, ecc.). Un SEWS<sup>2</sup> prevede un sistema di stazioni per l'installazione di accelerometri, che consentono la registrazione delle onde sismiche. In particolar modo le onde che vengono rilevate per prime sono le onde P, più veloci delle onde S, che sono invece le onde più dannose per le strutture. L'analisi delle onde P consente di stimare l'intensità delle onde S, fornendo così una previsione dell'entità dell'evento sismico che sta per accadere.

Studi recenti e molto innovativi nel campo dell'ingegneria sismica hanno mostrato la possibilità di sfruttare il SEWS non solo per lanciare l'allarme alle autorità di imminente pericolo, ma anche per calibrare dispositivi di protezione antisismica di tipo attivo o semiattivo installati su un'infrastruttura.

---

<sup>1</sup> L' Early Warning, consiste nello studio delle onde relative ad un certo terremoto con il fine (tra i numerosi altri: allarmi, interruzioni d'uso, ecc) di predire alcuni parametri, di interesse nella progettazione strutturale, dell'evento sismico che sta per accadere, qualche secondo prima che esso si manifesti.

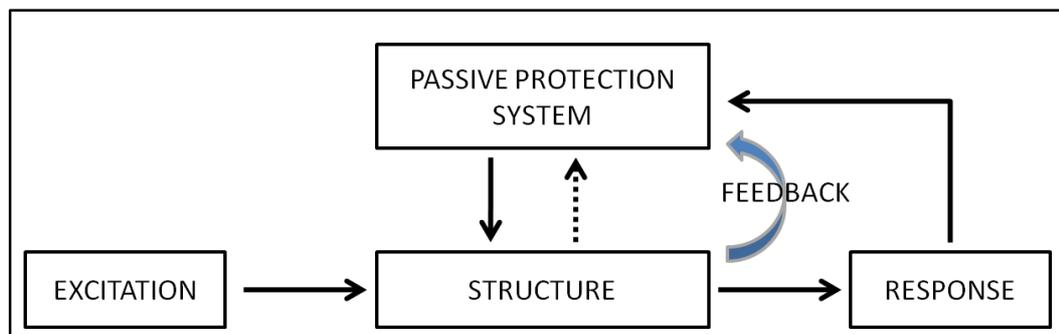
<sup>2</sup> Il principio su cui si basa un sistema di Early-Warning sismico è relativamente semplice, mentre rimane complesso lo sviluppo di sistemi affidabili ed efficienti, direttamente utilizzabili per attività di prevenzione.

Le onde sismiche di maggiore ampiezza prodotte da un terremoto si propagano all'interno della Terra con una velocità inferiore dei segnali trasmessi via radio/cavo. Indicativamente, si può affermare che la velocità di propagazione delle onde sismiche P, che sono le più veloci e anche le meno distruttive, per distanze regionali è compresa tra 4km/s e 6 km/s. D'altro canto la velocità delle onde di taglio, onde S, e onde di superficie, che producono danni maggiori alle infrastrutture, è circa 1.7-2 volte inferiore a quella delle onde P. Pertanto, essendo disponibile una rete sismica nell'area sorgente dei terremoti, l'informazione circa la sua localizzazione, magnitudo ed ampiezza prevista del moto del suolo, può raggiungere un sito "target", in funzione della distanza, alcuni secondi o poche decine di secondi prima dell'arrivo delle onde sismiche di ampiezza più rilevante. Questo intervallo di tempo può essere sufficiente per attivare procedure automatiche di emergenza, come lo spegnimento di server di gestione dati e controllo di reti, disattivazione dei meccanismi di funzionamento di impianti industriali a rischio o reti di distribuzione elettrica, gas, interruzione del traffico viario e ferroviario.

Lo stato dell'arte distingue sistemi di controllo passivi, attivi, semiattivi e ibridi. La differenza principale tra essi consiste nel fatto che mentre la protezione passiva viene attivata direttamente dalla deformazione strutturale indotta dall'evento sismico stesso, gli altri tipi di sistemi di controllo hanno bisogno di fonti di energia esterne, di entità più o meno ingente, per garantire la loro attivazione. Inoltre questi ultimi possono essere definiti come sistemi intelligenti dal momento che il loro funzionamento viene regolato da algoritmi matematici nel momento stesso di accadimento dell'evento sismico.

I sistemi di controllo passivo (Fig. 4.1) garantiscono la riduzione della risposta strutturale fornendo capacità dissipative aggiuntive (incremento energia dissipata) oppure modificando le proprietà dinamiche strutturali (riduzione energia in input). Nel primo caso si tratta di dispositivi isteretici, viscosi, oleo-dinamici, ecc, mentre nel secondo caso si fa riferimento agli isolatori. L'introduzione di questi ultimi comporta un incremento del periodo proprio di vibrazione  $T_1$  della struttura, garantendo così un'ordita spettrale in corrispondenza di  $T_1$  più bassa.

Il principio di funzionamento dei sistemi di controllo passivi è rappresentato nella figura che segue: è evidente, come già accennato in precedenza, che il loro funzionamento è attivato dalla risposta strutturale stessa all'evento sismico.



*Figura 4.1 Principio di funzionamento del sistema di protezione passivo*

Il principio di funzionamento dei sistemi di controllo attivo (Fig. 4.2) è molto differente: in questo caso la riduzione della risposta strutturale si ottiene applicando una forza di controllo sulla struttura che si oppone alla forza indotta dal sisma. È chiaro quindi che questi sistemi richiedono un'ingente fonte di energia esterna per generare tale forza, nonché un sistema di acquisizione che rilevi l'intensità dell'evento sismico

(feedforward) o l'intensità della risposta strutturale (feedback), e un sistema di calcolo che elabori l'algoritmo che stabilisce l'entità della forza da generare.

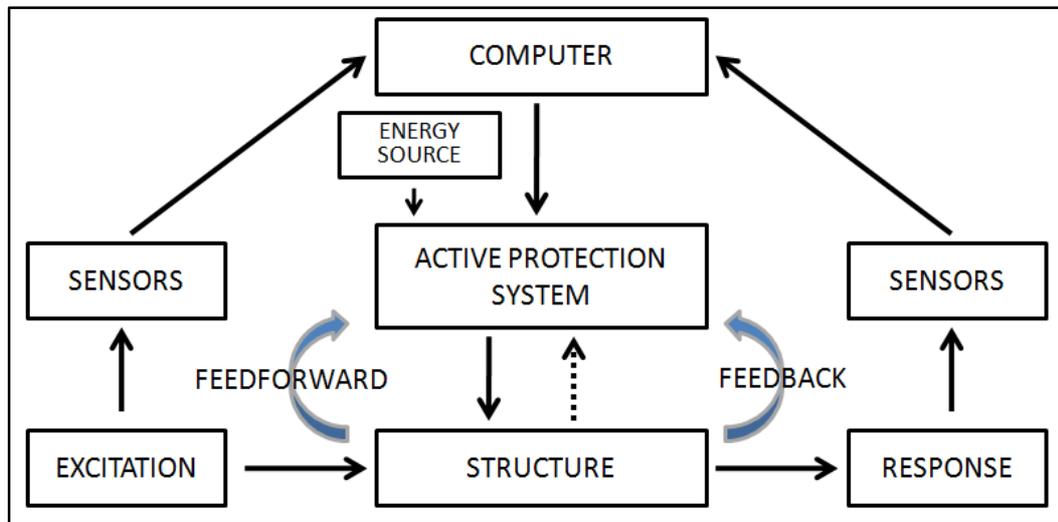


Figura 4.2 Principio di funzionamento del sistema di controllo attivo

Un sistema di controllo semi-attivo (Fig. 4.3) consiste invece in un sistema di controllo passivo dotato di caratteristiche variabili in funzione dell'evento sismico grazie alla presenza di una fonte di energia esterna, di un sistema di acquisizione intelligente e di un sistema di elaborazione.

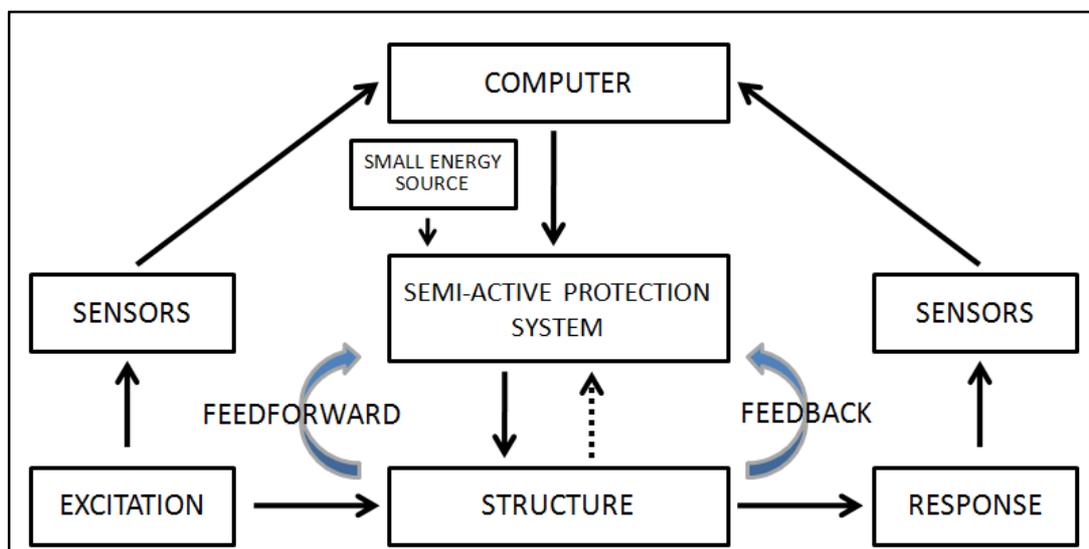


Figura 4.3 Principio di funzionamento del sistema di controllo semiattivo

I sistemi di controllo semiattivo sono dotati delle migliori caratteristiche dei sistemi di controllo sia passivo che attivo: infatti essi funzionano come dei sistemi passivi, ma i parametri che li caratterizzano sono modificabili in funzione dell'intensità dell'evento sismico, come per i sistemi di controllo attivo, consentendo così di ottenere

un'ottimizzazione della risposta strutturale. Inoltre non sono necessarie ingenti fonti di energia esterne. Alcuni dispositivi funzionano con le batterie, ovviando al critico problema relativo al black-out, che può essere decisamente plausibile durante un terremoto e che indurrebbe al non funzionamento del sistema. Inoltre un'altra qualità di questi sistemi è che in caso in cui non vi fosse apporto di energia per attivarli, comunque meccanicamente i dispositivi funzionerebbero come sistema passivo.

Nota quindi l'intensità dell'evento sismico in ingresso, fornita da un SEWS qualche secondo prima che esso si manifesti, è possibile calibrare degli algoritmi utilizzati poi per definire "ad hoc" le proprietà dei dispositivi attivi o semiattivi per quel particolare terremoto.

Le applicazioni di questa tecnologia sono in continua crescita in tutto il mondo: in Giappone, Taiwan, Messico, Romania, Turchia ed Italia. Tutti gli studi recenti sul SEWS, hanno dimostrato che una stima abbastanza attendibile dell'intensità del terremoto in arrivo è oggi possibile soprattutto attraverso due misure di intensità, l'accelerazione di picco al suolo (PGA) e la velocità di picco al suolo (PGV).

## 4.2 Gli strumenti di Misura

Attualmente esistono strumenti di misura quali sismografi, vibrometri e accelerometri che consentono di avere in tempo reale i diagrammi degli spostamenti, delle velocità e delle accelerazioni del terreno in un dato sito durante un certo evento sismico.

Di seguito è riportato il confronto tra i diagrammi di accelerazione, velocità e spostamento (Fig.4.4)

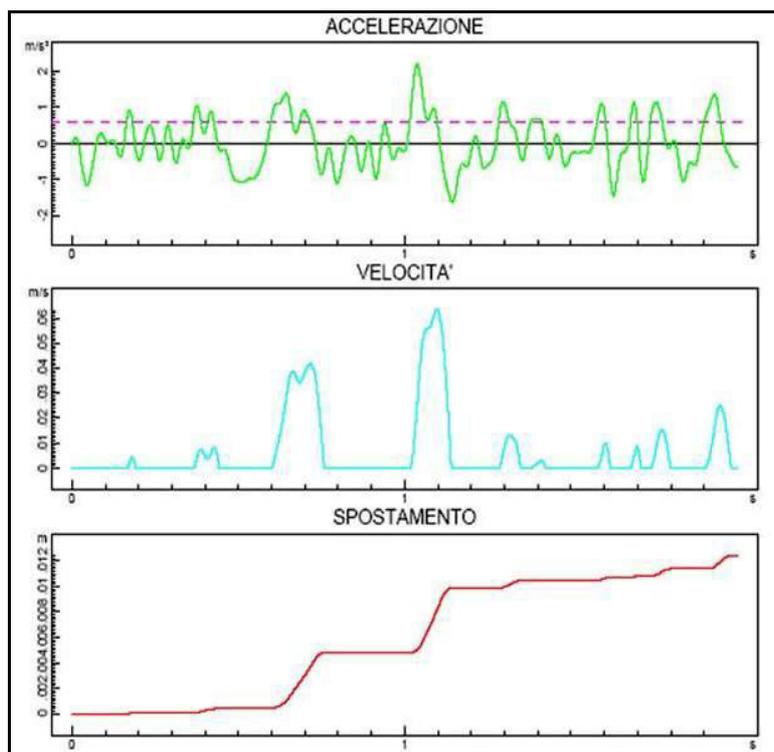


Figura 4.4: Diagrammi di accelerazione, velocità e spostamento

Per avere un quadro completo delle oscillazioni subite dal terreno, vengono in genere registrate le componenti del moto in tre direzioni ortogonali (una verticale e due orizzontali). In alcuni casi vengono registrate anche le tre componenti rotatorie attorno agli assi Nord-Sud, Est-Ovest e verticale.

Segue breve descrizione dei dispositivi enunciati.

- **SISMOGRAFI**

Lo schema di base del funzionamento dei sismografi è riportato nella seguente figura (Fig. 4.5). Si tratta di strumenti costituiti da una massa che è collegata attraverso una molla ed uno smorzatore ad un involucro rigido, solidale con il terreno. La massa è collegata anche ad un pennino che permette di registrare il segnale su un rullo rotante

con un sistema ad orologeria. Gli strumenti più moderni naturalmente hanno sistemi di registrazione ottici o elettrici ed i dati possono essere acquisiti in forma analogica o digitale. In base al range di frequenze in corrispondenza del quale il sismografo è utilizzato, il segnale registrato potrà essere lo spostamento (vibrometri) o l'accelerazione (accelerometri) del terreno.

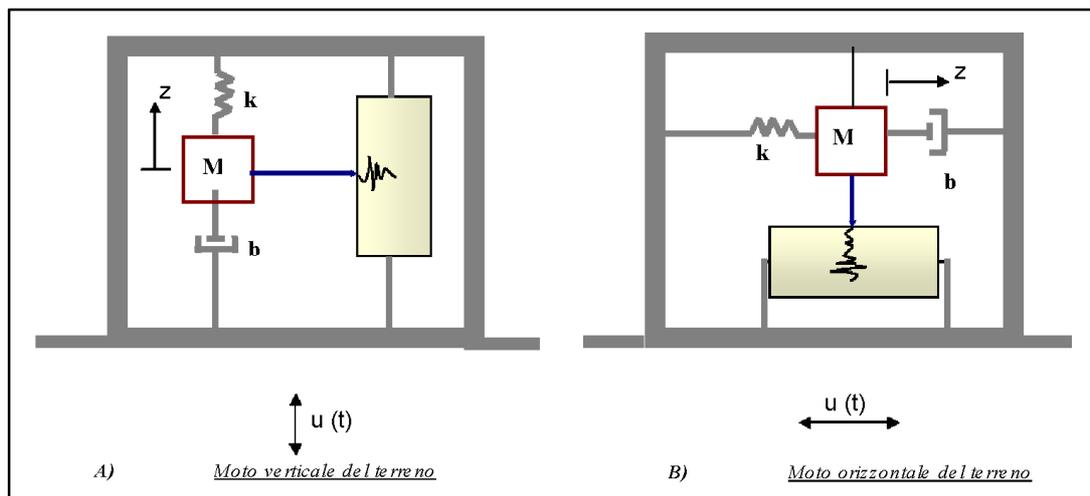


Figura 4.5: Schema di funzionamento di un sismografo per la misura delle oscillazioni del terreno in direzione verticale (A) e orizzontale (B)

- **VIBROMETRI**

Se il sismografo ha frequenza (o pulsazione) propria molto bassa, allora è in grado di misurare gli spostamenti del terreno e in questo caso svolge la funzione di vibrometro. Per avere pulsazione propria molto bassa, lo strumento deve avere bassa rigidezza e massa elevata. Poiché in genere i valori di rigidezza non possono essere troppo bassi per motivi funzionali, questi strumenti devono avere grosse masse e questo fatto costituisce uno dei maggiori svantaggi nell'utilizzazione pratica dei vibrometri (Fig. 4.6).

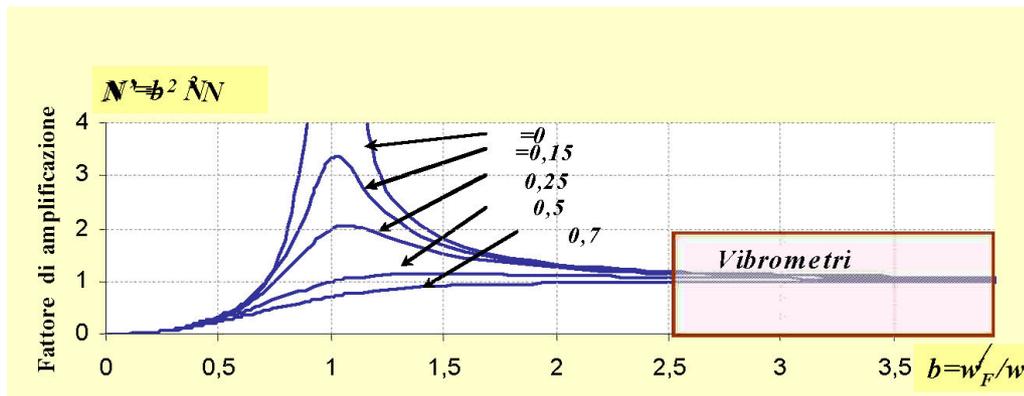


Figura 1.6: Curve di risonanza in  $N'$ . Zona di funzionamento dei sismometri come misuratori di spostamento

- **ACCELEROMETRI**

Se il sismografo ha frequenza (o pulsazione) propria molto alta, allora è in grado di misurare le accelerazioni del terreno e in questo svolge la funzione di accelerometro (Fig. 4.8). Per avere pulsazione propria molto alta, lo strumento deve avere rigidità elevata e massa molto piccola. Gli accelerometri, perciò, hanno dimensioni ridotte e sono quindi di più agevole utilizzo. Questi strumenti hanno in genere un fattore di smorzamento  $\alpha \gg 0.707$  che consente di mantenere il fattore  $N$  praticamente unitario per valori di  $w_F / w$  compresi tra 0 e 0.20 (Fig. 4.7).

Questo valore di smorzamento consente inoltre di eliminare anche problemi di distorsione di fase nel caso di segnali non armonici, come è appunto il terremoto.

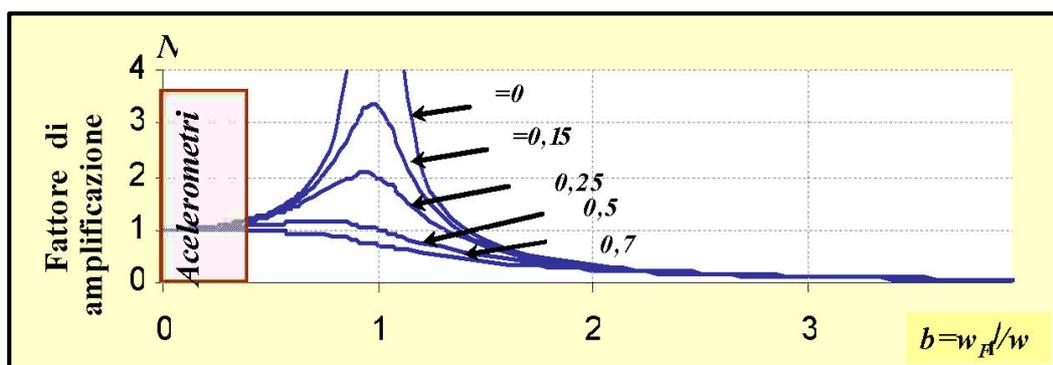


Figura 4.7: Curve di risonanza. Zona di funzionamento dei sismometri come misuratori di accelerazione



*Figura 4.8: Vari tipi di accelerometri*

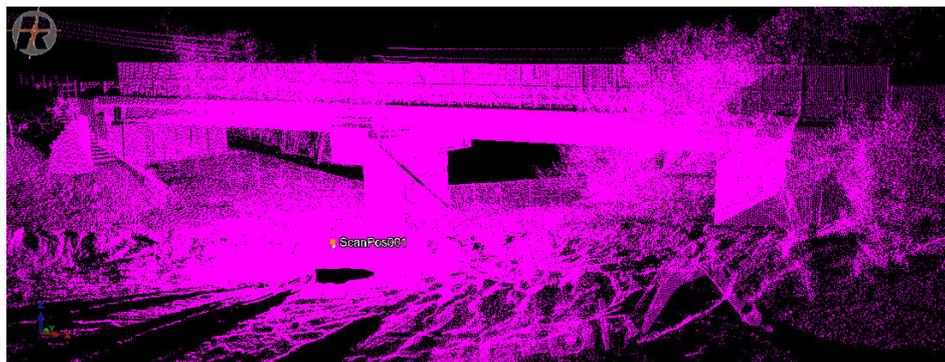
- **LASER SCANNER**

I laser scanner (Fig. 4.9 a,b) sono degli strumenti in grado di misurare ad altissima velocità la posizione di centinaia di migliaia di punti, i quali definiscono la superficie degli oggetti circostanti. Quello che si ottiene da questo rilievo è un insieme di punti molto denso che è definito “nuvola di punti”. Il laser scanner è quindi un sistema di misurazione diretta poiché permette di ottenere delle misurazioni correlate ad una precisione strumentale testimoniata da un certificato di calibrazione, che documenta ufficialmente i risultati della misura.

Oltre alle prestazioni legate alla capacità di acquisizione del laser scanner, ci sono altre caratteristiche determinanti che influiscono sulla logistica (facilità di trasporto, leggerezza, maneggevolezza della strumentazione), modalità operativa (soluzione stand-alone, semplicità, controllo diretto dello strumento) e tempistica (acquisizione rapida e ampio campo di ripresa).



*Figura 4.9a: Laser Scanner con sistema GPS*



*Figura 4.9b : Scansione totale 3D.*

### **4.3 Strumenti e metodologie: Cases History**

In questo Paragrafo verranno analizzati dei casi studi di ponti viari della Provincia di Cosenza. Si passerà dall' applicazione della tecnica geomatica nei rilievi di dettaglio, alle prove di caratterizzazione dinamica ed alle prove di caratterizzazione sismica tramite tecnica dei rapporti spettrali H/V.

I risultati hanno fornito un modello accurato della struttura utilizzabile nell'ambito di una strategia di analisi dinamica non lineare con sismi registrati o sintetici, necessaria per la corretta valutazione della performance strutturale dell'opera sotto azioni eccezionali. Il metodo si presta ad una standardizzazione procedurale necessaria per un impiego su larga scala e, viste le attuali disponibilità di calcolo e archiviazione, risulta possibile catalogare i dati delle prove sperimentali, il modello sviluppato nonché i risultati ottenuti in un database consultabile dagli Enti preposti in caso di eventi eccezionali allo scopo di valutare eventuali fenomeni di danneggiamento accumulato nella struttura.

Le opere viarie studiate sono:

- il Ponte Caprovini della SP n°26,
- il Ponte Fiume di mare della SP n°39
- il Ponte di Longobucco sul Trionto.

#### **4.3.1 Ponte Caprovini di Cetraro (CS)**

Il ponte oggetto di studio attraversa il fiume Aron in località S. Angelo-Caprovini del Comune di Cetraro (Fig. 4.10 a,b,c), in provincia di Cosenza. Esso è ubicato lungo la Strada Provinciale 26, al km 1+900, a circa 2,5 km in linea d'aria dal mar Tirreno e ad una quota di 130 m circa s.l.m.

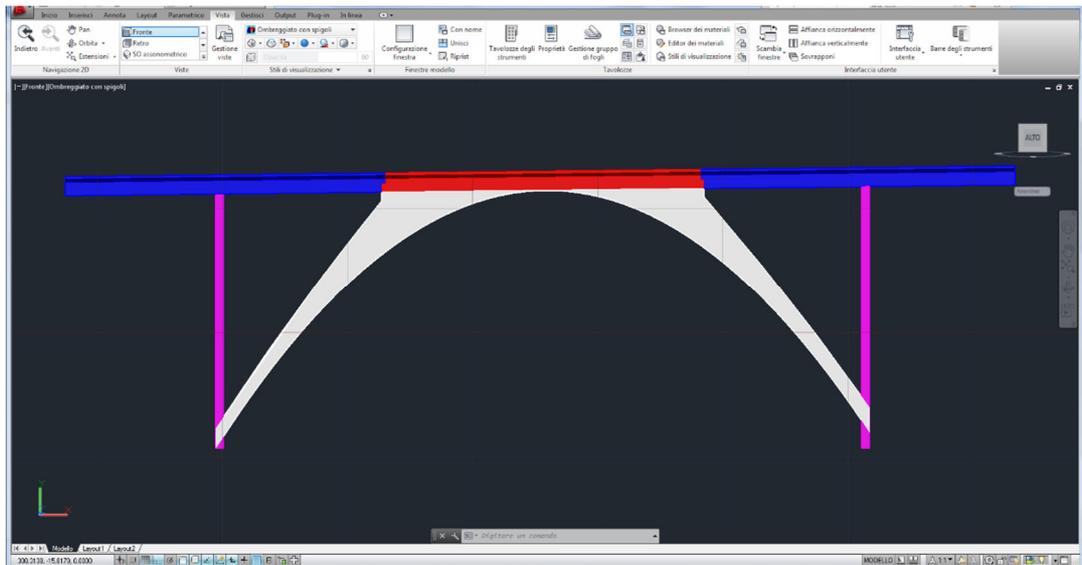
Il ponte, la cui costruzione risale agli anni '50 del secolo scorso, presenta una struttura a tre campate, realizzata in opera in cemento armato, simmetrica. La campata centrale poggia su doppia struttura ad andamento parabolico con travi irrigidenti. Le campate laterali, oltre ad essere giuntate alla struttura ad arco, poggiano su spalla in cemento armato ed in mezzeria su stampella in c.a. avente doppia colonna.

Da un punto di vista geometrico l'opera ha un lunghezza di 76 m circa per una larghezza di 7,40 m ed un'altezza dal suolo di circa 25 m. La struttura portante è quindi costituita da due travate principali poste ad un interasse di 4,70 m. Su tali travate è

realizzata la soletta che ospita la carreggiata stradale; quest'ultima si compone anche di sbalzi laterali di 0,95 m in corrispondenza dei quali è stato realizzato un marciapiede di altezza 0,10 m. Le travi principali sono inoltre collegate da traversi, posti con un passo di circa 4 m, al fine di aumentare la rigidezza torsionale dell'impalcato.



*Figura 4.10 Ponte Caprovini – Cetraro – Cosenza. 39°31'11.37"N; 15°58'0.53"E*



*Figura 4.10 a) Vista frontale del 3D in cad del Ponte Caprovini*

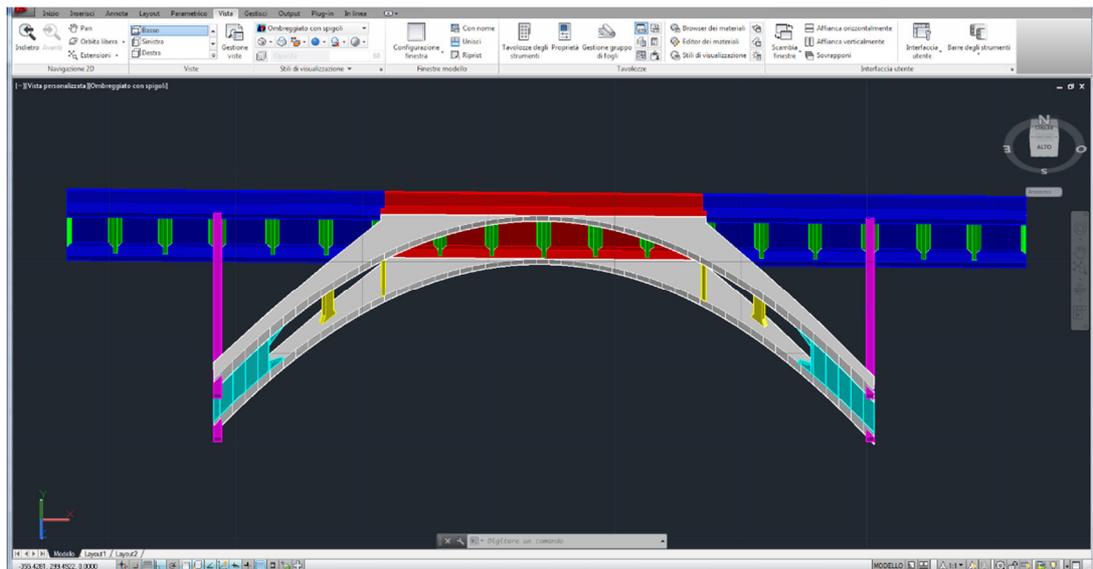


Figura 4.10b : Vista dal basso del 3D in cad del Ponte Caprovini

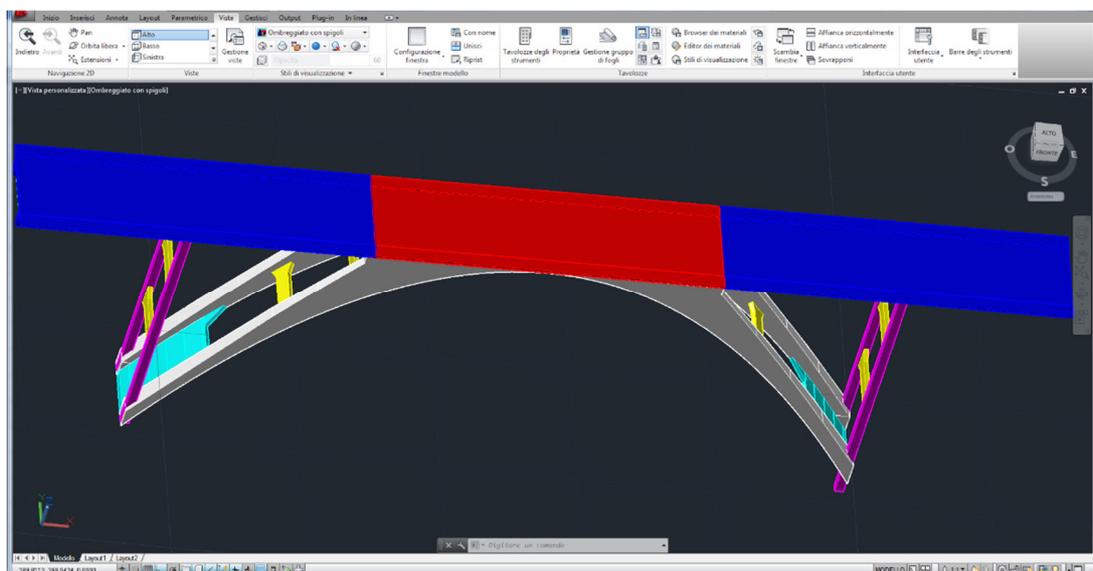
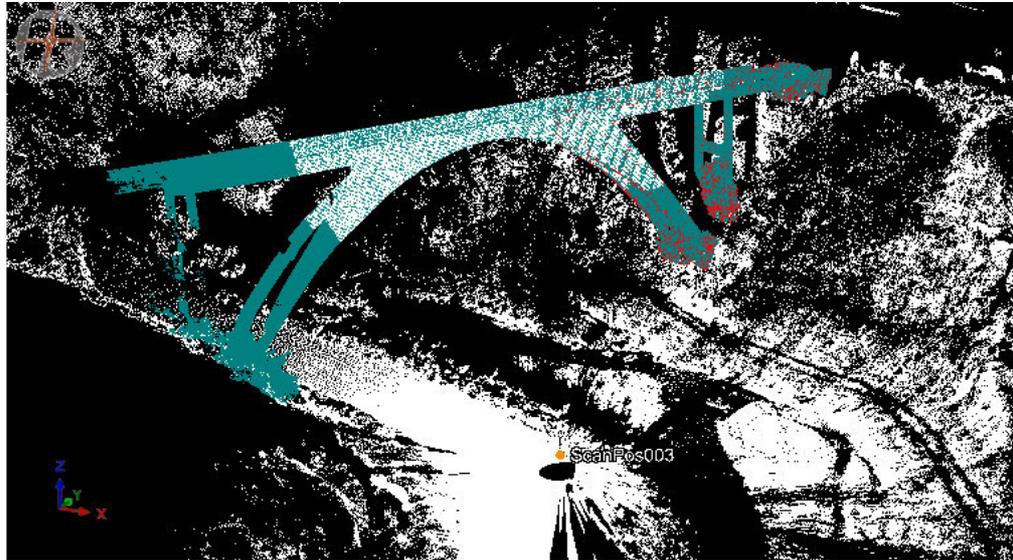


Figura 4.10c: Vista dall'alto del 3D in cad del Ponte Caprovini

### ➤ Prove per caratterizzazione dinamica del Ponte Caprovini

La modellazione FEM è stata effettuata con l'obiettivo di definire un modello meccanico in grado di descrivere con un sufficiente grado di accuratezza il comportamento dinamico del ponte, ovvero di determinare le frequenze naturali e i corrispondenti modi di vibrare. Sono stati utilizzati elementi finiti di tipo shell che richiedono la definizione dello spessore e del materiale. In particolare, la modellazione è stata eseguita con il codice di calcolo sviluppato nell'ambito del progetto e validato per confronto con due altri solutori commerciali a disposizione dello SmartLab UNICAL: MIDAS GEN e ABAQUS, codici FEM orientati all'analisi strutturale.

Per la caratterizzazione geometrica si è utilizzata la tecnologia laser scanner (Fig 4.11 a,b), con fotocamera integrata, così da acquisire grandi quantità di dati, sia geometrici che fotografici, in tempi contenuti.



*Figura 4.11 a) Unione delle scansioni in 3D del Ponte Caprovini – Acquisizione con Laser Scanner RIEGL VZ 1000*



*Figura 4.11 b) Particolare in 3D del Ponte Caprovini*

E' stato utilizzato un laser scanner modello RIEGL VZ 1000, avente la caratteristica di “Acquisizione della forma d’onda dell’impulso di ritorno”. Tale caratteristica permette di discriminare il terreno o un manufatto dalla vegetazione che lo ricopre. L’elaborazione dei dati è stata poi eseguita con i software RiscanPro ® e Geomagic ®. Le indagini in loco e le misure di dettaglio, infine, hanno consentito di integrare i risultati del rilievo con laser scanner e di mettere a punto il modello geometrico in maniera più precisa.

Il modello iniziale è stato poi trasformato in modello ad elementi finiti (FEM) ed analizzato tramite il software di analisi strutturale Abaqus (ABAQUS, 2014), che tramite procedure automatiche importa il modello grafico vettorializzato e lo converte in una mesh di elementi finiti (in questo caso elementi tetraedrici a 4 nodi solidi con solo 3 gradi di libertà per nodo).

I risultati dei calcoli strutturali eseguiti sul modello agli elementi finiti sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite misurazioni in situ ottenute posizionando sull'opera dei trasduttori di accelerazione unidirezionali, disposti in modo adeguato, di tipo piezo-elettrico con sensibilità pari a 10 V/g. Tali sensori hanno consentito di individuare i modi di vibrare reali della struttura sottoposta a rumori ambientali e sollecitazioni non controllate (FDD).

Le tecniche comunemente utilizzate per l'analisi dinamica delle strutture si possono distinguere in base al dominio in cui esse operano, sia esso del tempo o della frequenza; nel presente lavoro si farà riferimento alle ultime, generalmente meno onerose dal punto di vista computazionale.

In particolare, si farà riferimento al cosiddetto metodo FDD (Frequency Domain Decomposition), metodo che opera nel dominio delle frequenze; la tecnica prevede, innanzitutto, di calcolare la Densità Spettrale di Potenza dei dati misurati

$$G_{yy}(j\omega) = Y(j\omega) \cdot Y^H(j\omega) \quad , \quad G_{yy}(j\omega) \in C^{n_y \times n_y} \quad (1)$$

dove  $Y(j\omega)$  è la trasformata di Fourier del segnale. Valutando la funzione in corrispondenza di un qualsiasi valore  $\omega_i$ , se ne può effettuare una scomposizione ai valori singolari:

$$G_{yy}(j\omega_i) = U_i \cdot S_i \cdot U_i^T \quad (2)$$

dove  $U_i \in C^{n_x \times n_x}$  è una matrice unitaria le cui colonne corrispondono ai vettori singolari,

mentre  $S_i \in C^{n_x \times n_y}$  è una matrice diagonale su cui stanno i valori singolari associati (in corrispondenza della frequenza scelta), tutti positivi e ordinati in maniera decrescente. In corrispondenza dei picchi corrispondenti alle frequenze naturali della struttura, la scomposizione può essere approssimata come:

$$G_{yy}(j\omega_i) = s_i \cdot |\phi_i|^2 \quad (3)$$

in pratica l'unico contributo alla risposta della struttura in corrispondenza della frequenza  $\omega_i$  è dato dalla forma modale associata alla frequenza stessa. Non è detto che tutti i picchi della funzione  $G_{yy}(\omega)$  siano legati a frequenze naturali, ma potrebbero anche dipendere da disturbi presenti sul segnale; a tal proposito, per chiarire se una

frequenza di picco  $\omega_i$  sia una frequenza naturale, si va ad analizzare la correlazione tra la forma modale associata,  $\phi_i$ , e le forme modali associate a valori di frequenza nell'intorno della frequenza di picco. Come criterio di analisi si utilizza il MAC (Modal Assurance Criterion), con cui si valuta la correlazione tra due diverse forme modali; l'indice utilizzato ha la seguente forma:

$$MAC(\varphi_a \cdot \varphi_b) = \frac{|\varphi_a^T \cdot \varphi_b|}{|\varphi_a| \cdot |\varphi_b|} \quad (4)$$

Quindi, data una frequenza di picco  $\omega_i$  e la relativa forma modale  $\phi_i$ , si può dire che  $\omega_i$  è una frequenza naturale solo se il MAC tra  $\phi_i$  e le forme modali associate a valori di frequenza nell'intorno di  $\omega_i$  è sufficientemente elevato. Utilizzando una versione estesa del metodo, chiamata EFDD, Enhanced Frequency Domain Decomposition, è possibile ricavare una stima del coefficiente di smorzamento associato ad una forma modale, trasformando nel dominio del tempo il vettore singolare associato ad una frequenza naturale e applicando il metodo del decremento logaritmico.

La valutazione della resistenza e delle performance strutturali in caso di azioni eccezionali per strutture strategiche dovrebbe essere effettuata utilizzando tecniche di previsione e modellazione avanzate; nel caso specifico richiederebbe una accurata descrizione sia del modello FEM che dell'azione sismica a cui sottoporlo.

Per questo, le caratteristiche del materiale, delle condizioni di vincolo ed altri aspetti della modellazione sono state ottimizzate tramite una procedura di fitting dei parametri (Model Updating) che ha consentito di ottenere un modello lineare accurato e rispondente alla caratterizzazione sperimentale descritta in seguito.

In particolare, sono state effettuate prove in vibrazione ambientale sotto l'azione del vento, prove in vibrazione forzata con carico viaggiante, prove di arresto impulsivo del carico viaggiante e prove di carico impulsivo causato dall'impatto del veicolo su dossi realizzati con tavole di legno.

#### ➤ **Configurazioni della strumentazione sperimentale del Ponte Caprovini**

Al fine di registrare la risposta nel maggior numero di punti possibili per pervenire ad una migliore identificazione della risposta dinamica, viste le dimensioni del manufatto, sono state necessarie 2 configurazioni distinte per la collocazione degli strumenti, nel seguito denominate A e B (Fig. 4.12).

La predisposizione dell'apparato sperimentale (accelerometri, cavi ed unità di controllo) e la realizzazione delle prove si è svolta secondo le seguenti fasi:

- tracciamento segnaletica orizzontale;
- Collocazione accelerometri nella configurazione A, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- Collocazione accelerometri nella configurazione B, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- Recupero delle attrezzature.

Nella configurazione di prova A sono stati collocati 8 stazioni di misura, 6 accelerometri in direzione orizzontale (trasversale al ponte) nei punti 1-2-3-5-6-7, e 2 nelle direzioni verticali nei punti 4-11, per un totale di 8 accelerometri. Tale configurazione ha consentito la misurazione prevalentemente del grado di libertà orizzontale (trasversale) nonché la determinazione degli eventuali spostamenti nella direzione verticale.

Nella configurazione di prova B sono stati collocati 8 stazioni di misura, 6 accelerometri in direzione verticale nei punti 1-4-7-8-11-14, e 2 nelle direzioni orizzontali (trasversali al ponte) nei punti 2-6, per un totale di 8 accelerometri. Tale configurazione ha consentito la misurazione prevalentemente del grado di libertà verticale nonché la determinazione degli eventuali spostamenti nella direzione orizzontale (trasversale).

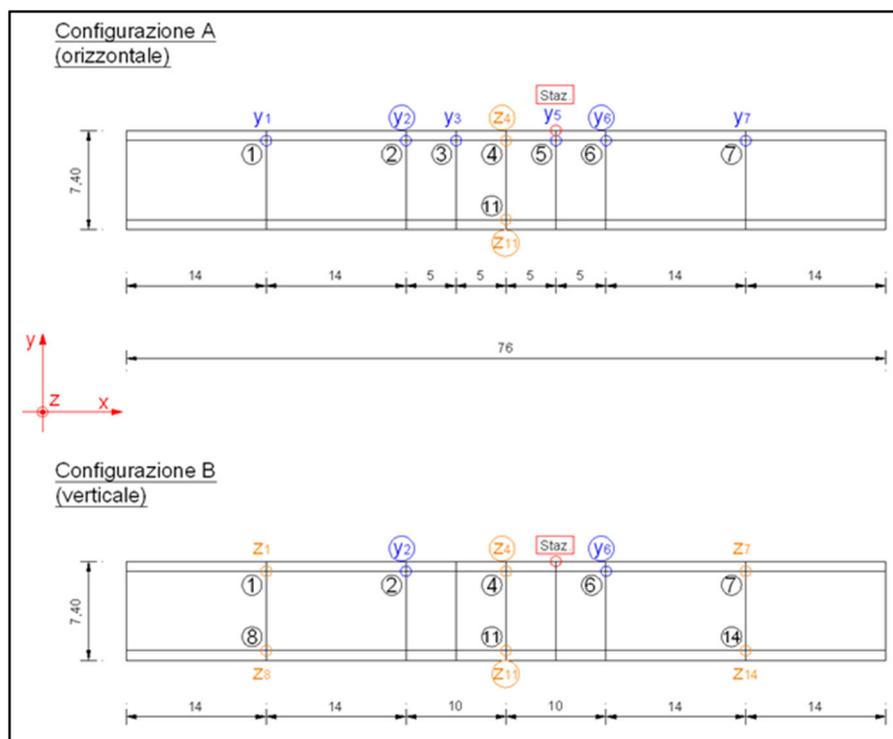


Figura 4.12: Schema delle due configurazioni

Le prove effettuate in ambo le configurazioni comprendono dunque, il rumore bianco (vento) e le vibrazioni indotte da traffico, eseguite percorrendo il ponte sia da destra che da sinistra con le seguenti modalità:

- Transitto lento;
- Transitto veloce;
- Transitto lento & transitto lento con frenata (arresto impulsivo);
- Transitto veloce & transitto veloce con frenata (arresto impulsivo);
- Transitto lento & transitto a zig-zag;
- Transitto veloce & transitto a zig-zag;
- Transitto lento & transitto lento su dossi;
- Transitto veloce & transitto lento su dossi.

Sulla base dei risultati relativi ai test effettuati secondo la prima configurazione (sensori disposti prevalentemente in orizzontale trasversalmente al ponte) presentati nelle seguenti tabelle si considera identificato con buona attendibilità il modo alla frequenza  $f_{11}= 2.39$  hZ, con coefficiente di smorzamento pari al 2%, mentre una maggiore incertezza è presente sul secondo modo, identificato in corrispondenza della frequenza  $f_{21}=6.09$  hZ.

Lo stesso modo di vibrare è stato identificato nei test relativi alla seconda configurazione (sensori posti prevalentemente in direzione verticale perpendicolarmente al ponte), alla frequenza  $f_{22}=6.18$  hZ con un coefficiente di smorzamento di poco inferiore all'1%.

Frequency	Mode 1	Mode 2	Damping	Mode 1	Mode 2
Test 1	2.41	5.74	Test 1	0.03	0.01
Test 2	2.41	5.77	Test 2	0.02	0.009
Test 3	2.42	6.22	Test 3	0.003	0.002
Test 4	2.44		Test 4	0.05	
Test 5	2.41	6.16	Test 5	0.02	0.007
Test 6	2.32	6.47	Test 6	0.04	0.02
Test 7	2.38	6.29	Test 7	0.02	0.008
Test 8	2.38	6.23	Test 8	0.04	0.02
Test 9	2.32	6.23	Test 9	0.02	0.008
Test 10	2.41	5.71	Test 10	0.01	0.006
Test 11	2.40		Test 11	0.004	
mean	2.39	6.09	mean	0.02	0.01
variance	0.001	0.06	variance	$2.08 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-5}$

Tabella 1: Frequenze e coefficienti di smorzamento della configurazione A

Frequency	Mode 2	Damping	Mode 2
Test 1		Test 1	
Test 2		Test 2	
Test 3	6.25	Test 3	$5.87 \times 10^{-4}$
Test 4	6.23	Test 4	0.01
Test 5	2.23	Test 5	0.01
Test 6	6.03	Test 6	0.002
mean	6.18	mean	0.007
variance	0.008	variance	$3.55 \times 10^{-5}$

Tabella 2: Frequenze e coefficienti di smorzamento della configurazione B

Le frequenze e le forme modali sperimentali (Fig. 4.13 – 4.14) sono state confrontate con quelle previste dal modello analitico (FEM). Preliminarmente è stata fatta una verifica considerando solo i valori di frequenza e, una volta appurata la correlazione tra queste, sono state confrontate le forme modali.

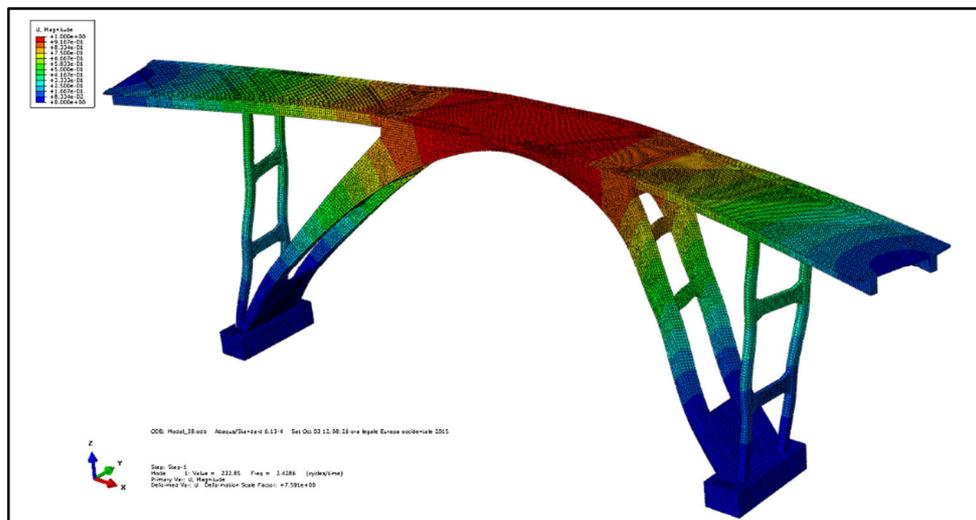


Figura 4.13: Forma modale (modo 1) con frequenza 2.4286 Hz.

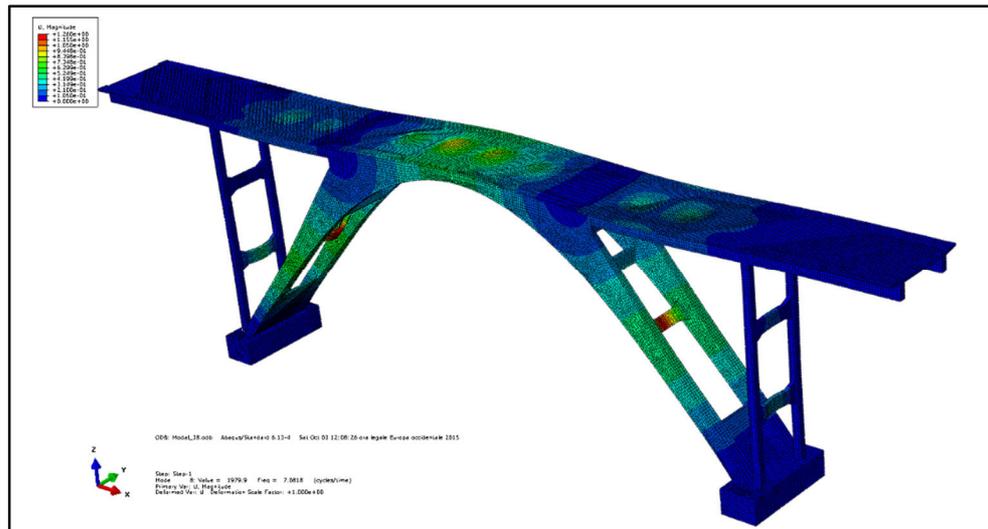


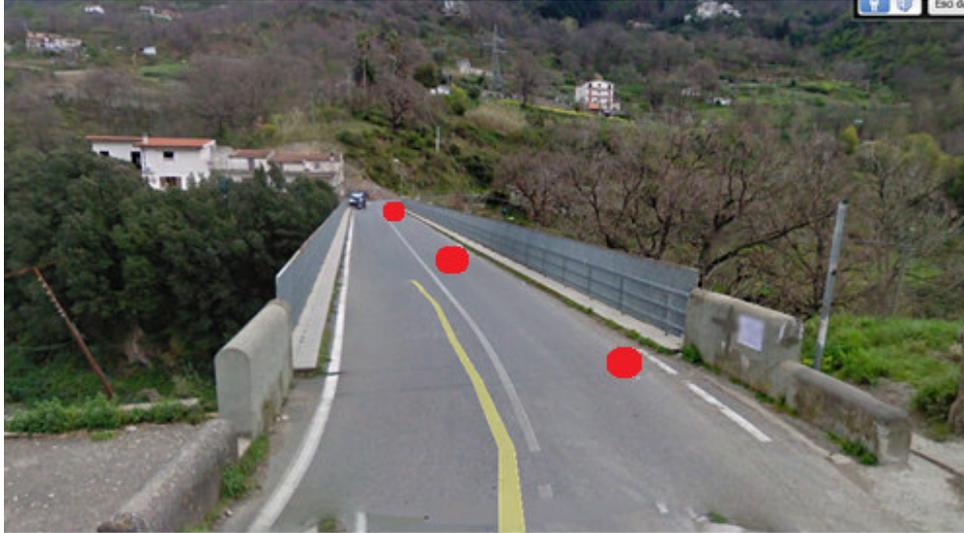
Figura 4.14: Forma modale (modo 2) con frequenza 7.0818 Hz.

TEST	FREQUENZA FEM	FREQUENZA FDD	SCOSTAMENTO
1	2.43	2.39	0.04
2	7.08	6.09	0.99

Tabella 3: Confronto forme modali del Ponte Caprovini

### ➤ Prove rapporto spettrale H/V sul Ponte Caprovini, con tromografo sperimentale

Le strutture sono oscillatori complessi che vibrano con la massima ampiezza solo a specifiche frequenze denominate frequenze proprie, autofrequenze o frequenze di risonanza. Il riconoscimento di queste frequenze è di importanza centrale nell'ingegneria e nella geotecnica sismica. Poiché le strutture vibrano principalmente a queste frequenze non solo in presenza di terremoto ma anche in condizioni di eccitazione da tremore ambientale, tali frequenze possono essere misurate anche nelle condizioni operative quotidiane delle strutture. La prassi è di posizionare sulla struttura uno o più strumenti di tipo velocimetrico o accelerometrico e di registrare le serie temporali  $f(t)$  per alcuni minuti. Da queste, strumenti matematici come la trasformata di Fourier permettono di scomporre la serie  $f(t)$  in una somma di armoniche elementari. Per la caratterizzazione dinamica del Ponte Caprovini, si è utilizzato, anche il tromografo sperimentale. Sono state fatte 3 misure: 2 sulle rispettive spalle ed una sulla zona di mezzeria (Fig. 4.15)



*Figura 4.15 Ubicazione Sondaggi HVSR*

Data, località e posizione: 10/07/2015 – Località Sinni – Cetraro (CS)

Condizioni meteo esterne: presenza di vento proveniente da Nord-Ovest

Assi considerati: X, Y, Z;

Acquisitore USB: Theremino – SmartLab – Acquisitore con un solo gain.

Frequenza propria dei 3 geofoni: 4.5 Hz.

Frequenza di campionamento: 500 Hz

Obiettivo: valutazione delle frequenze proprie di vibrazione di un ponte.

Software acquisizione: Dolfrang ver. 4.3; Theremino HAL ver. 5.2

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

Quota:  $\pm 10.000$ m. Direzione: asse y verso Nord

Nota: Presenza di vento sul ponte.

Durata dell'acquisizione: 20 minuti

Numero di dati: 600.000,  $\Delta t$  0.002 secondi.

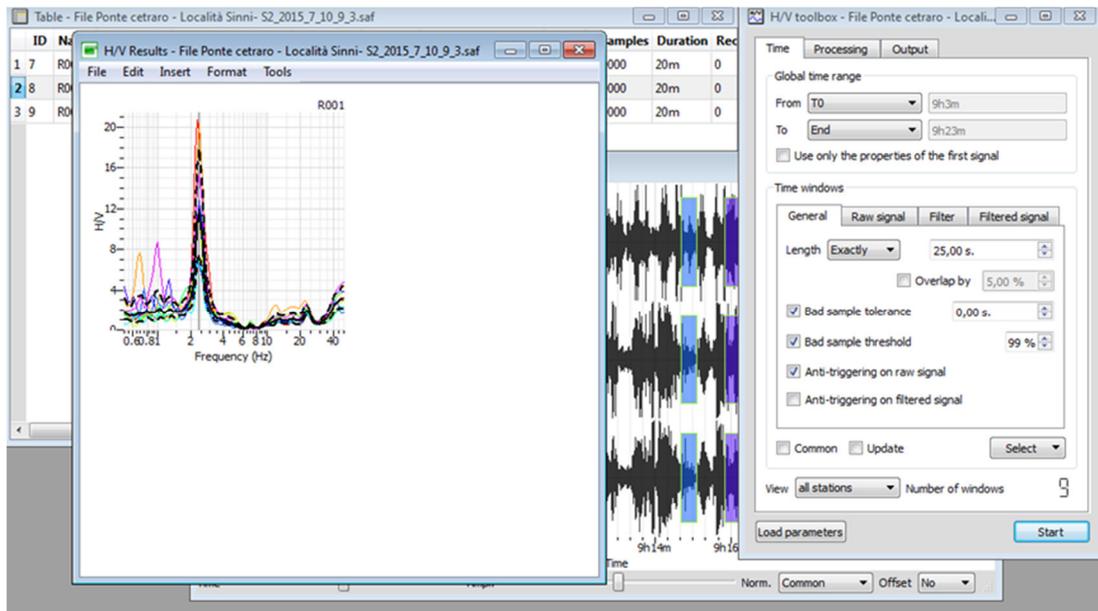


Figura 4.16: Risultati del rapporto H/V con evidenza del picco frequenza di risonanza a 2,5 Hz.

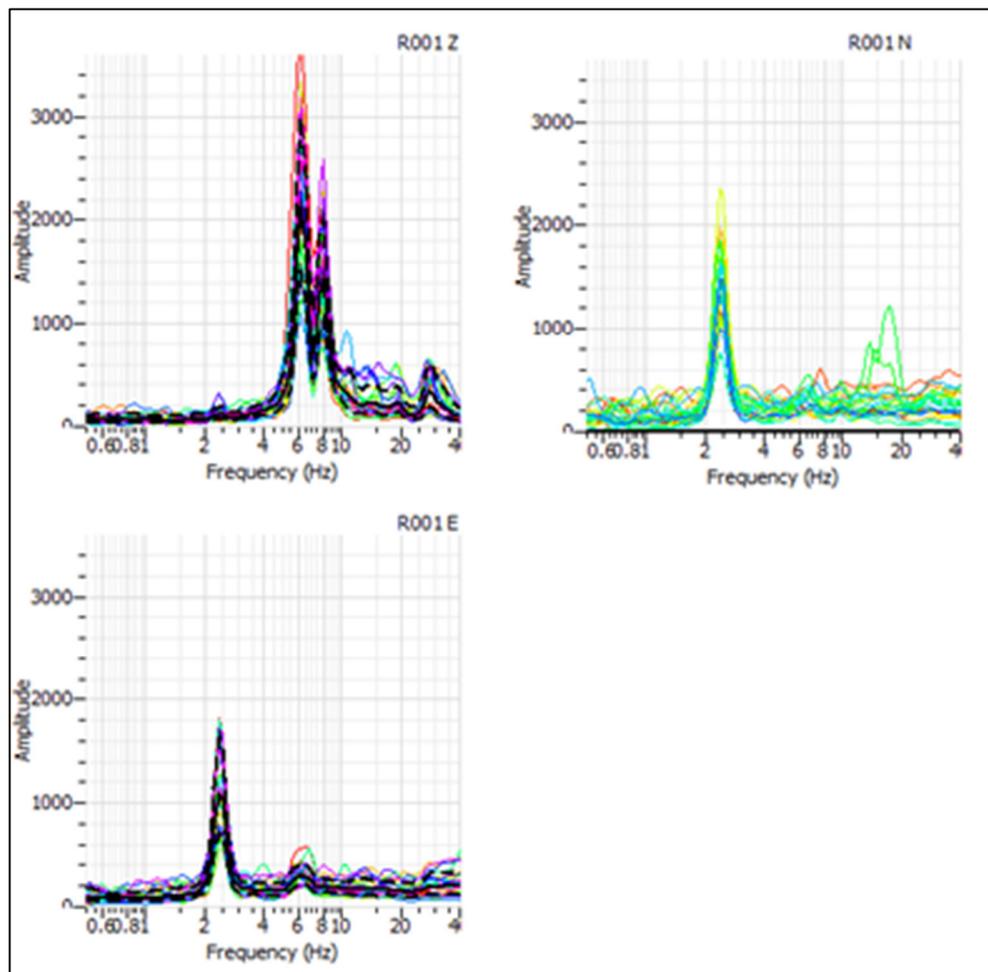
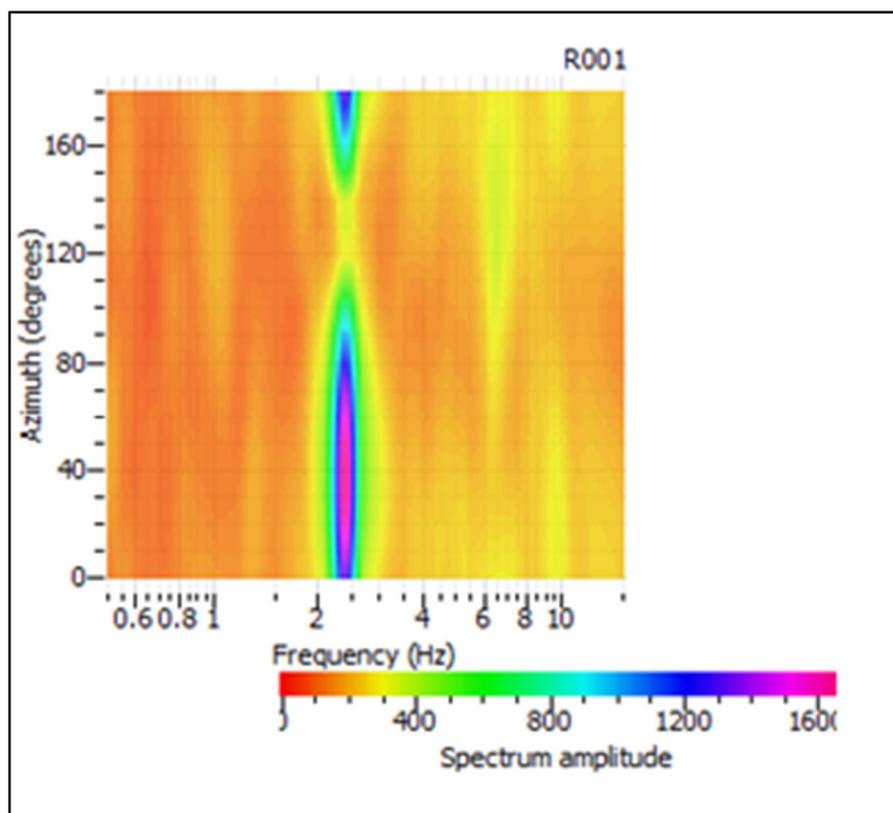


Figura 4.17 Spettri delle componenti X Y e Z. Queste sono presenti sia in corrispondenza delle spalle sia lungo l'asse centrale.



*Figura 4.18: Frequenze in funzione dell'ampiezza e Spettro orizzontale H/V. In figura si può notare il picco di risonanza a 2,4 Hz.*

L'elaborazione è stata effettuata con: lunghezze delle finestre da 20s a 50s; overlap 5%; bad sample threshold 99%; anti-triggering on raw signal.

Durante l'esecuzione della prova, la costante presenza di vento ha mandato in saturazione il segnale acquisito con evidenza di frequenze tipiche per rumore da vento. Tuttavia, fatti i vari filtraggi, in particolare filtro passa-bassa, si è riusciti ad isolare il rumore prodotto dal vento e l'acquisizione, così ottenuta, mette in evidenza dei buoni spettri di segnale da poter analizzare. L'ampiezza spettrale (Fig. 4.16) della componente trasversale a 2.4 Hz è massima al centro del ponte e decresce spostandosi verso le spalle. Il primo modo di vibrare trasversale del ponte coincide in frequenza col primo modo verticale (entrambi a 2.4 Hz).

La frequenza di oscillazione del ponte, ottenuta dai rapporti H/V, confrontando i dati delle 3 misurazioni (Fig. 4.17), si attesta intorno ai 2,4 Hz. Ciò significa che, in caso di terremoto, le componenti sismiche che verranno amplificate sul totale di quelle generate dal terremoto saranno quelle da 2,5 ÷ 3 Hz che verranno amplificate di un fattore pari a circa 3,5 volte. Le altre frequenze sono risultate elevate rispetto ai termini di quelle generate da un terremoto e quindi influenti in caso di sisma. Analizzando gli spettri delle componenti X Y e Z (Fig. 4.18, ovvero l'asse Nord, Est e Verticale, si

trova un picco a circa 7,1 Hz, mentre le altre due componenti hanno una frequenza di circa 2,5 Hz. I risultati ottenuti, con i rapporti H/V sono in netta correlazione con i risultati dati dall'analisi FEM ed FFD. Da ciò si deduce, che lo strumento sperimentale, realizzato durante questo lavoro di tesi, presso lo SmartLab, ha risposto bene all'acquisizione dati

#### **4.3.2 Ponte Fiume di Mare (Fiumefreddo Bruzio – Cosenza)**

Il ponte Fiume di Mare è ubicato al Km 5+900 della Strada Provinciale n°39 (Fig. 4.19) nel Comune di Fiumefreddo Bruzio. È un'opera di nuova costruzione ad una sola campata costituita da travi in c.a.p. gravanti su spalle con pali in c.a. Il ponte si inserisce in un vecchio tracciato stradale di cui restano alcune parti d'opera quali degli speroni ed un muro di contenimento entrambi in pietra.



*Figura 4.19 Vista ponte Fiume di Mare Fiumefreddo Bruzio. 39°14'25.55"N; 16°3'49.24"E.*

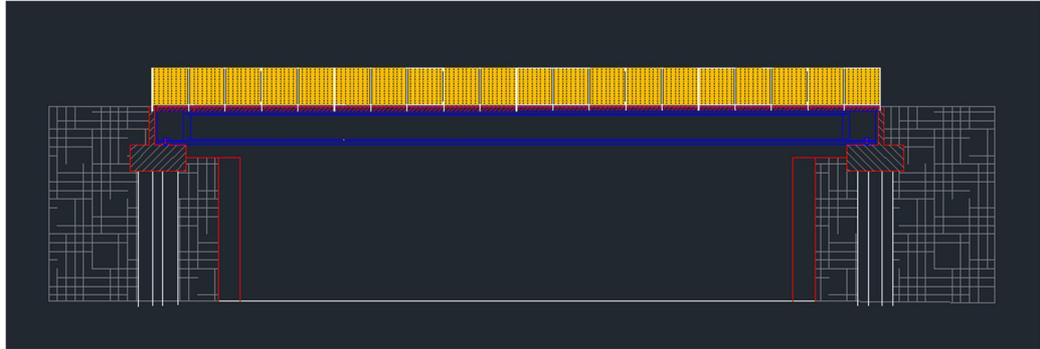


Figura 4.20: Sezione longitudinale del Ponte Fiume di mare

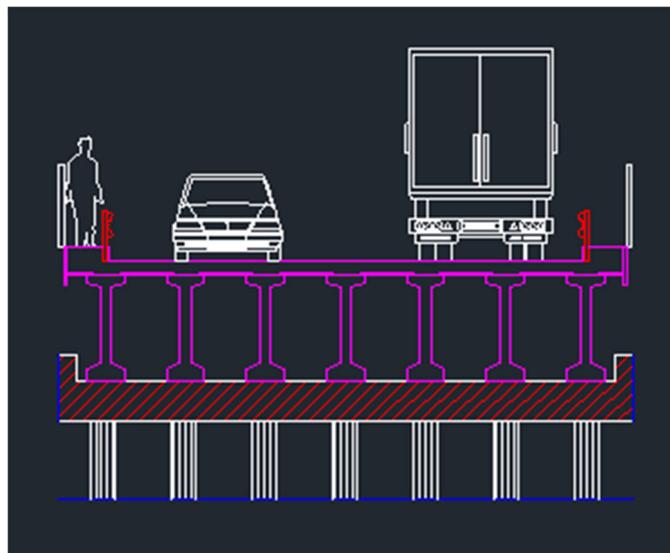


Figura 4.21: Sezione trasversale del Ponte Fiume di mare

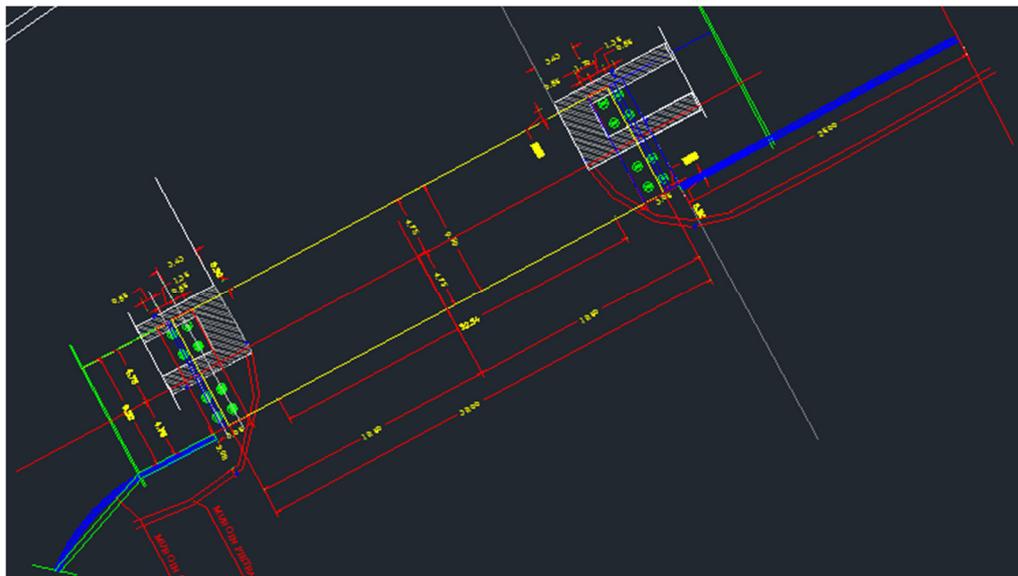


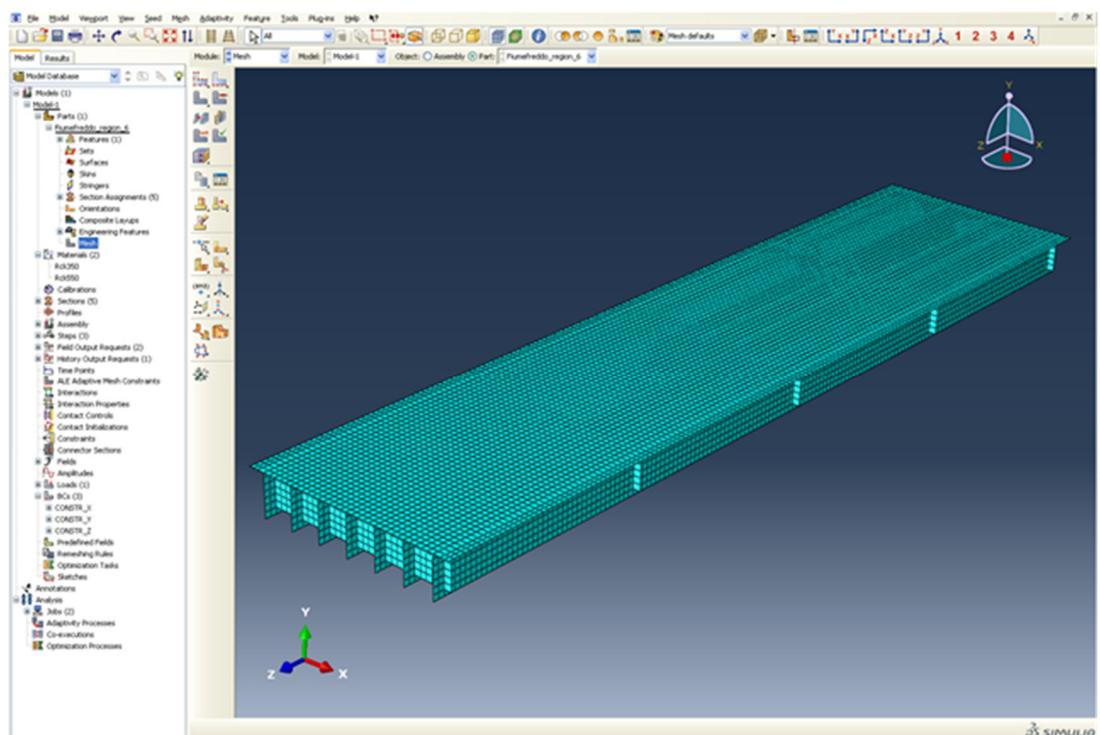
Figura 4.22: Schema del Ponte Fiume di mare

➤ **Prove per caratterizzazione dinamica del Ponte Fiume di Mare**

La modellazione FEM è stata effettuata con l'obiettivo di definire un modello meccanico in grado di descrivere con un sufficiente grado di accuratezza il comportamento dinamico del ponte, ovvero di determinare le frequenze naturali e i corrispondenti modi di vibrare. Sono stati utilizzati elementi finiti di tipo shell che richiedono la definizione dello spessore e del materiale. In particolare, la modellazione è stata eseguita con il codice di calcolo sviluppato nell'ambito del progetto e validato per confronto con due altri solutori commerciali a disposizione dello SmartLab UNICAL: MIDAS GEN e ABAQUS, codici FEM orientati all'analisi strutturale.

Per la caratterizzazione geometrica sono stati utilizzati i file CAD disponibili, elaborati e convertiti in opportuno formato adatto per essere sottoposto al solutore.

Il modello iniziale è stato quindi trasformato in modello ad elementi finiti (FEM) ed analizzato tramite il software di analisi strutturale Abaqus (ABAQUS, 2014), che tramite procedure automatiche importa il modello grafico vettorializzato e lo converte in una mesh di elementi finiti (in questo caso elementi tetraedrici a 4 nodi solidi con solo 3 gradi di libertà per nodo) [Fig. 4.23].



*Figura 4.23: Modello FEM in Abaqus*

I risultati dei calcoli strutturali eseguiti sul modello agli elementi finiti sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite misurazioni in situ ottenute posizionando sull'opera dei trasduttori di accelerazione unidirezionali, disposti in modo adeguato, di

tipo piezo-elettrico con sensibilità pari a 10 V/g. Tali sensori hanno consentito di individuare i modi di vibrare reali della struttura sottoposta a rumori ambientali e sollecitazioni non controllate (FDD).

Il calcolo dei modi di vibrare della struttura è stato effettuato con il metodo di Lanczos. Di seguito sono riportate le prime tre forme modali, la prima torsionale (Fig. 4.24), le altre due flessionali (Fig. 4.25).

I rispettivi valori di frequenza sono:

- per il 1° modo 3,71 Hz
- per il 2° 4,14 Hz
- per il 3° 11,17 Hz.

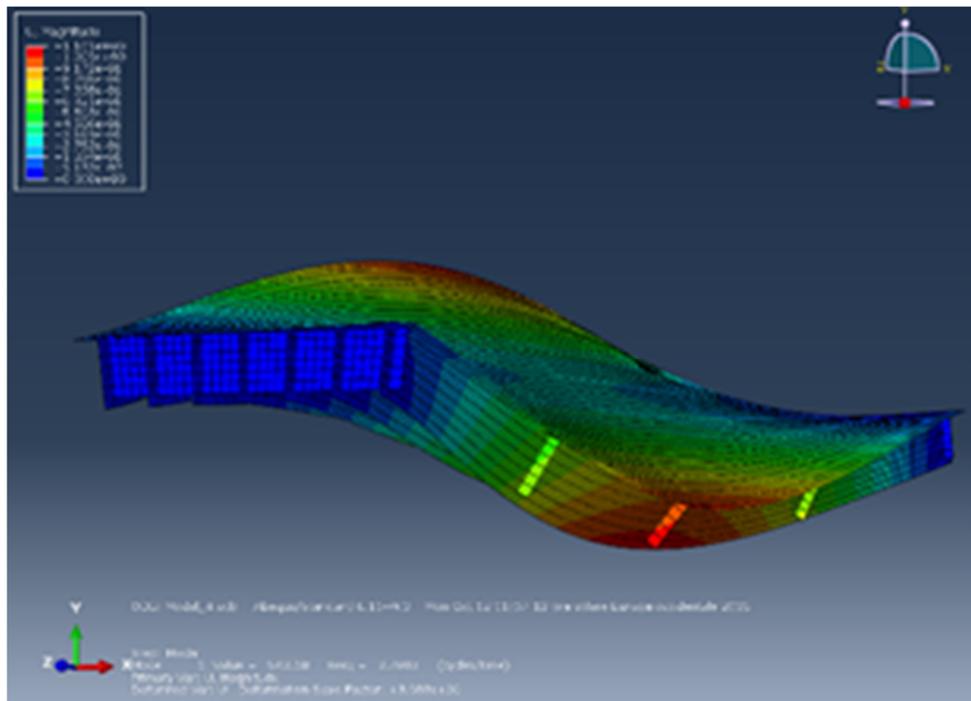


Figura 4.24: Forma modale torsionale della modellazione FEM

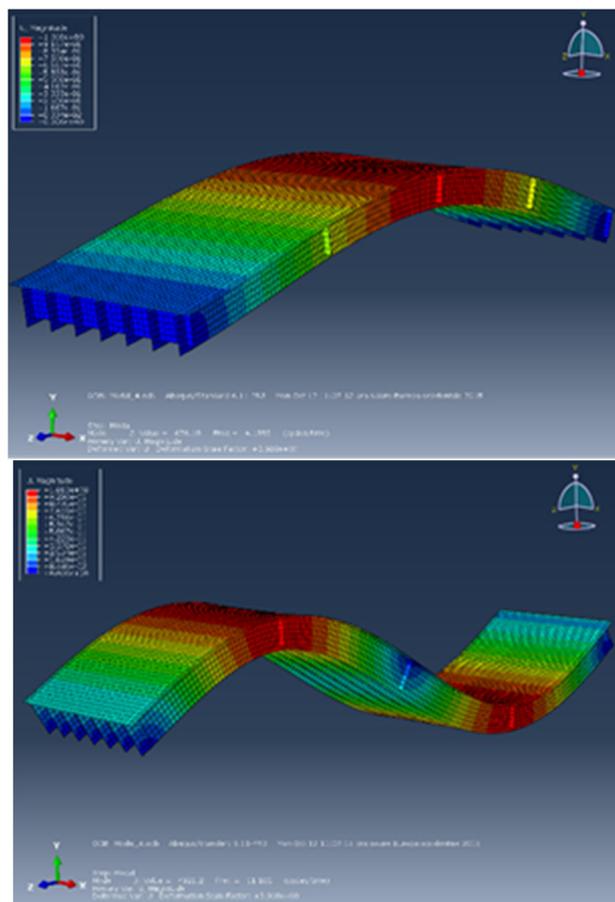


Figura 4.25: Forme modali flessionali della modellazione FEM

La valutazione della resistenza e delle performance strutturali in caso di azioni eccezionali per strutture strategiche dovrebbe essere effettuata utilizzando tecniche di previsione e modellazione avanzate; nel caso specifico richiederebbe una accurata descrizione sia del modello FEM che dell'azione sismica a cui sottoporlo. Per questo, le caratteristiche del materiale, delle condizioni di vincolo ed altri aspetti della modellazione sono state ottimizzate tramite una procedura di fitting dei parametri (Model Updating) che ha consentito di ottenere un modello lineare accurato e rispondente alla caratterizzazione sperimentale.

Configurazioni della strumentazione sperimentale del Ponte Fiume di Mare

Al fine di registrare la risposta nel maggior numero di punti possibili per pervenire ad una migliore identificazione della risposta dinamica, sono state necessarie 3 configurazioni distinte per la collocazione degli strumenti, nel seguito denominate A, B e C.

Sul ponte in oggetto sono state effettuate prove in vibrazione ambientale sotto l'azione del vento, prove in vibrazione forzata con carico viaggiante, prove di arresto impulsivo del carico viaggiante e prove di carico impulsivo causato dall'impatto del veicolo su dossi realizzati con tavole di legno. La predisposizione dell'apparato sperimentale

(accelerometri, cavi ed unità di controllo) e la realizzazione delle prove si è svolta secondo le seguenti fasi:

- tracciamento segnaletica orizzontale;
- collocazione accelerometri nella configurazione A, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- collocazione accelerometri nella configurazione B, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- collocazione accelerometri nella configurazione C, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- recupero delle attrezzature.

Nella configurazione di prova A sono stati collocati 5 stazioni di misura, 5 accelerometri in direzione orizzontale (trasversale al ponte) nei punti 0-1-2-3-4 tutti sullo stesso lato del ponte; tale configurazione ha consentito la misurazione prevalentemente del grado di libertà orizzontale (trasversale).

La configurazione di prova B è simile alla A solo che gli accelerometri sono stati posizionati tutti in direzione verticali; tale configurazione ha consentito la misurazione del grado di libertà verticale.

Nella configurazione di prova C sono stati collocati sempre 5 stazioni di misura, 5 accelerometri tutti in direzione verticale, 3 nei punti 0-1-2 e gli altri 2 nei punti 3-4 in posizione opposta ai primi; tale configurazione ha consentito di indagare prevalentemente il modo di vibrare torsionale (Fig. 4.26).

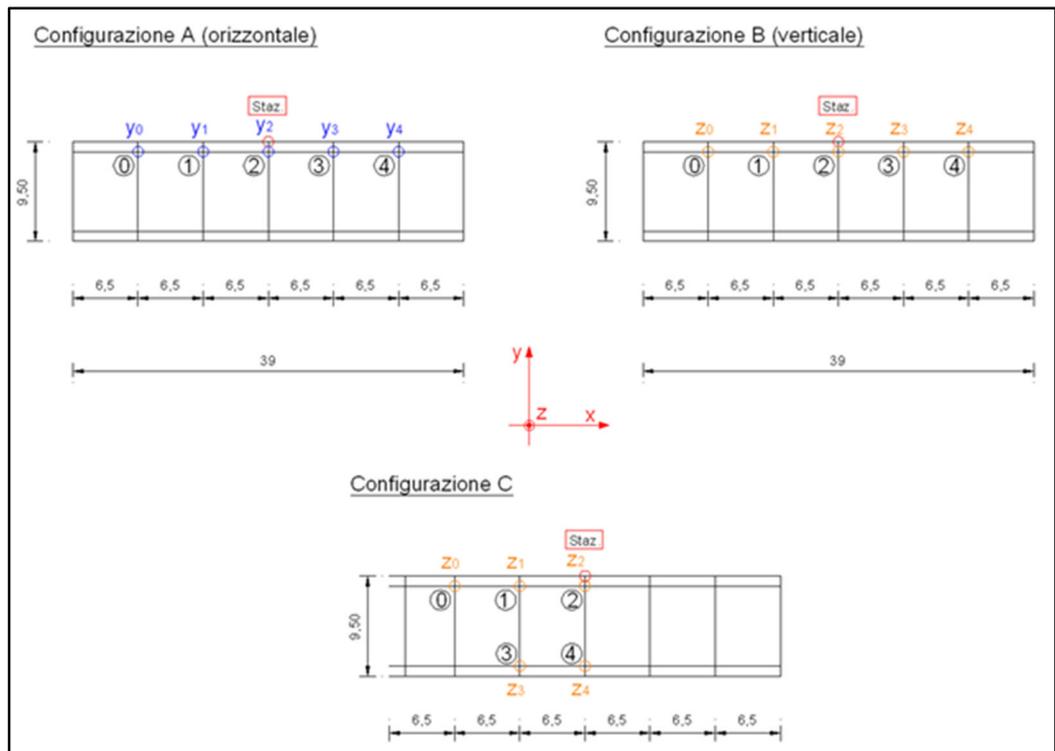


Figura 4.26: Schema delle tre configurazioni

Le prove effettuate in tutte le configurazioni comprendono dunque, il rumore bianco (vento) e le vibrazioni indotte da traffico, eseguite percorrendo il ponte sia da destra che da sinistra con le seguenti modalità:

- Transito lento;
- Transito veloce;
- Transito lento & transito lento con frenata (arresto impulsivo);
- Transito veloce & transito veloce con frenata (arresto impulsivo);
- Transito lento & transito a zig-zag;
- Transito veloce & transito a zig-zag;
- Transito lento & transito lento su dossi;
- Transito veloce & transito lento su dossi.

Le registrazioni accelerometriche raccolte sono state elaborate utilizzando la trasformata di Fourier ottenendo così i cross-spettri relativi ai test effettuati, dopo aver filtrato i dati con un filtro passa basso con adeguata frequenza di taglio, a tale scopo è stato utilizzato il codice Matlab “Data-driven”.

Dall’analisi dei dati sperimentali si sono potuti individuare i primi tre modi di vibrare. In particolare, il 1° modo con frequenza pari a 3,66 Hz, il 2° modo con frequenza compresa tra 4 e 4,5 Hz, il 3° con frequenza 11,23 Hz. Per il secondo modo non è stato

possibile individuare un valore preciso della frequenza, evidentemente le configurazioni realizzate e le modalità delle prove effettuate non hanno attivato in maniera univoca tale modo di vibrare.

Nella seguente figura è mostrato un diagramma FFT (Fig.4.27) relativo ad una delle prove effettuate. In esso si può notare come il secondo picco di frequenza relativo alla seconda forma modale non è ben definito ed oscilla tra 4 e 4,5.

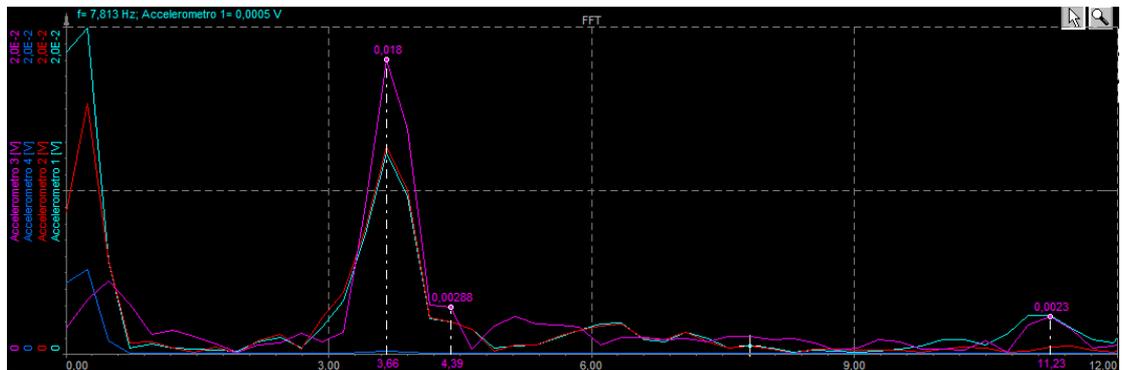


Figura 4.27: Diagramma FFT dati.

TEST	FREQUENZA FEM	FREQUENZA FDD	SCOSTAMENTO
1	3.71	3.66	0.05
2	4.14	4÷4.5	0.14÷0.36
3	11.17	11.23	0.06

Tabella 4: Confronto forme modali del Ponte Fiume di Mare

➤ **Prove rapporto spettrale H/V sul Ponte Fiume di Mare, con tromografo sperimentale.**

Per la caratterizzazione dinamica del Ponte Fiume di Mare si è utilizzato anche il tromografo sperimentale (Fig. 4.29). Sono state fatte 3 misure, come per il caso precedente: 2 sulle rispettive spalle ed una sulla zona di mezzeria (Fig. 4.28).



*Figura 4.28: Ubicazione Sondaggi HVSR.*



*Figura 4.29: Particolare strumento in acquisizione.*

Data, località e posizione: 23/07/2015 – Località Fiume di Mare – Fiumefreddo Bruzio (CS)

Condizioni meteo esterne: brezza leggera proveniente da Est.

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

Acquisitore USB: Theremino – SmartLab – Acquisitore con un solo gain.

Frequenza propria dei 3 geofoni: 4.5 Hz.

Frequenza di campionamento: 333 Hz

Obiettivo: valutazione delle frequenze proprie di vibrazione di un ponte.

Software acquisizione: Dolfrang ver. 4.3; Theremino HAL ver. 5.2

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

L'acquisizione è avvenuta sul ponte in corrispondenza della campata centrale, e sulle rispettive spalle.

Quota:  $\pm 9.000$ m. Direzione: asse y verso Nord

Durata dell'acquisizione: 20 minuti

Numero di dati: 400.000,  $\Delta t$  0.003 secondi.

L'elaborazione è stata effettuata con: lunghezza delle finestre da 20s a 50s; overlap 5%; bad sample threshold 99%; anti-triggering on raw signal.

Durante l'esecuzione della prova, il vento era assente. L'acquisizione così ottenuta, mette in evidenza, dei buoni spettri di segnale da poter analizzare.

La frequenza di oscillazione del ponte, ottenuta dai rapporti H/V, si attesta intorno ai 10,5 (Fig 4.30). Hz. Ciò significa che, in caso di terremoto, le componenti sismiche che verranno amplificate sul totale di quelle generate dal terremoto saranno quelle da  $9,5 \div 10,5$  Hz che verranno amplificate di un fattore pari a circa 9 volte. Le altre frequenze sono elevate rispetto ai termini di quelle generate da un terremoto e quindi sono ininfluenti in caso di sisma (*Magarò F, Zinno R. 2015*).

Accostare gli spettri dello spostamento permette di comprendere la deformazione spaziale che la struttura subisce ad una particolare frequenza. È importante sottolineare che la deformazione complessiva (cioè quella che realmente si verifica) della struttura sarà data dalla somma dei vari modi deformativi, ciascuno alla propria frequenza, a cui essa è sottoposta.

1° E 2° MODO DI OSCILLARE: TRASVERSALE e VERTICALE a 4,4 HZ (Fig. 4.31). Il modulo della deformata ottenuta dall'involuppo dei massimi spettrali mostra che l'ampiezza di tale moto aumenta progressivamente allontanandosi dalla mezzeria fino ad un massimo collocato circa a 2/3 dell'impalcato e termina con valori prossimi

allo zero sulla spalla. Le componenti verticali del moto, subiscono una brusca diminuzione, dalle misure esterne a quelle interne. Questo fenomeno può essere giustificato da un movimento torsionale del ponte.

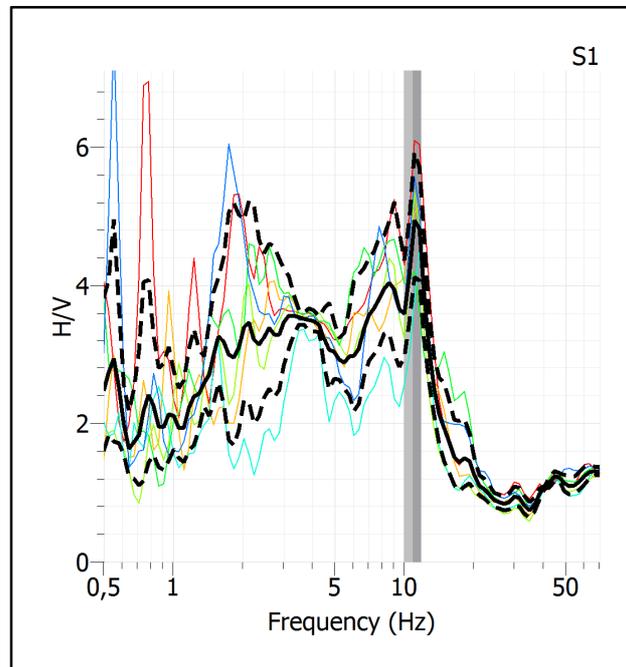


Figura 4.30: Rapporto spettrale H/V, con picco di frequenza a 10,5 HZ

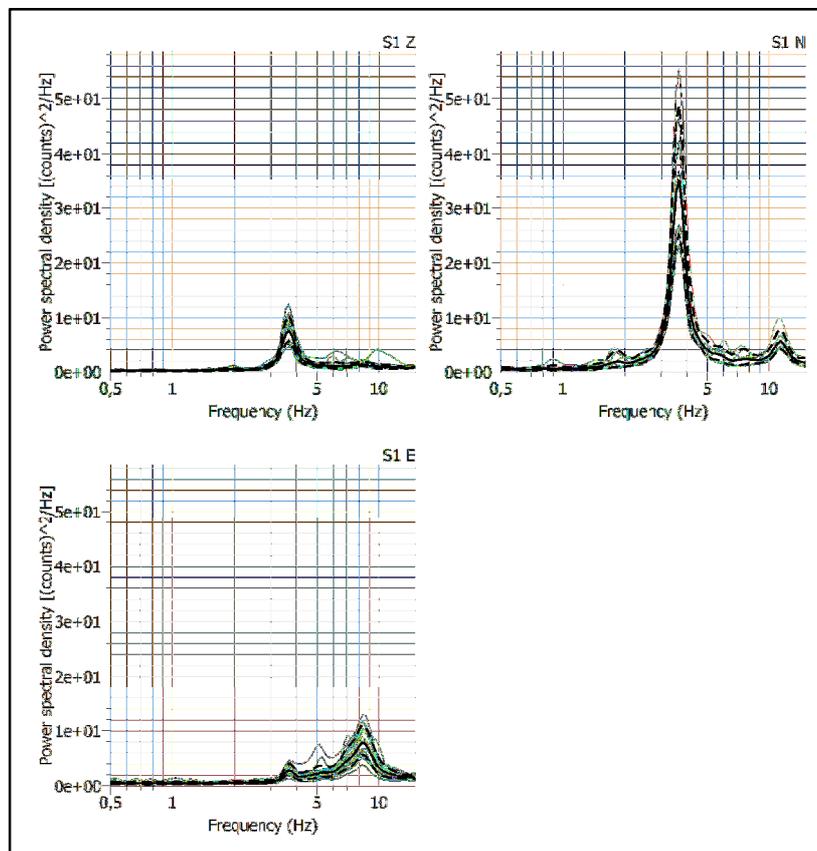


Figura 4.31: Componenti rapporto H/V Assi X, Y e Z. Le frequenze si assestano circa sui 4 Hz. Quindi la componente trasversale e verticale si equivalgono.

Anche da questa analisi, è emerso un netto riscontro dei dati ottenuti con il tromografo sperimentale, con dati ottenuti dagli accelerometri.

### 4.3.3 Prove per caratterizzazione dinamica del Ponte di Longobucco - Cosenza

Il ponte oggetto di studio realizza l'attraversamento sopra la lunga gola del fiume Trionto, che dalle montagne della Sila, nella provincia di Cosenza, scorre verso oriente sino a sfociare nel Mar Ionio dopo un percorso di circa 40 km (Fig. 4.32)

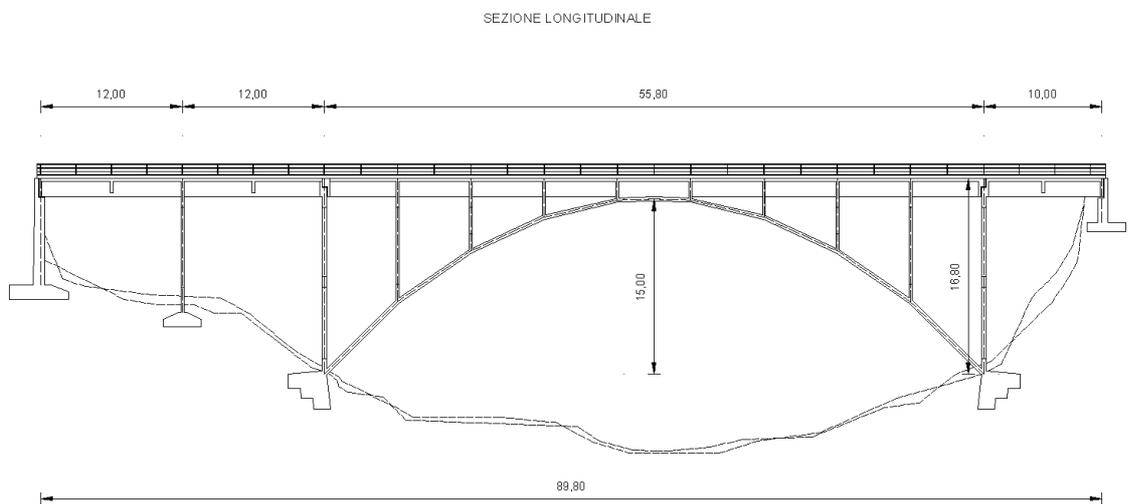


*Figura 4.32: Vista da valle verso monte*

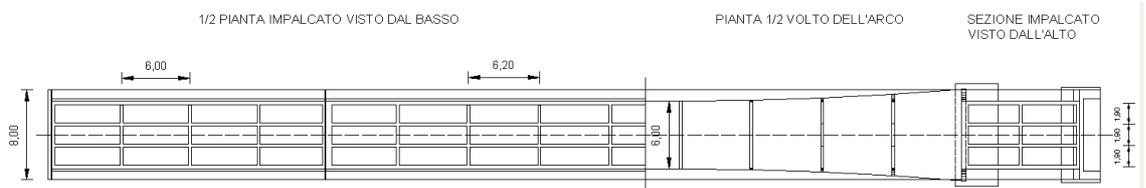
Esso è situato nel Comune di Longobucco (CS), lungo la strada che collega la frazione Ortiano dello stesso Comune alla S.S. 177. La sua struttura ad arco è completamente in cemento armato, copre una luce di circa 90 metri e raggiunge un'altezza massima, nella parte centrale, di circa 20 m.

Il progetto, realizzato dallo studio d'ingegneria del Prof.Ing. A. Martinelli di Roma, risale al 1968, mentre la direzione dei lavori fu affidata all'Ing. Luigi Naccarato e l'esecuzione dell'opera all'Impresa Ugo Coia di Trebisacce (CS).

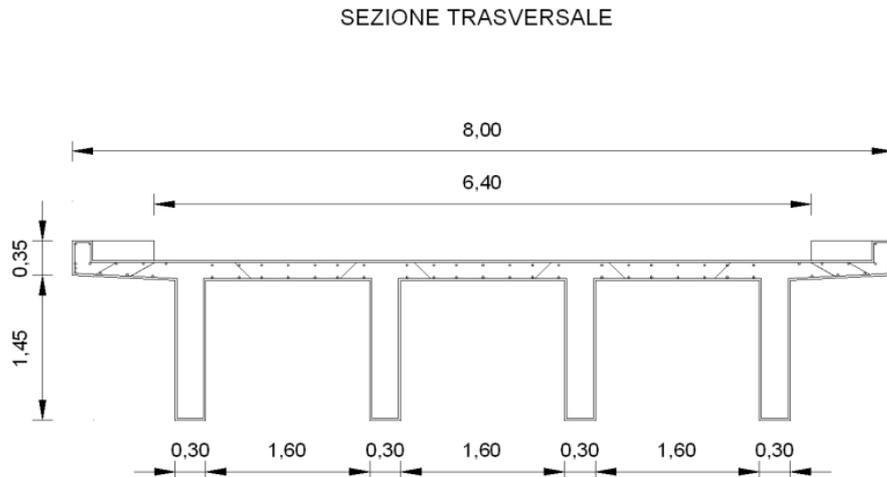
Da un punto di vista geometrico (Fig. 4.33) l'opera è costituita da una parte centrale, in corrispondenza dell'arco, di 55,80 m, e tre laterali di cui una di 10 m nella parte di destra (guardando da monte verso valle) e due di 12 m nella parte di sinistra. La struttura portante è quindi costituita da due spalle e 14 setti (Fig. 4.34), su cui sono impostate le quattro travate principali poste ad un interasse di 1,90 m. Su tali travate è realizzata la soletta che ospita la carreggiata stradale; quest'ultima si compone anche di sbalzi laterali di 0,80 m in corrispondenza dei quali è stato realizzato un marciapiede di altezza 0,20 m. Sono presenti solo due giunti di discontinuità della pavimentazione stradale posti in corrispondenza dei setti all'estremità della parte centrale ad arco. Le travi principali sono inoltre collegate da traversi, posti con un passo tipico di circa 6 m, al fine di aumentare la rigidità torsionale dell'impalcato.



*Figura 4.33: Sezione longitudinale*



*Figura 4.34: Pianta ponte ad Arco. Longobucco.*



*Figura 4.35: Sezione trasversale*

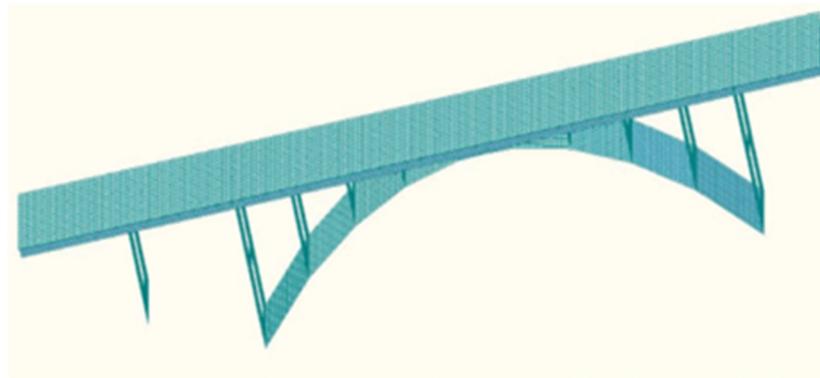
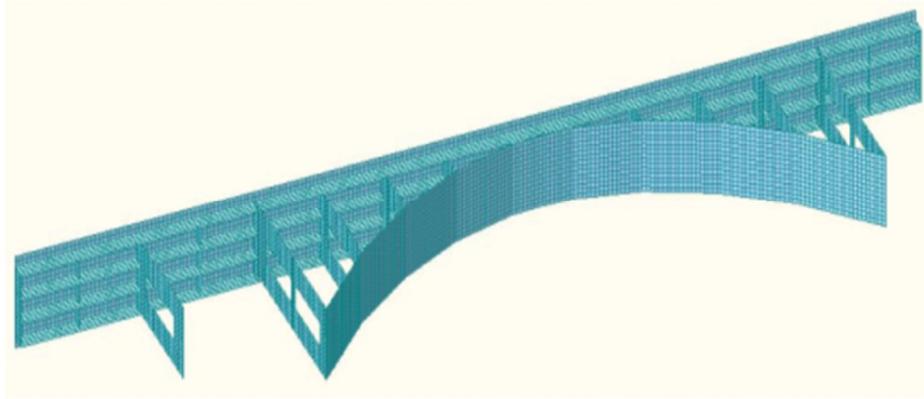


*Figura 4.36: Vista dal basso ponte ad arco.*

### ➤ Studio del comportamento dinamico con FEM

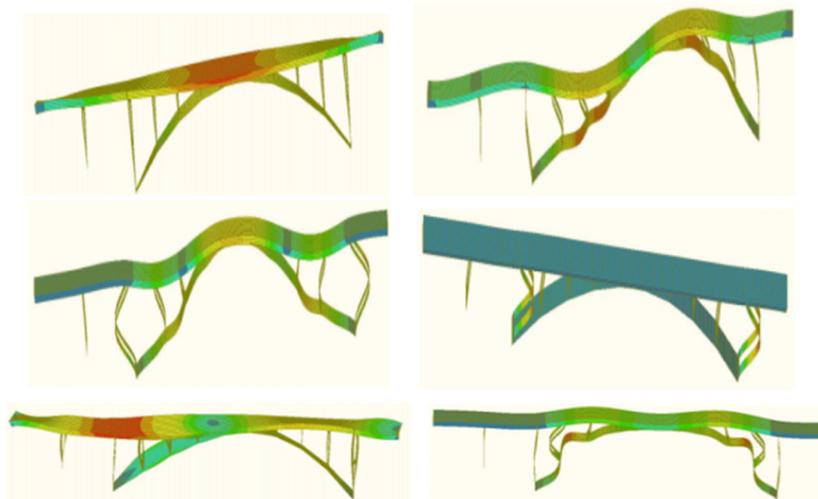
La modellazione FEM (Fig. 4.37) è stata effettuata con l'obiettivo di definire un modello meccanico in grado di descrivere con un sufficiente grado di accuratezza il comportamento dinamico del ponte, ovvero di determinare le frequenze naturali e i corrispondenti modi di vibrare. Sono stati utilizzati elementi finiti di tipo shell che richiedono la definizione dello spessore e del materiale. In particolare, la modellazione è stata eseguita con il codice di calcolo sviluppato nell'ambito del progetto e validato per confronto con due altri solutori commerciali a disposizione dello SmartLab UNICAL: MIDAS GEN e ABAQUS, codici FEM orientati all'analisi strutturale.

Per la caratterizzazione geometrica sono state utilizzate le carpenterie di progetto disponibili, digitalizzate in formato CAD e convertite in formato mesh adatto per essere sottoposto al solutore.



*Figura 4.37: Modello FEM*

Il calcolo dei modi di vibrare della struttura è stato effettuato con il metodo di Lanczos. Di seguito sono riportate alcune delle forme modali (Fig. 4.38).



*Figura 4.38: Forme modali della modellazione FEM*

La valutazione della resistenza e delle performance strutturali in caso di azioni eccezionali per strutture strategiche dovrebbe essere effettuata utilizzando tecniche di previsione e modellazione avanzate; nel caso specifico richiederebbe una accurata descrizione sia del modello FEM che dell'azione sismica a cui sottoporlo.

Per questo, le caratteristiche del materiale, delle condizioni di vincolo ed altri aspetti della modellazione sono state ottimizzate tramite una procedura di fitting dei parametri (Model Updating) che ha consentito di ottenere un modello lineare accurato

L'apparecchiatura di prova è costituita da trasduttori di accelerazione (Fig. 4.39), dai condizionatori di segnale, dal sistema di acquisizione dati e dal sistema di alimentazione. Gli 8 trasduttori di accelerazione utilizzati sono di tipo piezoelettrico in acciaio INOX con sensibilità pari a 10 V/g. Prima di procedere sono stati preparati gli strumenti, ovvero, si è controllato il corretto funzionamento di tutti gli accelerometri con relativo coefficiente di calibrazione per la trasformazione del segnale elettrico in accelerazione. Si sono numerati in ordine progressivo tutti i cavi e amplificatori onde ridurre al minimo le possibilità di errore nei collegamenti. I trasduttori sono stati fissati sulla struttura, previa applicazione di cubetti di acciaio semplicemente appoggiati sul manto stradale del ponte, e sono stati poi collegati al condizionatore di segnale, costituito da una centralina modello DaTa500 che provvede a fornire l'alimentazione e l'amplificazione ai trasduttori e al sistema di acquisizione mediante cavi coassiali schermati della lunghezza necessaria a coprire il tratto di ponte monitorato. I cavi sono stati posizionati in modo tale da mantenerli tesi lungo il tracciato stabilito.



Figura 4.39: Trasduttori di accelerazione

In particolare, sono state effettuate prove in vibrazione ambientale sotto l'azione del vento, prove in vibrazione forzata con carico viaggiante, prove di arresto impulsivo del carico viaggiante e prove di carico impulsivo causato dall'impatto del veicolo su dossi realizzati con tavole di legno. Al fine di registrare la risposta nel maggior numero di punti possibili per pervenire ad una migliore identificazione della risposta dinamica, viste le dimensioni del manufatto, sono state necessarie 2 configurazioni distinte per la collocazione degli strumenti, nel seguito denominate A e B.

La predisposizione dell'apparato sperimentale (accelerometri, cavi ed unità di controllo) e la realizzazione delle prove si è svolta secondo le seguenti fasi:

- tracciamento segnaletica orizzontale;
- collocazione accelerometri nella configurazione A, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- collocazione accelerometri nella configurazione B, collegamento dei cavi all'unità di controllo e realizzazione delle prove;
- recupero delle attrezzature.

Nella configurazione di prova A (Fig. 4.40) sono stati collocati 6 stazioni di misura, 4 accelerometri in direzione verticale nei punti 2-4-5-6, e 2 nelle direzioni verticale e longitudinale nei punti 1-3, per un totale di 8 accelerometri. Tale configurazione ha consentito la misurazione dei gradi di libertà orizzontali e verticali nonché la determinazione degli eventuali spostamenti nella direzione trasversale.

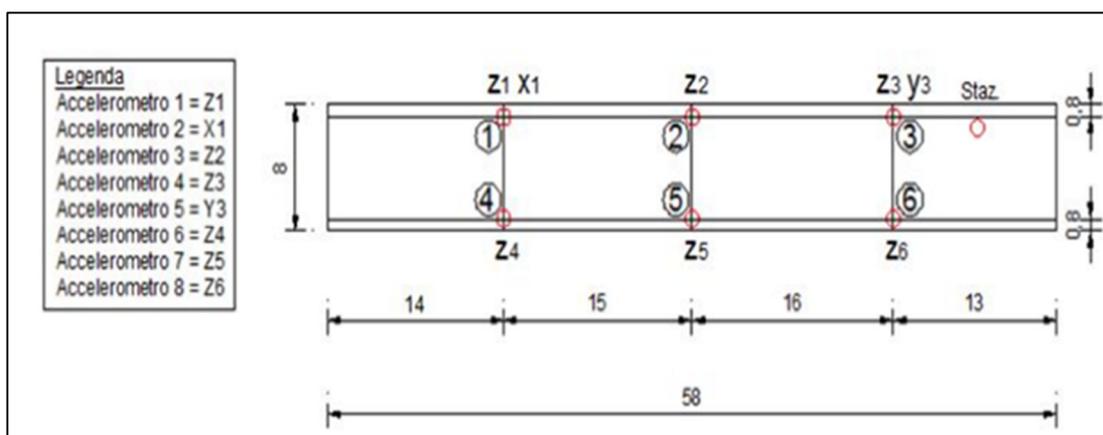


Figura 4.40: Configurazione A

Nella configurazione di prova B (Fig. 4.41) sono stati collocati 6 stazioni di misura, 2 bi-assiali nei punti 1-5, e i restanti mono-assiali nei punti 2-3 (uno opposto all'altro). Tale configurazione ha permesso la misurazione dei gradi di libertà verticali ma prevalentemente quelli orizzontali longitudinali.

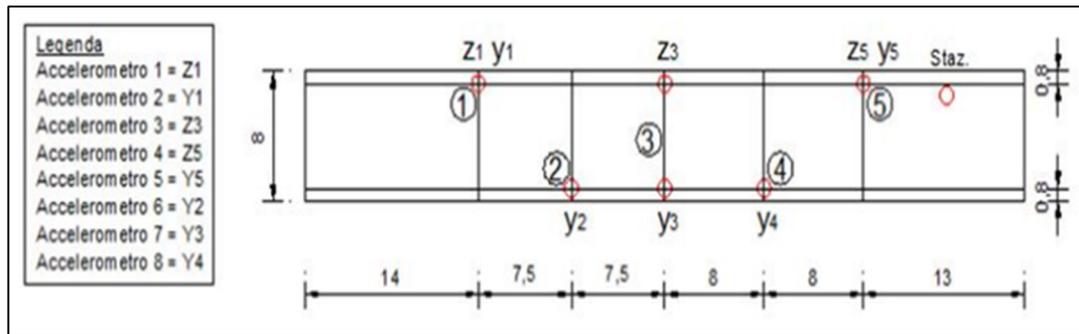


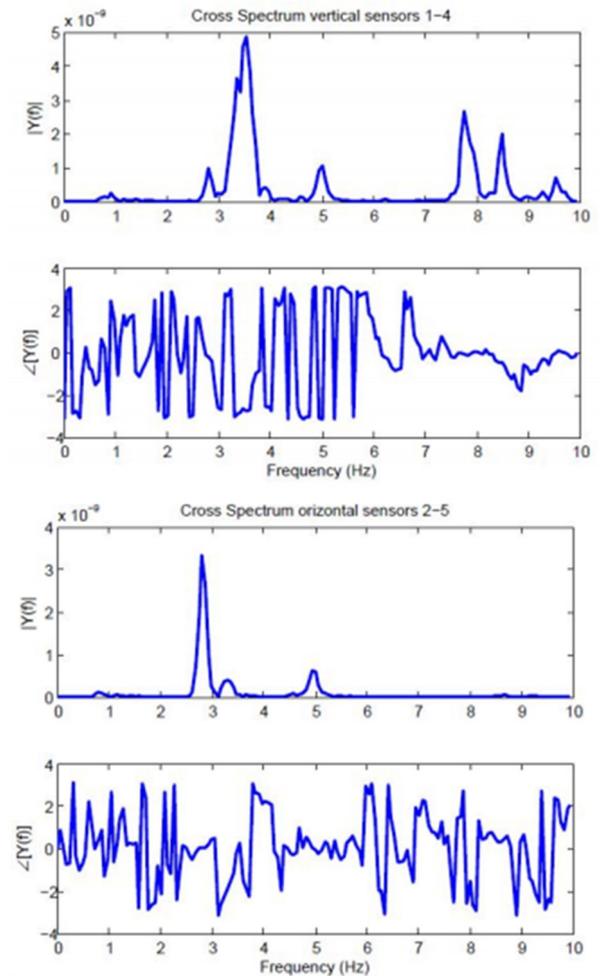
Figura 4.41: Configurazione B

Le prove effettuate in ambo le configurazioni comprendono dunque, il rumore bianco (vento) e le vibrazioni indotte da traffico, eseguite percorrendo il ponte sia da destra che da sinistra con le seguenti modalità:

- Transitto lento;
- Transitto veloce;
- Transitto lento & transitto lento con frenata (arresto impulsivo);
- Transitto veloce & transitto lento con frenata (arresto impulsivo);
- Transitto lento & transitto a zig-zag;
- Transitto veloce & transitto a zig-zag;
- Transitto lento & transitto lento su dossi;
- Transitto veloce & transitto lento su dossi.

Le registrazioni accelerometriche raccolte sono state elaborate utilizzando la trasformata di Fourier ottenendo così i cross-spettri relativi ai test effettuati (Fig. 4.42), dopo aver filtrato i dati con un filtro passa basso con frequenza di taglio 10 Hz, che non è altro che un circuito elettronico che permette il solo passaggio di frequenze al di sotto di una data soglia (10Hz) detta frequenza di taglio.

In particolare, ogni cross-spettro è stato calcolato considerando tutte le coppie possibili di accelerometri, per ambedue le configurazioni e per ogni test. Sono stati così ricavati 128 cross-spettri verticali per la configurazione A e 18 cross-spettri verticali e 60 orizzontali per la configurazione B. Le elaborazioni sono state effettuate con un codice scritto in Matlab che, sulla base della tecnica di identificazione dinamica FDD, fornisce le frequenze e una stima delle forme modali. Per tutti i cross-spettri si sono individuati visivamente i picchi in maniera progressiva in un intervallo di frequenza da 1 a 10 Hz. Le sequenze di picchi così ottenute sono state confrontate tra loro e, per ogni livello di frequenza, è stato selezionato il valore che si ripeteva più volte.



*Figura 4.42: Cross spectrum*

### **Validazione dei risultati**

Le frequenze e le forme modali sperimentali sono state confrontate con quelle previste dal modello analitico (FEM). Preliminarmente è stata fatta una verifica considerando solo i valori di frequenza e, una volta appurata la correlazione tra queste, sono state confrontate le forme modali.

Già visivamente, dalle forme modali è immediato associare univocamente ad ogni modo di vibrare sperimentale un corrispondente modo analitico.

Il numero limitato di accelerometri disponibili, ha permesso di confrontare solo tre modi di vibrare in quanto i punti di misura sono stati disposti solamente sulla campata centrale del ponte. Il risultato evidenzia che le frequenze sperimentali calcolate con il codice Matlab® (“data-driven”) sono quasi coincidenti con quelle calcolate con il solutore FEM.

Di fatto, per come riportato nella Tabella 1, si evidenzia un errore quasi nullo per il secondo modo, un errore di circa il 4% per il primo e di circa l'1% per il terzo, mostrando quindi una buona correlazione tra i due modelli.

Test	Frequenza (FEM) Hz	Frequenza sperimentale Hz	errore %
1	2.67	2.80	4.87
2	5.04	5.00	0.79
3	6.15	6.22	1.14

*Tabella 5: Confronto forme modali*

Il primo modo di vibrare è caratterizzato da una forma modale torsionale, la struttura tende a ruotare intorno al proprio asse longitudinale, interessando più l'impalcato che i setti.

La seconda e la terza forma modale sono di tipo flessionale che coinvolge tutto il ponte. Il quarto modo di vibrare preoccupa solamente i setti, più in particolare quelli di estremità dell'arco. La quinta forma modale ritorna ad essere di tipo flessionale anche se leggermente, così come la settima e l'ottava, a differenza del sesto modo di vibrare che invece è caratterizzato da una forma torsionale più accentuata. Tra i modi superiori se ne distingue uno in corrispondenza della frequenza di 8.57Hz la cui forma modale è alquanto singolare, oltre che rappresentare una torsione si avverte una ampio allargamento dell'impalcato nella zona centrale del ponte, trascinando verso la stessa forma anche la parte sottostante (Fig. 4.38).

➤ **Prove rapporto spettrale H/V sul Ponte di Longobucco, con tromografo sperimentale.**

Con la tecnica HVSR si è misurato la frequenza del ponte stradale in esame ai fini di effettuare un monitoraggio strutturale. I dati acquisiti sono stati confrontati con le misure degli accelerometri. Lo strumento utilizzato per queste misure di rumore sismico è il tromografo sperimentale utilizzando il metodo della stazione-singola (Magarò F., Zinno R. 2015).

Di seguito i dettagli della sperimentazione:

Data, località e posizione: 22/02/2015 – Longobucco (CS)

Condizioni meteo esterne: vento 10 nodi proveniente da Nord.

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

Acquisitore USB: Theremino – SmartLab – Acquisitore con un solo gain.

Frequenza propria dei 3 geofoni: 4.5 Hz.

Frequenza di campionamento: 333 Hz

Obiettivo: valutazione delle frequenze proprie di vibrazione di un ponte.

Software acquisizione: Dolfrang ver. 4.3; Theremino HAL ver. 5.2

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

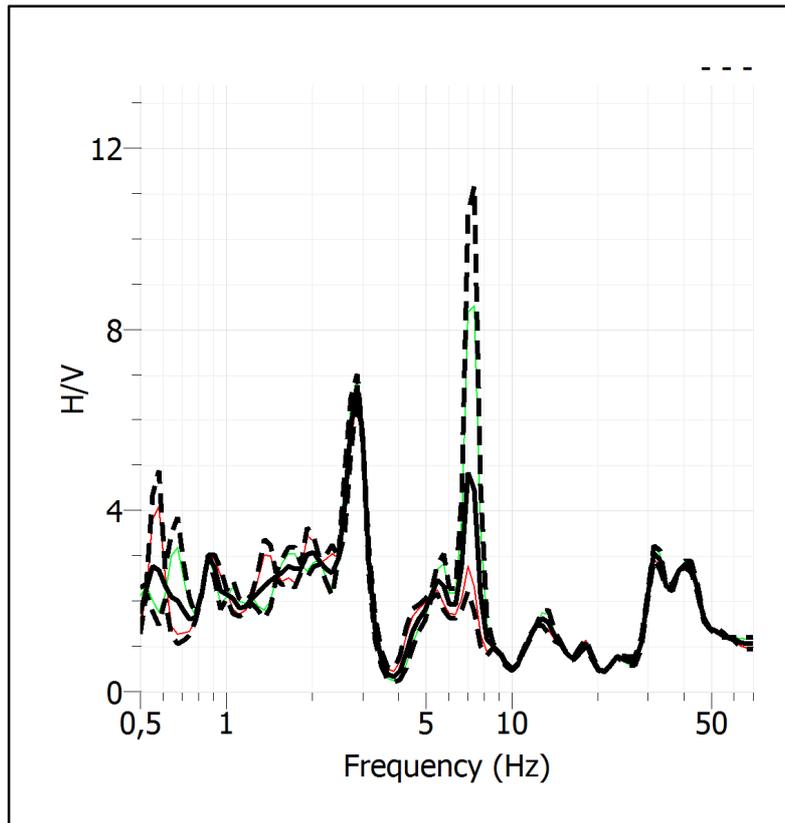
L'acquisizione è avvenuta sul ponte in corrispondenza della campata centrale, e sulle rispettive spalle.

Quota:  $\pm 9.000$ m. Direzione: asse y verso Nord

Durata dell'acquisizione: 20 minuti

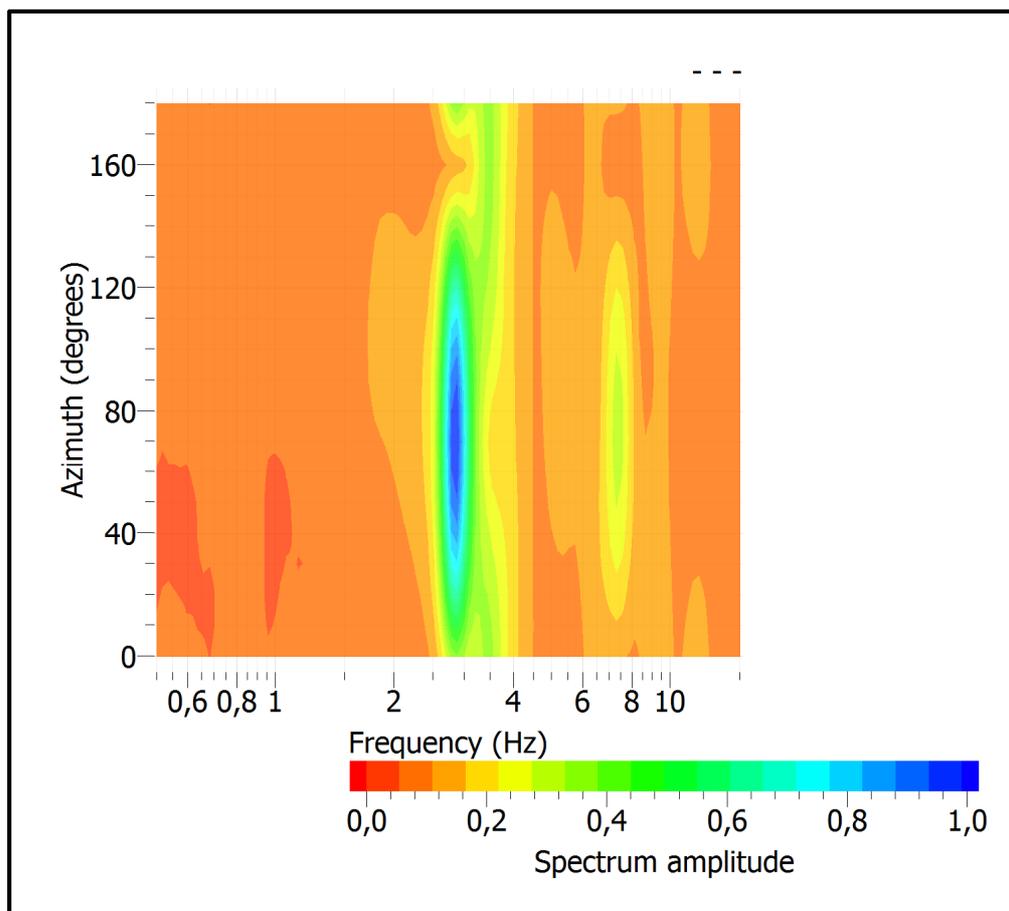
Numero di dati: 400.000,  $\Delta t$  0.003 secondi.

Dall'analisi degli spettri H/V risulta che sono presenti due picchi di frequenza fondamentale uno a 2,6 Hz ed un altro a 6,5 Hz; ciò implica che in caso di sisma, il ponte verrà amplificato di un fattore di circa 2,5 a 3 (Fig. 4.43). La frequenza fondamentale del ponte, dall'analisi HVSR risulta essere 2,7 Hz (Fig. 4.44); frequenza che si trova anche nella configurazione delle analisi FEM.



*Figura 4.43 Grafico dei picchi di frequenza del ponte di Longobucco. Il segnale risulta essere molto pulito, dovuto alla vicinanza dei picchi della componente orizzontale e verticale.*

Analizzando gli spettri in (Fig. 4.45), si nota che nei grafici con la componente Z ed Y hanno una frequenza simile, questo può essere dovuto ad una torsione dei modi di vibrare dell'impalcato. Anche in questo caso, come nel precedente studio, la componente trasversale e verticale si equivalgono. L'asse N del grafico, invece, il rapporto tra la componente orizzontale e verticale risulta essere leggermente disturbato, questo dovuto al fatto che al momento dell'acquisizione sull'impalcato erano presenti raffiche di vento ad 11 nodi.



*Figura 4.44* Frequenza fondamentale del ponte di Longobucco – 2,6 Hz. Spettro H/V. Il segnale risulta essere ben pulito. Confrontando questo spettro, con i grafici della frequenza fondamentale, si osserva una netta somiglianza nei picchi delle frequenze. Da ciò, si può dedurre, che la frequenza fondamentale dell' impalcato in esame si attesta sui 2,5 Hz.

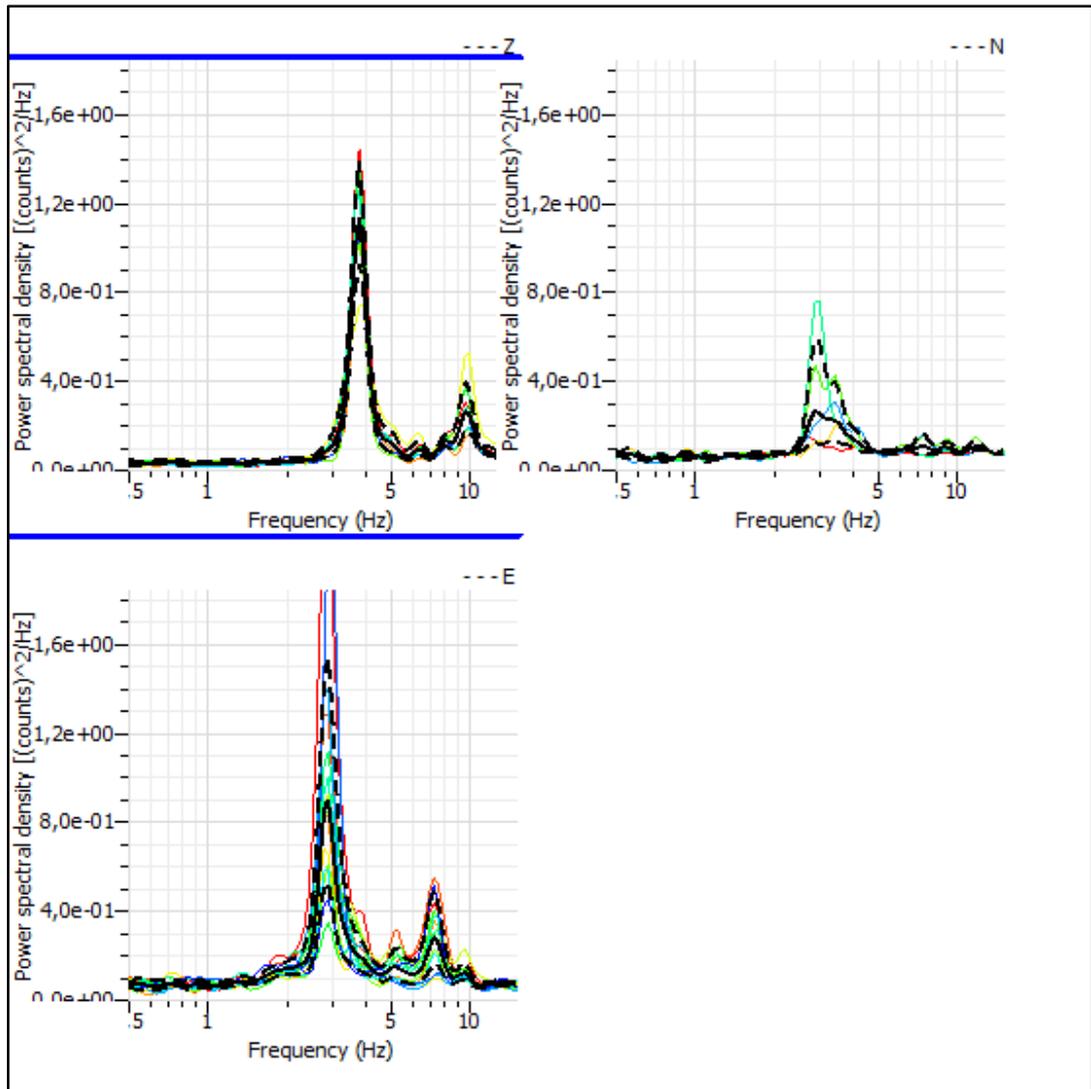


Figura 4.45 Componenti rapporto H/V Assi X, Y e Z

➤ **Osservazioni sulla tecnica HVSR applicata ad impalcati stradali**

Queste prime sperimentazioni del Tromografo sperimentale nella misura del rumore ambientale applicate per monitoraggio strutturale di impalcati, hanno essenzialmente due obiettivi: a) verificare se le misure in termini di frequenza effettuate con il Tromografo, sono concordanti con quelle ottenute dai trasduttori accelerometrici; b) fornire una prima misura delle frequenze degli impalcati, che saranno misurate nuovamente in futuro per stabilire se le condizioni dell'impalcato sono soggette a cambiamento. Naturalmente, la sperimentazione ha permesso di verificare le potenzialità in simili applicazioni di uno strumento semplice, compatto (e quindi di grande trasportabilità) e relativamente poco costoso come il Tromografo. Anche dalla verifica sperimentale, che dà informazioni molto interessanti, possono ottenersi in modo semplice e rapido è già di per se un risultato importante. Lo strumento utilizzato

fornisce in effetti dati velocimetri; da essi è tuttavia possibile risalire a quelli accelerometrici considerando che, alla frequenza  $\omega_K$ , ad una sollecitazione di tipo armonico che dà luogo alla velocità:  $\mathbf{v}_K(t) = V_K \sin(\omega_k t)$  corrisponde l'accelerazione:

$$\mathbf{a}_k(t) = \left(\frac{d}{dt}\right) \mathbf{v}_k(t) = \omega_k V_k \cos(\omega_k t) \quad (1)$$

dove  $\mathbf{K}=1,2,\dots,NS/2$ ,  $NS$  è il numero di campioni acquisiti nell'unità di tempo,

$$\omega_k = 2\pi[f_{min} + (k - 1)f_s] \quad (2)$$

Infine  $f_{min} = 0.1 \text{ Hz}$  è la frequenza minima di acquisizione (al di sotto di tale frequenza eventuali picchi non sono generalmente associati a risonanze del terreno o dell'edificio. In effetti, la derivata temporale può calcolarsi direttamente in modo numerico; va comunque tenuto conto del fatto che la derivata di una serie temporale produce sempre una nuova serie temporale caratterizzata da una maggiore dispersione dei dati rispetto alla prima.

Per completezza, si ricorda che le analisi ottenute tramite H/V condotte su impalcati, vanno sempre integrati con analisi modali (FEM) e analisi strumentale tramite accelerometri. Tutto ciò, porta ad una regolarizzazione dei dati.

E' importante sottolineare come i risultati qui presentati siano conseguiti in breve tempo sia dal punto di vista dell'esecuzione delle misure, sia dal punto di vista dell'elaborazione dei dati.

Il tromografo utilizzato, si potrebbe in un secondo momento utilizzare come stazione stabile per il monitoraggio degli impalcati, aggiungendo magari una scheda wireless per il trasferimento dati, il tutto trasferito ad una centrale di controllo.

## Capitolo 5

### Caso studio:

#### **Caratterizzazione geofisica e geotecnica di un versante in frana con tecnica HVSR e Laser Scanner.**

In questo capitolo, verrà illustrato l'uso congiunto della tecnica HVSR e di rilievo con Laser Scanner, per la caratterizzazione geofisica e geotecnica di un versante interessato da un movimento franoso. L'interesse maggiore è rivolto al metodo della tecnica Nakamura o stazione singola, a causa della sua rilevanza nelle applicazioni all'ingegneria geotecnica. Lo scopo dell'indagine HVSR o Nakamura, è la caratterizzazione sismica del versante in frana, l'individuazione delle discontinuità sismiche nonché la profondità della formazione rocciosa interessata dal movimento. Con tale metodo, inoltre, viene stimata la velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ) come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008.

L'indagine geofisica proposta si avvale della metodologia basata sulla tecnica Nakamura e sul rapporto spettrale H/V. Si ribadisce, che tale tecnica fa parte delle misure di geofisica di tipo *passiva* per la quale la determinazione dei parametri dei terreni non richiede l'uso di sorgenti artificiali di energia tipico dei metodi attivi, ma avviene semplicemente attraverso il rilevamento delle radiazioni naturali o del rumore ambientale emesso dai geomateriali. L'analisi spettrale dei microsismi per la determinazione delle curve di dispersione e quindi dei profili di velocità delle onde di taglio dei depositi di terreno costituisce un esempio di metodo geofisico passivo. Inoltre, l'analisi della componente spettrale H/V è di fondamentale importanza per trovare la frequenza caratteristica di risonanza del sito e tramite un codice di si può addirittura trovare la velocità media delle onde di taglio  $V_s$ , e la stratigrafia del sottosuolo. Di seguito, si tratterà tale tecnica per la caratterizzazione geofisica di un movimento franoso associata ad un rilievo Laser Scanner, per stabilire le zone mobilitate di tale movimento.

## 5.1 Caratteristiche geotecniche e sismiche movimento franoso

Nel Marzo 2012, a seguito di una stagione invernale animata da prolungate piogge, di poco preceduta da un lungo periodo altrettanto piovoso, sul lato nord-ovest dell'Università della Calabria, nella pendice di Contrada Vermicelli, si sono sviluppati alcuni movimenti franosi, due dei quali, i principali, sono prossimi tra loro ma chiaramente distinti. Questi hanno destato preoccupazione in previsione di una loro possibile evoluzione retrogressiva verso monte, che avrebbe potuto mettere in pericolo alcuni fabbricati posti sulla sommità della collina Vermicelli e la strada ivi esistente, nonché danni ai beni dell'Università.

Il sistema franoso in oggetto è stato classificato, sulla base delle osservazioni dirette, come una *frana<sup>1</sup> per scorrimento rotazionale*.

L'area in esame, situata in località "Vermicelli di Arcavacata di Rende" (CS) (Fig.5.1a,b). La zona di frana è localizzata sulla Carta tecnica regionale, edita dal Centro cartografico regionale della Regione Calabria – Elemento 559032 (originariamente in scala 1:5000). Coordinate Geografiche località "Vermicelli".

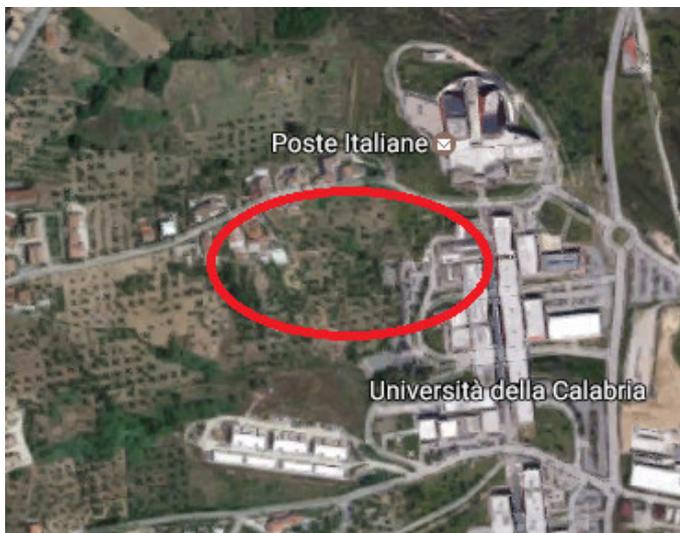
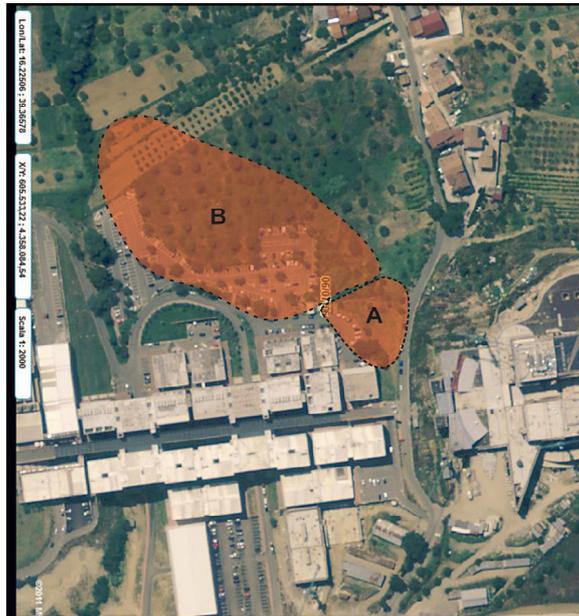


Figura 5.1 a) Ubicazione movimento di versante in esame.  $39^{\circ} 21' 58''N$ ;  $16^{\circ} 13' 25''E$

<sup>1</sup> In letteratura, una frana è definita come un "movimento di roccia, detrito e/o terra lungo un versante, sotto l'influenza della gravità" (Varnes, 1958; Cruden, 1991, Crozier, 1999). Si fa quindi riferimento al processo (landslide process) piuttosto che all'oggetto, questo al fine di non limitare l'utilizzo della definizione agli aspetti descrittivi, ma di ampliarlo a contesti applicativi ed interpretativi. In natura le frane si manifestano in maniera molto diversa: negli anni sono state prodotte numerose classificazioni, a partire da quella di Varnes (1978) successivamente rivista da Carrara, D'Elia e Semenza (1987) e da Cruden e Varnes (1996). I fenomeni franosi vengono distinti in base a due parametri fondamentali: 1) natura del materiale coinvolto; 2) tipologia del movimento di massa.



*Figura 5.1 b) Sono state distinte, rispettivamente, due frane, indicate con la lettera A e B; sono due frane per scorrimento, quella contraddistinta con la lettera “A” ha interessato una zona più piccola del versante, mentre la restante parte del versante molto ampia è occupata dalla frana “B”. Complessivamente, gli spessori di roccia coinvolti sono di spessori variabile, anche se, nella parte centrale, a valle della pendice, raggiungono i 7 – 8 metri.*

Per la classificazione sismica la zona fa parte del territorio di Rende, il quale fa parte della “Zona 1” che è quella di pericolosità più elevata, potendosi verificare eventi molto forti, anche di tipo catastrofico, indicata *nell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003, aggiornata con la Delibera della Giunta Regionale della Calabria n. 47 del 10.02.2004.*

Dalle coordinate dell’area oggetto di studio (39° 21’ 58”N - 16° 13’ 25”E) mediante un apposito programma di calcolo, è possibile ricavare i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c$ . Per la valutazione dell’amplificazione topografica, il pendio in esame ricade nella Categoria C/T2, categoria S2. Per l’area in studio, ricadente nella categoria T2, il coefficiente  $ST = 1,2^2$ .

<sup>2</sup> Per la consultazione si rimanda al Capitolo 2 “Azioni Sismiche” delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14.01.2008.

## Coefficienti sismici [N.T.C.]

---

---

### Dati generali

Tipo opera 2 - Opere ordinarie

Classe d'uso: Classe II

Vita nominale: 50,0 [anni]

Vita di riferimento: 50,0 [anni]

### Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T2

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,69	2,29	0,28
S.L.D.	50,0	0,91	2,28	0,3
S.L.V.	475,0	2,65	2,43	0,37
S.L.C.	975,0	3,55	2,47	0,4
S.L. Stato limite	amax [m/s <sup>2</sup> ]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	1,242	0,2	0,0253	0,0127
S.L.D.	1,638	0,2	0,0334	0,0167
S.L.V.	4,153	0,28	0,1186	0,0593
S.L.C.	4,9564	0,28	0,1415	0,0708

Tabella 1 Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Coefficiente azione sismica orizzontale: 0,1186

Coefficiente azione sismica verticale: 0,059 3

Dai sondaggi geognostici effettuati e dalla loro elaborazione si evincono valori geomeccanici ed idrogeologici, che spiegano in maniera molto semplice, l'evoluzione del dissesto:

1. 0,00 – 1,20: Orizzonte pedogenizzato, costituito da limo sabbioso – argilloso con inclusione di ghiaia.
2. 1,20 – 10,00: Limi sabbiosi con alternanze di livelli di sabbie con ghiaie.
3. 10,00 – 25,00: Sabbie limo – argillose.
4. 25,00 – ed oltre: Argille limo – sabbiose.

<b>CAMPIONE S5C1</b>	
Contenuto d'acqua naturale (W)	14,79 %
Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ )	1,945 gr/cm <sup>3</sup>
Peso specifico dei grani ( $G_s$ )	2,727 gr/cm <sup>3</sup>

*Tabella 2 Il campione S5C1, prelevato alla profondità di 10,00 – 10,50 mt dal p.c., è costituito da sabbia media addensata debolmente limosa di colore bruno. Nella porzione centrale del campione è presente un livello limoso grigio. Il campione risulta essere molto tenero, parzialmente saturo, struttura eterogenea. Su tale campione sono stati ricavati i seguenti parametri geotecnici, riportati in tabella.*

Complessivamente, gli spessori di roccia coinvolti sono di spessori variabile, anche se, nella parte centrale, a valle della pendice, raggiungono i 7 – 8 metri. Lungo l'asse di tale movimento, si trovano poi distribuiti i principali danni in particolare al parcheggio del dipartimento e all'asse viario (strada comunale Vermicelli), nonché il fenomeno ha destato preoccupazione sia alle abitazioni poste a monte del dissesto e sia agli attigui cubi del dipartimento di Meccanica. Ciò impone un intervento di mitigazione del rischio, attraverso opere strutturali e di ingegneria naturalistica.

La larghezza max del movimento nella sua zona centrale è di 80 m; la lunghezza max è di 200 m.

La morfologia dell'area in esame presenta aspetti strettamente connessi e derivanti dall'azione modellatrice degli agenti esogeni. L'azione di modellamento si esplica

sulla natura litologica delle rocce affioranti. Le litologie superficiali presenti nell'area, sono caratterizzate da bassa resistenza all'erosione.

A monte del pendio sono visibili alcune fessure verticali di trazione che segnano il limite superiore del corpo di frana. Procedendo dal p.c. verso il basso, è stata riscontrata la presenza di uno strato superiore di limi sabbiosi con intercalazioni di livelli di sabbie e ghiaie, ricoperto da una coltre di circa 1 mt di materiale pedogenizzati, costituito da limo sabbioso-argilloso con inclusioni di ghiaie.

Questo strato di limo-sabbioso sovrasta un secondo strato costituito da sabbie limo-argillose di colore grigio chiaro con venature nerastre e/o brunastro.

La falda freatica si attesta ad una profondità di circa 6 metri dal piano campagna; addirittura in alcune porzioni del versante risale fino a quote maggiori arrivando a coincidere con il piano campagna;

Dalle osservazioni geomorfologiche delle 2 frane, si evidenzia, che il movimento in atto ha interessato le porzioni più superficiali delle masse coinvolte, in particolare, il piano di scivolamento della frana, si è attestato intorno i 4 metri di profondità, questo è stato possibile individuarlo tramite dei sondaggi di tipo DPSH<sup>3</sup>, fatti uno sulla Corona di frana e l'altro sul piede della frana. Il movimento franoso si è innescato, principalmente per un periodo molto accentuato di piovosità e anche perché la strada sovrastante il movimento franoso, non avendo adeguati sistemi di deflusso delle acque, ha riversato nel terreno sottostante ingenti quantità d'acqua, facendo innescare il movimento del terreno. Sul piede della frana, si osservano accumuli di materiale di spessore abbastanza elevato.

---

<sup>3</sup> Le **prove penetrometriche dinamiche dpsh-scpt** sono prove geotecniche puntuali e consistono nell'infingere verticalmente nel terreno una punta conica metallica posta all'estremità di un'asta di acciaio.

Tale asta è prolungabile tramite una batteria di aste di diametro di 36 mm le quali possono scorrere all'interno ed in modo alternato ad un rivestimento esterno, anch'esso in acciaio, avente un diametro di 48 mm. L'energia di infissione è fornita da un maglio del peso di 63,5 kg che, battendo a caduta libera sulle aste, cade da un'altezza costante di 75,0 cm, per mezzo di un dispositivo di sganciamento automatico compiendo per ogni battuta un lavoro specifico pari a 234 kj/mq. Nel corso della prova si rileva il numero di colpi necessari per la penetrazione di 30 cm della punta ed alternativamente del rivestimento. La resistenza del terreno dipende dalle caratteristiche fisico-meccaniche nel quale esso si trova allo stato naturale e pertanto per terreni incoerenti dipende prevalentemente dallo stato di addensamento dei granuli, mentre per terreni coesivi dipende dal contenuto di umidità naturale.

## 5.2 Indagine geofisica mediante tecnica dei rapporti spettrali

Nel presente caso, si sfrutterà la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto  $H/V=1$ ) con quello effettivamente misurato in superficie. Inoltre, è stato fatto anche uno studio digitale delle masse coinvolte dal fenomeno franoso, con tecnologia Laser Scanner.

La rappresentazione di un moto sismico può essere espressa sia nel campo del tempo che delle frequenze. Per capire la procedura per il calcolo del moto sismico in superficie si prende in analisi un caso semplificato di un deposito di terreno omogeneo di spessore, poggiante su un basamento roccioso soggetto ad onde di taglio con direzione di propagazione verticale. Se le onde di taglio verticali incidenti sono sinusoidali di frequenza  $f$ , l'accelerazione sull'affioramento rigido è una sinusoidale di frequenza  $f$  e ampiezza  $a_{maxr}$  mentre la corrispondente accelerazione alla superficie del deposito, anch'essa sinusoidale di frequenza  $f$ , ha ampiezza pari a  $a_{maxs}$ . Il rapporto  $a_{maxr}/a_{maxs}$  prende il nome di *fattore di amplificazione*,  $A$ , e dipende dalla frequenza dell'eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento del terreno e dal rapporto  $I = (\sigma_b V_b) / (\sigma_b V_s)$  tra l'impedenza sismica della roccia di base  $\sigma_b V_b$  e quella del deposito  $\sigma_b V_s$ . La variazione del fattore di amplificazione con la frequenza definisce la funzione di amplificazione  $A(f)$  del deposito. Il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze, che corrispondono alle *frequenze naturali*  $f_n$  di vibrazione del deposito.

Le misure HVSR forniscono una stima diretta della **frequenza di risonanza** (o del periodo proprio) delle coperture. La frequenza di risonanza del sedimento dipende dallo spessore  $H$  del sedimento e dalla velocità "media" ( $V_s$ ) delle onde S nel sedimento:

$$v = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

$$V_s = \frac{4H}{T_1} \quad (2)$$

$$H = \frac{V_s T_1}{4} \quad (3)$$

Conoscendo lo spessore H del sedimento è possibile avere informazioni sulla velocità “media” delle Onde S. Alternativamente, conoscendo quest’ultima è possibile definire lo spessore H dello strato sedimentario<sup>4</sup>.

In questi casi è possibile dimostrare che esiste una relazione diretta tra la **frequenza di risonanza** e lo **spessore** dello strato soffice. Questa relazione dipenderà dai due parametri  $V_0$  e  $a$  secondo la relazione:

$$H = \left[ \frac{V_0 (1-a)}{4V_1} + 1 \right] 1/(1-a) - 1 \quad (4)$$

Noti per via empirica questi parametri è possibile definire **semplici abachi** che permettono di stimare (in prima approssimazione) lo spessore della coltre di sedimenti.

Per esempio, utilizzando un abaco preliminare (Fig.5.2) (valido a rigore per mezzi granulari non cementati), le frequenze di risonanza possono tentativamente essere convertite in spessori permettendo una identificazione preliminare delle interfacce risonanti. Questo tipo di indagine non sostituisce una analisi di dettaglio ma ha il solo scopo (sotto controllo geologico) di fornire indicazioni preliminari sulla struttura del sottosuolo.

fr	H	V Media
0.5	259	518
0.6	204	489
0.7	166	466
0.8	140	447
0.9	120	431
1.0	104	417
1.5	62	369
2.0	42	340
3.0	25	304
4.0	18	282
5.0	13	267
6.0	11	256
7.0	9	247
8.0	8	240
9.0	7	235
10.0	6	230
20.0	3	205
30.0	2	195
40.0	1	190
50.0	1	186

Figura 5.2 Abaco per trovare lo spessore dello strato superficiale.

<sup>4</sup> In alcuni casi è possibile formulare ipotesi ragionevoli riguardo al profilo di velocità. Per esempio, nel caso di corpi di sedimenti non consolidati, si può presumere che l’andamento medio del profilo di velocità sia controllato dal carico litostatico. In questo caso, per i mezzi granulari, è ragionevole ipotizzare un andamento delle Vs con la profondità H del tipo :  $V_s(H) = V_0 (1 + H)^a$ : dove  $V_0$  e  $a$  dipendono dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc.).

Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde Vs è necessario adottare una modellazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$V_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad (6)$$

Dove:

Vs = valore di velocità delle onde di taglio [m/s]

H = profondità alla quale si desidera stimare Vs [m] (30 metri in caso di Vs30)

h<sub>i</sub> = spessore dello strato i – esimo [m]

L'interpretazione, consente di correlare il valore di picco dello spettro di risposta HVSR con la profondità del substrato roccioso compatto (bedrock geofisico) e di individuare una corrispondenza tra i valori di frequenza relative alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo (Fig. 5.3).

Interpretando, i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si possono ricavare il valore di frequenza caratteristica del sito. Sapendo che ad ogni picco di frequenza corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza si può estrapolare una stratigrafia geofisica del sottosuolo.

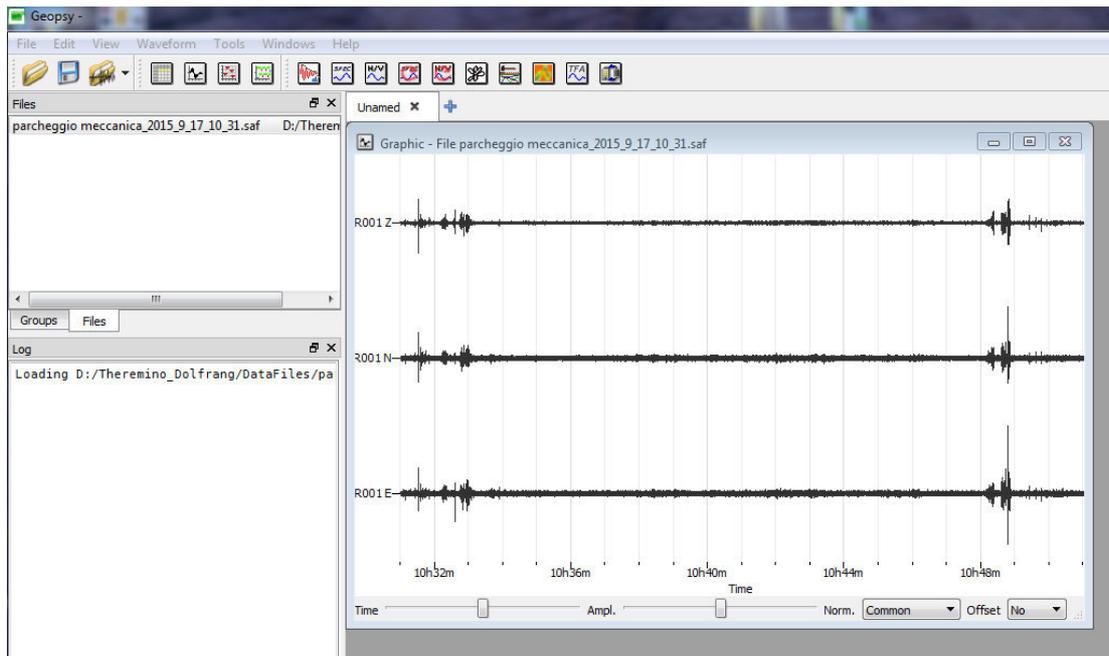
	Terreni coesivi	Sabbie	Terreni Rimaneggiati /conoidi
	$V_0=190$	$V_0=170$	$V_0=110$
	$a=0.20$	$a=0.25$	$a=0.40$
$\nu$	H	H	H
0.5	230	260	334
0.6	183	204	249
0.7	151	167	194
0.8	128	140	157
0.9	111	120	130
1	98	105	110
1.5	59	62	58
2	42	43	37
3	26	25	20
4	18	18	13
5	14	13	10
6	11	11	8
7	9	9	6
8	8	8	5
9	7	7	4
10	6	6	4
15	4	4	2
20	3	3	2

*Figura 5.3 Correlazione tra frequenza relative alle discontinuità sismiche e i cambi litologici presenti nell'immediato sottosuolo.*

➤ **Acquisizione Sismica HVSR corpo franoso località “Vermicelli” (Rende – Cosenza)**

La prova ha lo scopo di comparare la stratigrafia nota di un sondaggio meccanico con i risultati del sondaggio HVSR ottenuta con il sismografo sperimentale, e verificare l'attendibilità.

Il sondaggio HVSR si presenta estremamente pulito nonostante piccoli rumori occasionali dovuti a piccole raffiche di vento e a rumori antropici e ad una leggera pioggia in atto durante il sondaggio (Fig. 5.4).



*Figura 5.4 Sondaggio HVSR, si notano in figura dei picchi corrispondenti a rumori antropici. Il segnale, rimossi questi disturbi, risulta essere molto pulito e stabile, nonostante sia stato fatto con il sismografo sperimentale.*

La durata del sondaggio è stata di 30 minuti, con assenza di vento. L'ubicazione del sondaggio (Fig. 5.5) HVSR è avvenuta vicino al sondaggio meccanico S5, da dove si è ricavato la stratigrafia del terreno:

- 0,00 – 1,20: Orizzonte pedogenizzato, costituito da limo sabbioso – argilloso con inclusione di ghiaia.
- 1,20 – 10,00: Limi sabbiosi con alternanze di livelli di sabbie con ghiaie.
- 10,00 – 25,00: Sabbie limo – argillose.
- 25,00 – ed oltre: Argille limo – sabbiose.



*Figura 5.5 Ubicazione sondaggio HVSR in prossimità del sondaggio geomeccanico evidenziato con il cerchietto rosso.*

La frequenza caratteristica del sito, ottenuta con il sismografo sperimentale, risulta generata dalla discontinuità sismica localizzata alle frequenze di circa 10 Hz (Fig. 5.6), questa è associabile al contatto tra gli orizzonti di sabbie limose con argille limo-sabbiose. La sovrapposizione degli spettri sismici acquisiti, figura a seguir, si osservano sostanziali diversità, dovuto al fatto che il sito in esame è stato interessato da un movimento di terreno, quindi, non c'è omogeneità nei materiali.

La determinazione della curva HVSR in sito prevede i seguenti steps (Appendice A)

- 1) Misura delle tre componenti x, y, z del moto in un punto sulla superficie libera del suolo per una durata di almeno 20 min.
- 2) Eliminazione manuale da parte dell'utente delle parti di segnale costituite dal disturbo arrecato da eventi transitori non conformi al rumore ambientale
- 3) Definizione degli N intervalli o finestre temporali stazionari entro cui calcolare le curve HVSR
- 4) Calcolo delle trasformate di Fourier delle tre componenti x, y, z del moto
- 5) Operazione di smoothing degli spettri di Fourier
- 6) Somma delle due componenti orizzontali x e y
- 7) Calcolo delle curve HVSR come rapporto spettrale tra la componente orizzontale H e la componente verticale V negli N intervalli temporali stazionari

## 8) Calcolo della curva HVSR media tra le N curve HVSR

Infine, i risultati ottenuti vengono verificati secondo i criteri di ammissibilità del progetto SESAME. Il significato dei criteri di ammissibilità dei risultati è riportato di seguito:

### Condizioni di Reliability della curva HVSR:

- 1) In corrispondenza della frequenza del picco di interesse, vi siano almeno 10 cicli significativi in ogni finestra temporale individuata nel segnale registrato
- 2) È necessario utilizzare un grande numero di finestre temporali e di cicli, almeno 200 cicli
- 3) Il livello di scattering, cioè di dispersione delle curve HVSR ottenute nelle diverse finestre temporali deve essere moderato, altrimenti potrebbe essere un sintomo di un rumore ambientale fortemente non-stazionario, che influenza la forma della curva HVSR in maniera non ripetibile.

Le condizioni 1) e 2) confermano che la durata del segnale registrato sia sufficientemente estesa, la condizione 3) assicura che la curva HVSR misurata sia di buona qualità e poco dispersa.

### Condizioni di Clarity del picco massimo:

- Condizioni sull'Ampiezza:

- 4) Esiste una frequenza  $f^-$ , compresa tra  $f_0/4$  e  $f_0$ , tale che  $A_0 / AH/V (f^-) > 2$
- 5) Esiste un'altra frequenza  $f^+$ , compresa tra  $f_0$  e  $4 \cdot f_0$ , tale che  $A_0 / AH/V (f^+) > 2$
- 6) Deve essere  $A_0 > 2$

Le condizioni 4) e 5) confermano che il picco sia sufficientemente isolato sia a sinistra (condizione 4), sia a destra (condizione 5) del picco. La condizione 6) assicura che il picco sia sufficientemente elevato e questo dipende dall'entità del contrasto di rigidità tra gli strati.

### Condizioni sulla Stabilità della curva HVSR:

- 7) Il picco dovrebbe comparire alla stessa frequenza (entro il  $\pm 5\%$ ) nelle curve H/V corrispondenti alla media + e- lo standard deviation.
- 8) Lo scarto quadratico medio  $\sigma_f$  deve essere inferiore ad un valore limite (f) dipendente dalla frequenza come riportato nella tabella dei criteri Sesame.

9) Deve essere  $\sigma_A(f_0)$  inferiore ad un valore limite  $\theta(f)$  dipendente dalla frequenza come riportato in tabella dei criteri Sesame.

Le condizioni 7), 8) e 9) confermano che la curva HVSR misurata sia stabile, cioè di buona qualità e poco dispersa.

L'elaborazione è stata eseguita mediante il software Geopsy ver. 2.8.0. (Università di Grenoble, Francia).

Il grafico HVSR è generalmente un grafico frequenza(x) – ampiezza del rapporto H/V (y). Poiché la frequenza è relazionata alla profondità, il grafico HVSR può tramutarsi in un grafico ampiezza del rapporto H/V (x) – profondità (y), dove l'ampiezza del rapporto H/V (x) descrive in modo relativo l'ampiezza del contrasto d'impedenza tra i mezzi sopra e sotto quella determinata profondità (y). Ciascun picco nel grafico H/V corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto d'impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto d'impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco H/V sebbene la relazione tra le due variabili non sia lineare. E' ovvio che il numero di picchi visibili nel grafico HVSR in fig. 5.6, dipende dal contrasto, dalla distanza tra le due discontinuità e dalla funzione di lisciamento impiegata.

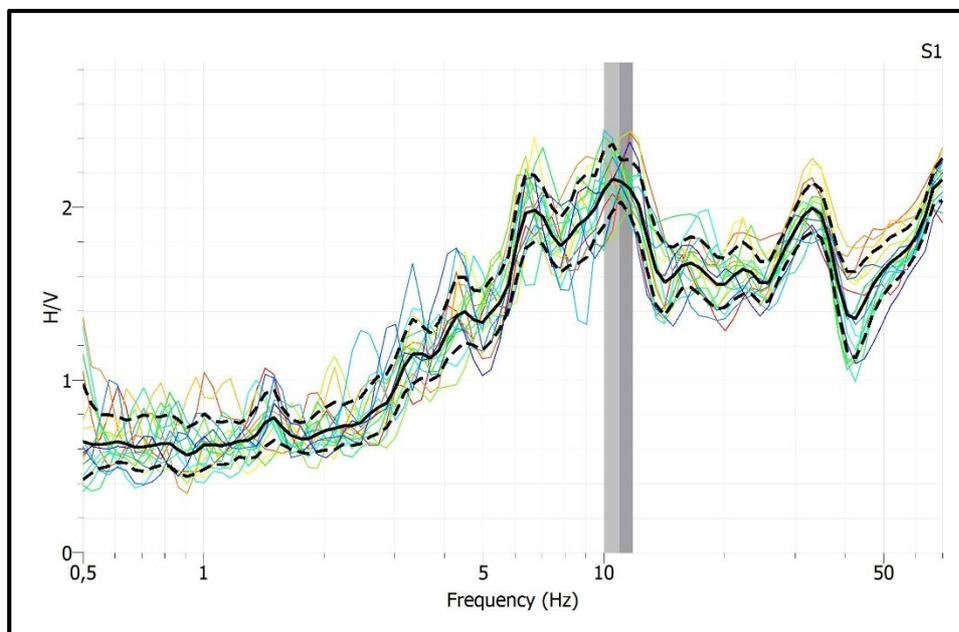
Tabella 3 Parametri acquisizione HVSR

PARAMETRI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE HVSR	
ACQUISIZIONE	
Strumentazione	Sismografo Sperimentale Theringino
Frequenza di campionamento	333 Hz
Durata	1200 s
PARAMETRI ELABORAZIONE	
Durata totale analizzata	1200 s
Durata finestre	40 s
N° finestre	30
Overlap	25 %
Smoothing type	Konno & Omhachi
Smoothing constant	40
Intervallo f	0.5 Hz – 20.00 Hz

CRITERI SESAME<sup>5</sup>

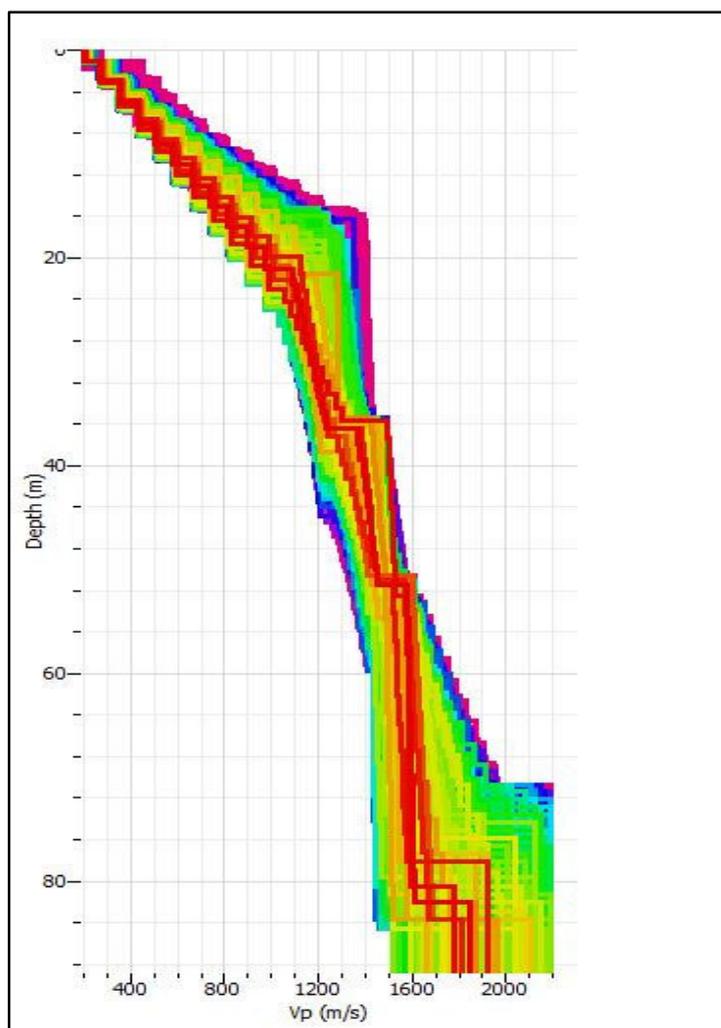
- 1)  $f_0 > 10/lw$  (OK)
- 2)  $nc(f_0) > 200$  (OK)
- 3)  $\sigma_A(f) < 2$  per  $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$  se  $f_0 > 0.5H$  or  $\sigma_A(f) < 3$  per  $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$  se  $f_0 < 0.5H$  (OK)
- 4)  $\int_{f_0/4}^{f_0} |AH/V(f^-)| < A_0/2$  (NO)
- 5)  $\int_{f_0}^{4 \cdot f_0} |AH/V(f^+)| < A_0/2$  (OK)
- 6)  $A_0 > 2$  (OK)
- 7)  $f_{picco} [AH/V(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$  (NO)

<sup>5</sup> Si rimanda la tabella in Allegato A.



*Figura 5.6 Frequenza caratteristica del sito in esame.*

E' stato, quindi possibile stimare, tramite la formula [6], la velocità delle onde Vs a 30 metri di profondità dal piano campagna (Fig. 5.7) come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008. La Vs30 calcolata tramite tecnica HVSR si attesta intorno i 285 m/s.



*Figura 5.7 In quest' immagine si può notare la variazione di Vs con la profondità. Ciò ha evidenziato: 1) strato superficiale di 1 metro riporti antropici ghiaiosi 2) sabbie limose da 1 a 20 m 3) da 20 a 35 metri limi e sabbie limose più addensate 4) da 35 m a 50 m argille limose.*

Anche in questo caso applicato sul terreno, la teoria HVSR è risultata utile per calcolare la velocità Vs nei primi 30 metri, correlata dai sondaggi geomeccanici. La categoria di sottosuolo, ai sensi delle NTC 2008, risulta essere la C se si tiene conto della sola media delle Vs. Il grafico H/V della registrazione, oltre all'inversione di velocità, evidenzia un picco fondamentale a 10 Hz ed un altro a 3 Hz. Il primo picco a (10 Hz) è imputabile al contrasto di velocità tra il terreno rimaneggiato dalla movimento franoso e i sottostanti limi sabbiosi; il secondo picco è imputabile al contatto tra i depositi limo-sabbiosi (coesivi) e le argille limose il cui tetto è stato intercettato dal sondaggio geomeccanico S5 alla profondità di 20 metri dal piano campagna. Nel caso in questione, utilizzando come input le vibrazioni ambientali – Noise Ambientale, e quindi effettuando soltanto un'analisi in regime stazionario, la

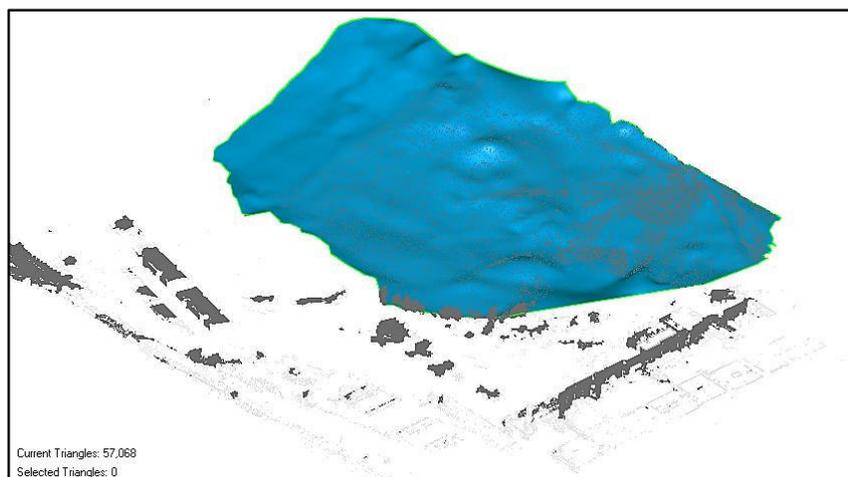
tecnica HVSR si è rivolta utile per poter caratterizzare un movimento franoso ed individuare i possibili piani di scivolamento, tramite il contrasto di impedenza sismica.

### **5.3 Il rilievo della frana con Laser Scanner**

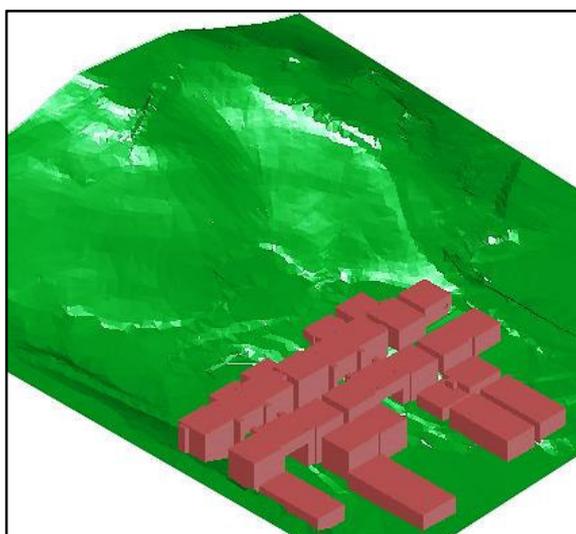
Questo movimento franoso è stato investigato anche tramite tecnica con Laser Scanner, per meglio capire il meccanismo di collasso della frana e di istituire un modello, utile anche per il preallarme (*Artese e al., 2015*).

I parametri da misurare, durante l'osservazione, possono essere: Parametri di scalo cioè quantità che descrivono direttamente il comportamento della frana (movimenti verticali ed orizzontali, deformazioni, rotazioni); parametri indiretti cioè i dati che rappresentano le condizioni al contorno della frana (pressione dei pori, livelli delle acque sotterranee, parametri meteorologici, idrologia, sismicità). La frequenza delle indagini, durante l'osservazione, dipende dalla portata del monitoraggio, dall'evoluzione dei fenomeni e dai periodi di osservazione. Il tipo di raccolta dei dati può essere di tipo manuale (eseguito da operatori), automatico (gestito da centri remoti) e misto (*Artese e al. 2015*).

L'indagine è stata eseguita utilizzando il laser scanner terrestre RIEGL VZ-1000 con la tecnologia completa forma d'onda, e ha coinvolto tutta la frana. Lo strumento fornisce un campo di misura superiore a 1.400 m, una ripetibilità 5 mm tasso misura efficace fino a 122.000 misurazioni / sec, un ampio campo visivo di 100 ° verticale e 360 ° orizzontale, e utilizza un raggio laser invisibile sicura occhio operazioni. L'indagine ha mirato a creare un modello 3D (Figura 5.8), con alta risoluzione, utilizzabile per le indagini geomorfologiche e analisi geotecnica. Allo stesso tempo, un modello 3D (Figura 5.9) è stato realizzato a partire dalla mappa 1:10000 dell'area dell'Università della Calabria (volo 2006).

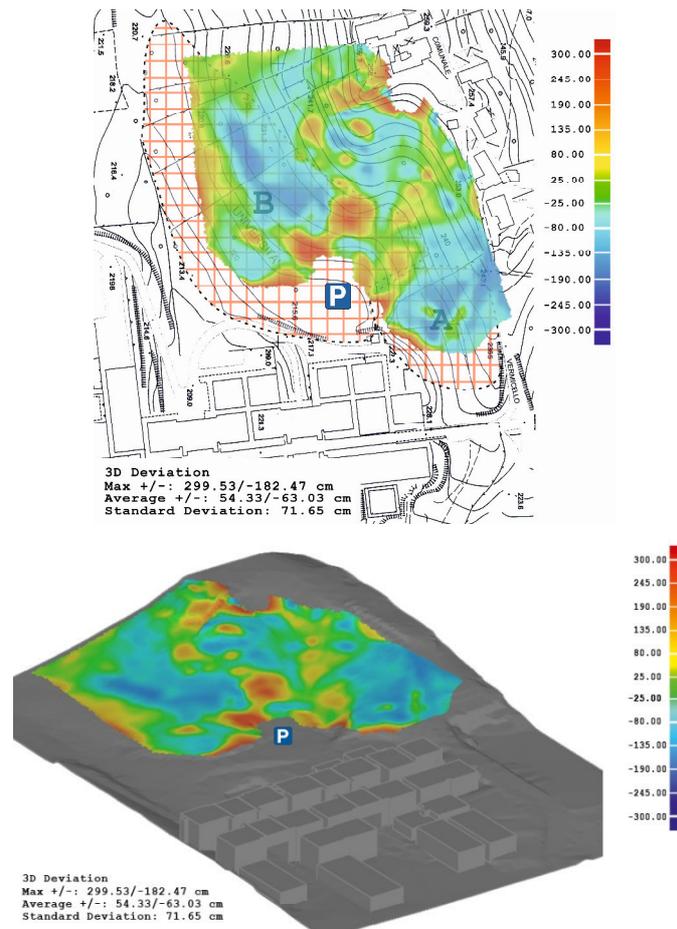


*Figura 5.8 Modello del terreno ottenuto con Laser Scanner. Immagine tratta (tesi PhD S. Artese 2016)*



*Figura 5.9 Modello ottenuto dalla cartografia 1:10000. Immagine tratta (tesi PhD S. Artese 2016)*

L'indagine è stata condotta in un solo giorno, eseguendo due scansioni da due stazioni, con una risoluzione di 10 cm ad una distanza di 100 m. Per la lavorazione sono state utilizzate delle nuvole di punti con il software Riegl RiSCAN Pro® (Artese e al.2015). Ricostruita la nuvole di punti, tramite opportuno filtraggio, si è proceduti alla ricostruzione delle due frane. Dal confronto tra i due modelli, è stato possibile fare alcune osservazioni. Nella figura 5.10, le due frane sono riconoscibili, e sono riconoscibili i punti di accumulo del materiale rimaneggiato dalla frana:



*Figura 5.10 Comparazione dei due modelli: Quello ottenuto tramite ricostruzione 3D a sinistra, e quello con rilievo Laser Scanner a destra. Immagine tratta (tesi PhD S. Artese 2016)*

La precisione dei risultati dipende fondamentalmente quello della cartografia. Possiamo valutare una precisione del risultato finale di circa 25 cm. L'indagine può essere utilizzata anche per studi e analisi dell'evoluzione della zona o per monitorare eventi di collasso aggiuntive: attraverso i dati acquisiti in tempi diversi è possibile esaminare l'evoluzione del fenomeno. Dal modello 3D ottenuto dalle scansioni, è possibile ricavare una serie di entità geometriche quali polilinee e linee di contorno, che possono essere esportati e riutilizzati in un programma CAD e consentire la valutazione delle distanze, volumi, traiettorie e l'interazione tra vari elementi [Hoffmeister et al., 2012].

## Capitolo 6

### Routine MatLab® per analisi dati HVSR

Per verificare i risultati ottenuti in precedenza, è stato sviluppato, una procedura di calcolo in linguaggio Matlab® basata sulle assunzioni del codice “*Model HVSR di Herak (2008)*”. Tutto ciò, può essere utilizzato come un confronto con i dati ottenuti dal software *Geopsy.org (Grenoble 2008)*.

I risultati, mostrano come il codice consenta una modellizzazione che è in grado di ricostruire molto bene il picco caratteristico della funzione H/V sia in ampiezza che in frequenza; tuttavia, la curva H/V contiene dei picchi multipli dovuti alla mancanza di filtraggio del segnale e alla presenza delle onde di volume che entrano nel segnale acquisito. Si tratta, quindi, di una procedura meno raffinata ma comunque utile ad una definizione qualitativa della frequenza di risonanza di un sito o di una struttura tramite tecnica HVSR.

Lo script esegue le seguenti operazioni:

- Lettura dei parametri del sottosuolo contenuti in una matrice o in foglio di calcolo Excel.
- Definire un intervallo di frequenza dello script.
- Calcolo e visualizzazione degli spettri di ampiezza delle onde S e P;
- Calcolo e visualizzazione della funzione H/V ottenuta per il set di parametri inserito;

La funzione H/V, rappresentata dai rapporti spettrali, può presentare dei massimi tendenti ad infinito in funzione di ciò che lo spettro della componente verticale può contenere valori in ampiezza molto piccoli rispetto ai valori in ampiezza dello spettro della componente orizzontale. La divisione spettrale può quindi essere considerata come un problema, in cui piccole variazioni nei dati di ingresso (l'ampiezza spettrale H) possono comportare enormi variazioni nei risultati (la funzione H/V). E' quindi necessario utilizzare delle funzioni di regolarizzazione, quali i vari filtri, che

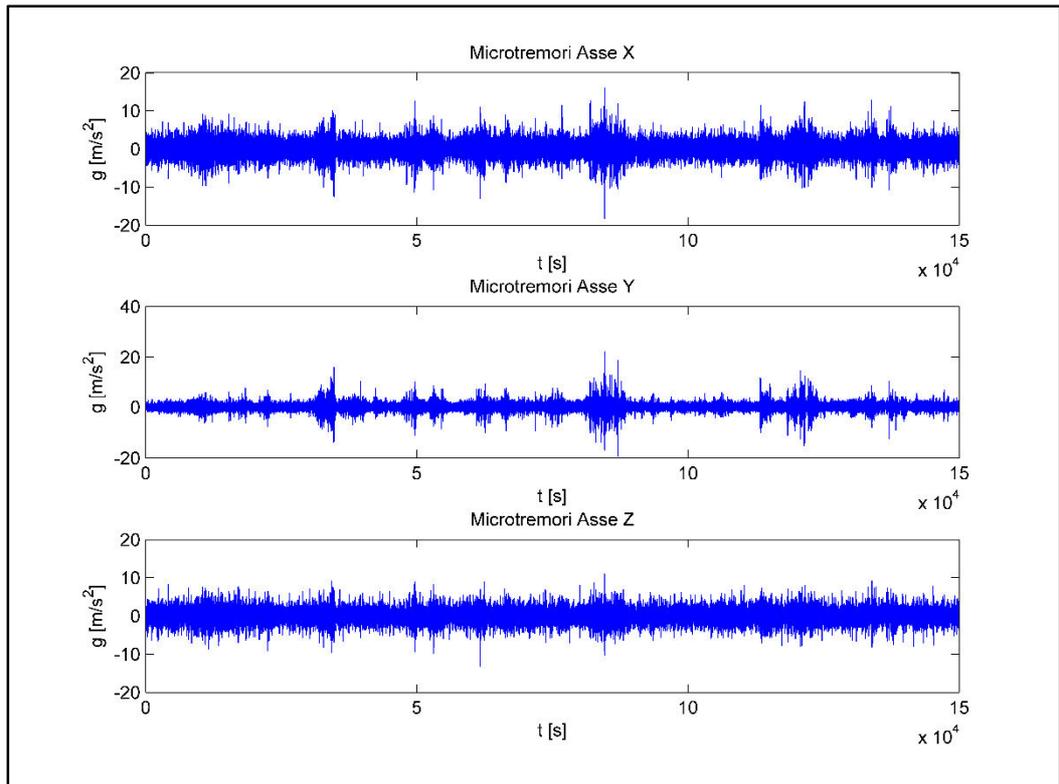
modificando lo spettro verticale prima del calcolo del rapporto spettrale conducono ad una stabilizzazione del risultato. Gli aspetti teorici alla base di questi metodi sono riportati in Appendice C.

Lo script è caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:

1. Lettura delle serie temporali (Fig.6.1)
2. Trasformate di Fourier con Calcolo degli Spettri di Ampiezza e di Fase (Fig. 6.2)
3. Visualizzazione degli Spettri di Ampiezza
4. Calcolo del Rapporto Spettrale H/V (Fig. 6.3)
5. Selezione di un intervallo di frequenze di interesse
6. Applicazione del filtraggio.
7. Visualizzazione dei risultati ottenuti

Nella prima parte dell'esecuzione che precede l'applicazione dei metodi di regolarizzazione vengono utilizzate alcune semplici funzioni di MatlabR:

- `fft` per il calcolo della trasformata di Fourier delle tracce in tempi;
- `abs` e `angle` per il calcolo dello spettro di ampiezza e fase delle tracce in frequenza;
- `sqrt((ampEW2)+(ampNS2)/2)` per il calcolo della media geometrica della componente orizzontale dalle componenti est-ovest e nord-sud;
- `HVSR = ampH/ampV` per il calcolo del rapporto spettrale;



*Figura 6.1 Lettura segnali acquisiti senza filtraggio.*

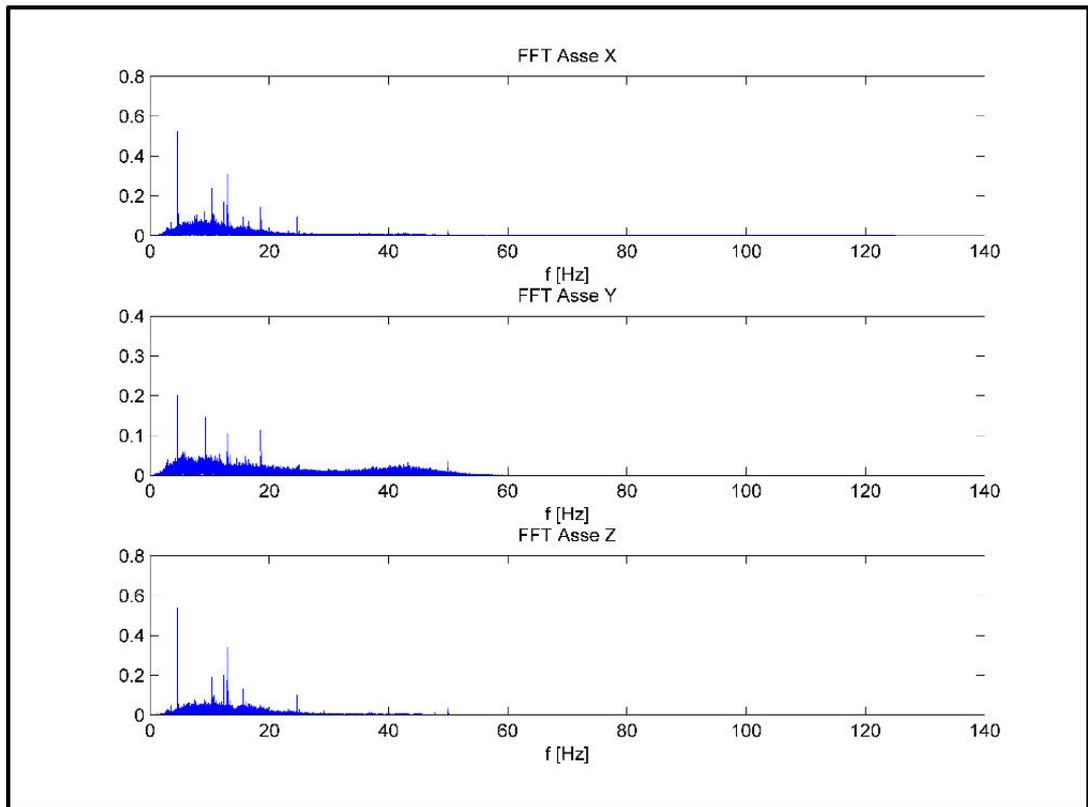


Figura 6.2 FFT segnale acquisito, rispetto l'asse X, Y, Z

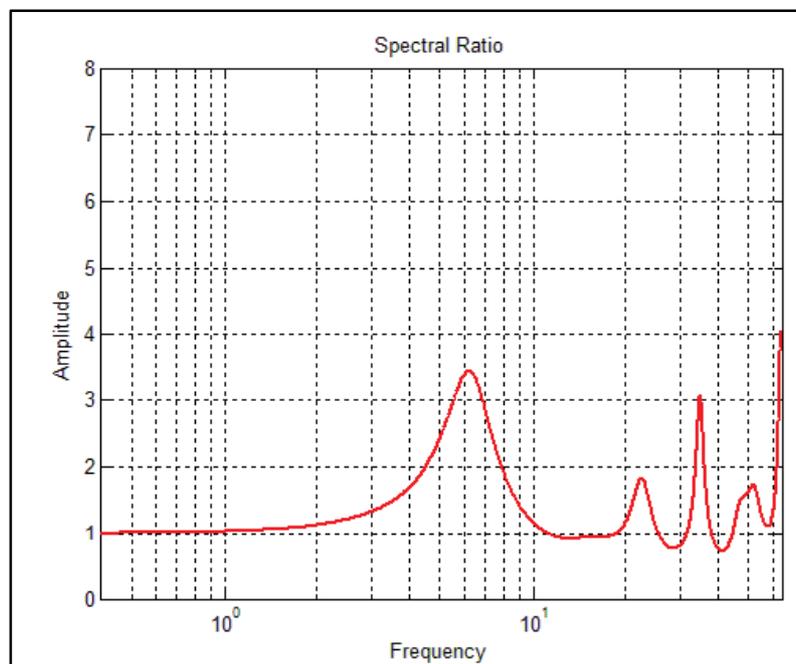


Figura 6.3 Rapporto H/V ottenuto elaborando i dati in esame.



## Conclusioni

Tutti i risultati ottenuti e analizzati nell'ambito di tali tesi di dottorato, evidenziano che la metodologia proposta, in particolare la misura dei rapporti spettrali H/V può essere utilmente impiegata come strumento di supporto alle decisioni. In particolare, la metodologia consente una valutazione rapida ed economica di indicatori collegati alla danneggiabilità degli edifici ed è adatta a definire delle strategie di mitigazione di rischio sismico anche sul territorio.

In difformità di altre metodologie di studi indiretti, quali ad esempio modellazioni FEM (Elementi finiti) o delle formulazioni empiriche, il metodo dei rapporti spettrali H/V, consente di ottenere degli indicatori di vulnerabilità misurati direttamente sulla struttura o su gli impalcati, e che pertanto sono soggetti al solo errore di misura e non a tutta la catena di incertezze che caratterizzano i metodi indiretti.

Il confronto dei dati ottenuti, tra il metodo geofisico-strumentale e con quelli dei metodi basati su simulazioni numeriche quali analisi FEM, suggerisce la possibilità di sfruttare le misure di rumore ambientale anche per la caratterizzazione speditiva delle caratteristiche globali degli edifici. Il metodo può essere anche usato per valutazioni post-evento finalizzate ad individuare le variazioni di comportamento sismico associate a fenomeni di danneggiamento strutturale.

Pur essendo un metodo speditivo ha il privilegio di essere affidabile e diretto e, in quanto strumentale, consente una lettura della realtà che non risente delle ipotesi che necessariamente devono essere poste alla base dei modelli di calcolo per ottenere, per via indiretta, una quantificazione degli stessi indicatori.

Pertanto, bisogna sottolineare che il metodo geofisico-strumentale H/V non può e non deve sostituirsi a valutazioni e calcoli strutturali o a prove dinamiche attive, né tanto meno è in grado di identificare direttamente quali siano le eventuali carenze strutturali di un edificio in termini di risposta sismica. Particolare attenzione deve essere posta alla corretta progettazione della campagna di misure e al posizionamento degli strumenti onde evitare erronee interpretazioni delle misure effettuate. Deve pertanto essere visto ed utilizzato come "strumento", da utilizzare con competenza, per la rapida "caratterizzazione" degli indicatori associati ad una maggiore o minore propensione delle strutture a subire danni in caso di terremoto, o per accertare variazioni di comportamento tra il prima e il dopo terremoto legate al danneggiamento sismico.

Alla luce di quanto esposto, il metodo di analisi spettrale HVSR appare decisamente utile nella definizione delle frequenze di risonanza di un sito e di una struttura. Si è visto che, anche con uno strumento sperimentale variando la tipologia di analisi, e variando la tipologia di sorgente, il rapporto H/V resta stabile mostrando sempre frequenze di picco uguali o che rientrano in un ristretto intervallo caratteristico del sito o della struttura misurati.

Questa informazione è molto importante per studi di microzonazione sismica, che ha per obiettivo principale quello di definire delle mappe di comportamento sismico omogeneo dei suoli basate sulla risposta sismica locale. Inoltre, è stato mostrato che dalle funzioni H/V è possibile ricavare informazioni sulla distribuzione delle velocità delle onde S negli strati, creando quindi un modello del sottosuolo, oppure nel caso di movimenti franosi, può essere utile per capire i contrasti d'impedenza sismica tra i vari sismostrati.

Sono evidenti i vantaggi nel condurre un'indagine HVSR con strumenti portatili. Le misure sono veloci (20- 30 min circa), l'elaborazione è semplice e vi sono diversi programmi a disposizione anche open free, quali ad esempio *Geopsy*. Inoltre, è stato appositamente ricreato uno *script* di modellazione diretta che ricostruisce la funzione H/V a partire da un modello del sottosuolo definito prendendo spunto dalla routine Model HVSR di Herak. Inoltre, le procedure di acquisizione, calcolo ed interpretazione sono ben codificate tramite le raccomandazioni ed indicazioni fornite dalle linee guida *SESAME*.

Quindi, vi sono sempre più strumenti utili per la definizione delle microzone a comportamento sismico omogeneo e data l'economicità del metodo descritto ci si augura che le misure HVSR si diffondano rapidamente andando ad ampliare le conoscenze attuali sul territorio e permettendo agli enti preposti di compiere delle scelte costruttive e di intervento edilizio che facciano riferimento alla risposta sismica locale in modo da operare maggiormente nel campo della prevenzione del rischio piuttosto che nel campo della gestione delle emergenze.

Il modello concettuale proposto e più in generale l'approccio metodologico - strumentale illustrato rappresentano un primo passo di un processo ampio e complesso di valutazione quantitativa e puntuale delle pericolosità geologiche che interessano un territorio, modellizzando sia le componenti naturali geologiche, sia quelle antropiche. Nel futuro si potrà pensare ad un miglioramento meccanico dello strumento sperimentale costruito per le misure HVSR, in modo da avere una maggiore fruibilità

di tale strumento. Inoltre, si potrà creare una banca dati GIS in modo da avere una protezione e condivisione dei risultati ottenuti o degli stessi dati, per andare ad esempio a costituire quello che attualmente si chiama “carta d’identità” di una struttura.

## Ringraziamenti

---

Non è facile citare e ringraziare, in poche righe, tutte le persone che hanno contribuito alla nascita e allo sviluppo di questa tesi di dottorato: chi con una collaborazione costante, chi con un supporto morale o materiale, chi con consigli e suggerimenti o solo con parole di incoraggiamento, sono stati in tanti a dare il proprio apporto a questo lavoro.

Ringrazio il tutor della mia tesi, il prof. Raffaele Zinno, per la disponibilità e il sostegno, per i consigli e i pareri sia di carattere scientifico e sia di carattere umano.

Ringrazio il coordinatore della Scuola di Dottorato, Prof. Vincenzo Carbone, per la disponibilità avuta. Ringrazio tutto il laboratorio SmartLab presso l'Università della Calabria dipartimento Dimes, per avermi dato il supporto tecnico e scientifico, per il prezioso aiuto di tutti i dati forniti durante la mia ricerca e per la loro amicizia.

Un doveroso ringraziamento va ad Angelo Dolmetta e l'Ing. Corrado Pecora, per i preziosi aiuti avuti sulla costruzione del sismografo sperimentale. Grazie anche allo studio Prospezioni S.r.l per aver messo a disposizione il loro strumento professionale.

Vorrei ringraziare l'Ing. Serena Artese per la collaborazione durante l'indagine Laser Scanner della frana di Vermicelli; l'Ing. A. Madeo, Ing. Angela Miceli, Ing. Pamela Bartucci, e Ing. Assunta Venneri per i lavori sui viadotti; Ing. Giuseppe Zagari e Giovanni Zucco per la modellazione agli elementi finiti del ponte Caprovidi; L' Ing. Sebastiano Meduri per il lavoro inestimabile con Matlab®. Il collega geologo Gabriele Clausi, per i suoi preziosi aiuti, nei rilievi sui viadotti.

Un ringraziamento ai miei colleghi di dottorato, per essermi stati vicini sia nei momenti difficili, sia nei momenti felici: sono stati per me vere amiche che semplici colleghe, in particolare, Chiara Miceli, Francesca Ansioso, Serena Artese e Katy Scortecci.

Un sentito ringraziamento ai miei genitori, che, con il loro incrollabile sostegno morale, mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo. Un grazie particolare anche ai miei fratelli e alle mie cognate.

A conclusione di questo lavoro è doveroso porre i miei più sentiti ringraziamenti alle persone che ho avuto modo di conoscere in questo importante periodo della mia vita e che mi hanno aiutato a crescere sia dal punto di vista intellettuale sia dal punto di vista umano.

ABAQUS 6.14 *Analysis User's Manual*.

Abdel, M. (2011). *3d laser scanners: history, applications, and future*.  
<http://documents.mx/documents/3d-laser-scanner-article-review.html>

Achilli, V., Carrubba, P., Fabris, M., Menin, A., & Pavanello, P. (2015). *An archival geomatics approach in the study of a landslide*. *Applied Geomatics*, 1-11

Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 35, 415-457

Aki, K., 1965, A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 30, 4, 665-666

Albarello D., Mantovani E., Viti M. (1997): Finite element modeling of the present deformation pattern in the Calabrian arc and surrounding regions. *Annali di Geofisica*, 40, 4, 833-848.

Albarello D. (1999). Comunicazione al Workshop “Caratteri sismogenetici del territorio italiano” In Progetto GNDT 5.1.1., zone sismogenetiche e probabilità degli eventi associati, U.R. UNI SI Analisi della sismicità su base statistica, Roma

AMODIO-MORELLI L., BONARDI G., COLONNA V., DIETRICH D., GIUNTA G., IPPOLITO F., LIGUORI V., LORENZONI S., PAGLIONICO A., PERRONE V., PICCARRETA G., RUSSO M., SCANDONE P., ZANETTIN-LORENZONI E. & ZUPPETTA A. (1976) - *L'Arco Calabro-Peloritano nell'orogene appennino-maghrebide*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 17, 1-60.

Anderson J.G., 2007. Physical processes that control strong ground motion, in *Treatise on Geophysics*, vol. 4, Ed. G. Schubert, H. Kanamori, Elsevier, Amsterdam.

Ansioso, F., Artese, S., Magarò, F., Miceli, A., Miceli, C., Talarico, P., Venneri, A., Zagari, G., Zinno, R. (2015). *Un GIS per la conservazione e la valorizzazione dell'antica via Annia-Popilia* - GIS Day Calabria 2015 VI Edizione - ISBN: 978-88-941338-0-6

Ambraseys, N.N., Douglas J., Sarma S.K. and Smit P.M., 2005a, Equations for estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: horizontal peak

ground acceleration and spectral acceleration, *Bull. of Earthquake Eng.*, 3, 1-53

Arai, H., and Tokimatsu K., 1998, Evaluation of local site effects based on microtremor H/V spectra, *Proc. of the Second International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, Japan, 2, 673-680

Arai, H. and Tokimatsu K., 2000, Effects of Rayleigh and Love waves on microtremor H/V spectra, *Proc. Of the 12th World Conf. On Earthquake Engineering*, 2232/4/A

Artese, G., Perrelli, M., Artese, S., Manieri, F., & Principato, F. (2013, February). *The contribute of geomatics for monitoring the great landslide of Maierato, Italy*. In International Workshop" The Role of Geomatics in Hydrogeological Risk (pp. 27-28).

Artese, G., Perrelli, M., Artese, S., Meduri, S., & Brogno, N. (2015). *POIS, a Low Cost Tilt and Position Sensor: Design and First Tests*. *Sensors*, 15(5), 10806-10824.

Artese, S., Miceli, A., Talarico, P., Venneri, A., Zagari, G., Zinno, R. (2015). *Ponti antichi e moderni: utilizzo di tecniche geomatiche per il rilievo, la rappresentazione e la modellazione strutturale*. Atti 19a Conferenza Nazionale ASITA, 29-30 Settembre - 1 ottobre 2015, Lecco - Polo di Lecco del Politecnico di Milano - ISBN 978-88-941232-2-7

Athanasopoulos, G.A., Pelekis P.C. and Anagnostopoulos G.A., 2000, Attenuation of RayleighWave Surface Motion Due to Material Damping: Effect of Soil Stiffness From Field Measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 4, 277-288

Asten, M.W., 1978, Geological control of the three-component spectra of rayleigh-wave microseisms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 1623-1636

Asten, M.W. and Henstridge J.D., 1984, Array estimators and use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins, *Geophysics*, 49, 1828-1837

Athanasopoulos, G.A., Pelekis P.C. and Anagnostopoulos G.A., 2000, Attenuation of RayleighWave Surface Motion Due to Material Damping: Effect of Soil Stiffness From Field Measurements, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19, 4, 277-288

- Banerji, S. K., 1924, Microseisms associated with the incidence of the south-west monsoon, *Nature*, 14, 576
- Baratta M. (1910). La catastrofe sismica Calabro-Messinese (28 dicembre 1908). *Società Geografica Italiana, Roma*, 458 p.
- Bard, P.-Y., 1994, Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues, *Proc. of the 10th European Conf. on Earthquake Engineering*, Vienna, 305-323.
- Bard, P.-Y., 1998, Microtremor measurements: A tool for site effect estimation ?, *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, Japan, 3, 1251-1279
- Barstow, N., Sutton G. H. and Carte J. A., 1989, Particle motion and pressure relationships of ocean bottom noise: 3900 m depth; 0.003 to 5 Hz, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1185-1188
- Bedon, C., & Morassi, A., 2014. *Dynamic testing and parameter identification of a base-isolated bridge*. *Engineering Structures*, 60, 85-99.
- Benedettini, F., Dilena, M., & Morassi, A., 2015. *Vibration analysis and structural identification of a curved multi-span viaduct*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 54, 84-107.
- Berger, J., Davis P. and Ekström G., 2004, Ambient Earth noise: A survey of the Global Seismographic Network, *J. of Geophys. Res.* 109, B11307, 10
- Bindi, D., Parolai S., Enotarpi M., Spallarossa D., Augliera P. and Cattaneo M., 2001, Microtremor H/V spectral ratio in two sediment-filled valleys in western Liguria (Italy), *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, 3-4, 305-315.
- Bonnefoy-Claudet, S., 2004, Nature du bruit de fond sismique: implication pour les études des effets de site, *PhD thesis Université Joseph Fourier (LGIT)*, Grenoble, France
- Bossolasco, M., Cavo A. and Dagnino I., 1957, Sulla genesi dei microsismi, *Pure and Applied Geophysics*, 38, 1, 45-56

- Bradley, C. R., Stephen R. A., Dorman L. M. and Orcutt J. A., 1997, Very low frequency (0.2- 10.0 Hz) seismoacoustic noise below the seafloor, *J. Geophys. Res.*, 102, 11, 703-718
- Bromirski, P. D., Flick R. E. and Graham N., 1999, Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific, *J. Geophys. Res.*, 104, 20, 753-766
- Capon, J., 1969, High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proc. IEEE*, 57, 8, 1408-1418
- Capon, J., Greenfield R. J. and Kolker R. J., 1967, Multidimensional Maximum-Likelihood Processing of a Large Aperture Seismic Array, *Proceedings IEEE*, 55, 2
- Castellaro S., Mulargia F., 2009a. VS30 estimates using con-strained H/V measurements, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**, 761–773.
- Castellaro S., Mulargia F., 2009b. The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.*, **166**, 567–592.
- Castellaro S., Mulargia F., 2010. How Far from a Building Does the Ground-Motion Free-Field Start The Cases of Three Famous Towers and a Modern Building, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2080-2094.
- Castellaro S., Mulargia F., 2011. Seismic soil classification from a different perspective, Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Convertito V., De Matteis R., Romeo A., Zollo A., Iannaccone G. (2007). *Strong motion relation for early warning applications in the Campania Region (southern Apennines), Italy*. In: Gasparini et al (eds). Earthquake early warning systems. Springer-Verlag, Berlino.
- Convertito, V., Iervolino I., Manfredi G., Zollo A. (2008). *Prediction of response spectra via real-time earthquake measurements*. *Soil Dyn. Earthquake Eng.* 28: 492–505.
- Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58(5):1583-1606.
- Dahm, T., Tilmann F. and Morgan J. P., 2006, Seismic broadband ocean-bottom data and noise observed with free-fall stations: experiences from

long-term deployments in the North Atlantic and the Tyrrhenian Sea, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, 2, 647-664

D'Alema, E. and Marzorati S., 2004, Metodologie per l'installazione e la gestione delle stazioni sismiche Mars88 Modem Control, *Rapporti Tecnici INGV*, 21

Derode, A., Larose E., Campillo M. and Fink M., 2003, How to estimate the Green's function of a heterogeneous medium between two passive sensors? Application to acoustic waves, *Applied Physics Letters*, 83, 3054–3056.

Dobrin, M. and Savit C. H., 1998, Introduction to geophysical prospecting, Mc- Graw Hill BookCo.,

Douglas, J. (2003). *Earthquake ground motion estimation using strong-motion records: A review of equations for the estimation of peak ground acceleration and response spectral ordinates*. *Earth Science Reviews* 61: 43–104.

Dorman, L. M., Schreiner A. E. and Bibee L.B., 1991, The effects of shear velocity structure on seafloor noise, in *Shear Waves in Marine Sediments*, ed. Hovem, M., et al., Kluwer Acad., Norwell, Mass, 239-245.

Douze, E. J., 1964, Rayleigh waves in short-period seismic noise, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 54, 4, 1197-1212

Douze, E. J., 1967, Short-period seismic noise, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 57, 1, 55-81

Dravinski, M., Ding G. and Wen K.L., 1996, Analysis of spectral ratios for estimating ground motion in deep basins, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 646-654

Duvall, T. L., Jefferies S. M., Harvey J. W. and Pomerantz M. A., 1993, Time distance helioseismology, *Nature*, 362, 430–432

Earle, P. S., 1999, Polarization of the Earth's teleseismic wavefield, *Geophys. J. Int.*, 139, 1-8

Elgar, S., Herbers T. H. C. and Guza R. T., 1994, Reflection of ocean surface gravity waves from a natural beach, *J. Phys. Oceanogr.*, 24, 1503-1511

Emolo, A., Cultrera G., Franceschina F., Pacor F., Convertito F., Cocco M., and Zollo A. (2008). *Ground motion scenarios for the 1997 Colfiorito, central Italy, Earthquake*. *Annals of Geophysics* 51: 509–525.

EN 1998-5 (2005). Eurocodice 8 (EC8). *Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici*, UNI EN 1998-5, Gennaio 2005.

European Committee for Standardization, 2002, Design provisions for earthquake resistance of structures: Seismic actions and general requirements of structures, *Draft CEN/TC 250*, ENV 1998-1-1, EUROCODE 8, Brussels, May.

Faccioli E., Paolucci R. (2005). *Elementi di sismologia applicata all'ingegneria*. Pitagora Ed., Bologna, Italy, 280 pp.

Gasparini, P., Manfredi, G., Zschau, J. (2007). *Earthquake Early Warning Systems*. Springer, ISBN: 978-3-540-72240-3.

Gruppo di lavoro GNDT-ING-SSN (1996). Risultati dell'analisi di rischio sismico per tutta la nazione riferita al patrimonio abitativo.

Gruppo di lavoro per la riclassificazione sismica (1999). Proposta di riclassificazione sismica del territorio nazionale. *Ingegneria sismica*, n. 1, 5-14.

IBC (2006). *International Building Code*, International Code Council (ICC) Inc.

INGV – Cataloghi Sismici  
INGV - ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA  
(2002) - *Bollettino Sismico*.

Int. Geot. Ass.,TC4 (1999)

Iervolino I., Convertito V., Giorgio M., Manfredi G. And Zollo A. (2006) *Real Time Risk Analysis For Hybrid Earthquake Early Warning Systems*, *Journal Of Earthquake Engineering*, 10(6): 867–885.

Iervolino, I., Giorgio, M., Galasso, C. and Manfredi G. (2009). *Uncertainty in early warning predictions of engineering ground motion parameters: What really matters* *Geophys. Res. Lett.* 36, L00B06, doi: 10.1029/2008GL036644.

Gallipoli, M. R., Mucciarelli M., Castro R. R., Monachesi G., Contri P., 2004, Structure, soil structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratio of microtremors, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 , 6, 487-495

Gallipoli, M. R., Mucciarelli M., Vona M., 2006, Stima di alcuni parametri principali degli edifici con metodi speditivi, *XXV Convegno Nazionale GNGTS*, Roma, 28-30 novembre 2006

Gerstoft, P., Sabra K.G., Roux P., Kuperman W.A. and Fehler M.C., 2006, Gren's functions extraction and surface-wave tomography from microseisms in southern California, *Geophysics*, 71, 4, 23-32

Gladwell, G. M., & Morassi, A., 2011. *Dynamical Inverse Problems: Theory and Application: Theory and Application* (Vol. 529). Springer Science & Business Media.

Gutenberg, B., 1912, Die seismische Bodenunruhe (in German), *Betr. Z. Geophys.*, 11, 314-353

Imregun, M., & Visser, W. J., 1991. *A review of model updating techniques*. The Shock and vibration digest, 23(1), 9-20.

Haubrich, R. A. and McCamy K., 1969, Microseisms: Coastal and pelagic sources, *Rev. Geophys.*, 7, 539-571

Huang, C. S., Yang, Y. B., Lu, L. Y., & Chen, C. H., 1999. *Dynamic testing and system identification of a multi span highway bridge*. Earthquake engineering & structural dynamics, 28(8), 857-878.

Kanai, K. and Tanaka T., 1961, On microtremors, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 8, 39, 97-114

Kanai, K., Tanaka T. and Oada K., 1954, On microtremors, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 32

Kibblewhite, A. C. and Ewans K. C., 1985, Wave-wave interactions, microseisms, and infrasonic ambient noise in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 78, 981-994

Kibblewhite, A. C. and Wu C. Y., 1991, The theoretical description of wave-wave interactions as a noise source in the ocean, *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, 2241-3352

- Kibblewhite, A. C., and Wu C. Y., 1993, An analysis of the ULF acoustic noise field in the ocean, in *Natural Physical Sources of Underwater sound*, ed. B. Kerman, Springer, New York, 189-202
- Komen, G. J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. and Janssen P. A. E. M., 1994, *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge Univ. Press, New York, 532
- Konno, K. and Ohmachi T., 1998, Ground-Motion Characteristic Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, 228- 241
- Kosovichev, A. G., Duvall T. L. and Scherrer P. S., 2000, Time-distance inversion methods, *Sol. Phys.*, 192, 159–176
- Kramer S.L (1996) – *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington, Prentice Hall
- Kudo K. (1995) – *Practical estimates of site response. State of the art report*. Proceedings of the fifth International Conference on Seismic Zonation. Nice, France
- Lacoss R. T., Kelly E. J. and Nafi T.M., 1969, Estimation of seismic noise structure using arrays, *Geophysics*, 34, 1, 21-38
- K. TERZAGHI, R.B. PECK – *Geotecnica*. UTET, Torino.
- La Rocca M., Galluzzo D., Saccorotti G., Tinti S., Cimini G. B., Del Pezzo E. (2004). Seismic signals associated with landslides and with a tsunami at Stromboli volcano. Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94 (5), 1850-1867.
- Lee W., Trifunac M.D., 2010. Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1250-1258.
- Lermo J., Chavez-Garcia F. J., 1993, Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594
- Lermo, J. and Chávez-García F.J., 1994, Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 1350-1364
- Longuet-Higgins, M. S., 1950, A theory of the origin of microseisms, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 243, 857, 1-35

- Malischewsky P. and Scherbaum F., 2004, Love's formula and H/V-ratio (ellipticity) of Rayleigh waves, *Wave Motion*, 40-1, 57-67
- Marzorati, S. and Bindi D., 2006, Ambient noise levels in north central Italy, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q09010, doi:10.1029/2006GC001256
- MORETTI A., COREA I. & GUERRA I. (1990) - *Sismicità attuale e sistemi di fratture superficiali in Calabria*. Atti del Convegno GNDDT, 1, 89-101.
- MORETTI A. & GUERRA I. (1997) - *Tettonica dal Messiniano ad oggi in Calabria: implicazioni sulla geodinamica del sistema Tirreno-Arco Calabro*. Boll. Soc. Geol. It., 116, 125-142.
- Mottershead, J. E., & Friswell, M. I., 1993. *Model updating in structural dynamics: a survey*. Journal of sound and vibration, 167(2), 347-375.
- Morassi, A., & Tonon, S., 2008. *Dynamic testing for structural identification of a bridge*. Journal of bridge engineering, 13(6), 573-585.
- Mucciarelli, M., Gallipoli M. R., 2006, Estimate of frequency and damping for large sets of building in dense urban area, *Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 211, 3-8 September 2006, Geneva, Switzerland
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 1, 25-30
- Nakamura, Y., 1996, Real-time information systems for hazards mitigation, *Proc. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico
- Nakamura, Y., 2000, Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand
- Nakamura, Y. and Gurler E.D., Saita J., 1999, Dynamic Characteristics of Leaning Tower of Pisa Using Microtremor-Preliminary Results, *Proc. 25th JSCE Earthquake Eng. Symposium*, 2, 921-924

Nakamura, Y. and Samizo M., 1989, Site Effect Evaluation of Surface Ground using Strong Motion Records (in Japanese), *Proc. 20th JSCE Earthquake Eng. Symposium*, 133-136

Nakamura, Y. and Takizawa T., 1990, Evaluation of Liquefaction of Surface Ground using Microtremor (in Japanese), *Proc. 45th Annual Meeting of JSCE*, I, 519, 1068-1069

Nogoshi, M. and Igarashi T., 1971, On the amplitude characteristics of microtremor (part2), *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40 (in Japanese with English abstract)

Ntotsios, E., Karakostas, C., Lekidis, V., Panetsos, P., Nikolaou, I., Papadimitriou, C., & Salonikos, T., 2009. *Structural identification of Egnatia Odos bridges based on ambient and earthquake induced vibrations*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(2), 485-501.

NTC 2008 – Norme tecniche per le Costruzioni DM 14-01-2008

Nunziata C., De Nisco G., Imperio F., Natale M. (2007). Centro specializzato monitoraggio zonazione sismica.

O'Connor, S. M., Lynch, J. P., & Gilbert, A. C., 2014. *Compressed sensing embedded in an operational wireless sensor network to achieve energy efficiency in long-term monitoring applications*. *Smart Materials and Structures*, 23(8), 085014.

Onde di Superficie in Geofisica Applicata. Dal Moro. Dario Flaccovio Editore.

Okada, H., 2003, The Microtremor Survey Method, *Geophys. Monograph Series*, SEG, 129

Parolai, S., Richwalski S. M., Milkereit C. and Bormann P., 2004, Assessment of the stability of H/V spectral ratios from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany), *Tectonophysics*, 390, 57-73

Peterson, J., 1993, Observations and modeling of seismic background noise, *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.*, 93-322

Peeters, B., & Ventura, C. E., 2003. *Comparative study of modal analysis techniques for bridge dynamic characteristics*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(5), 965-988.

Picozzi, M., Milkereit, C., Zulfikar, C., Fleming, K., Ditommaso, R., Erdik, M., & Apaydin, N., 2010. *Wireless technologies for the monitoring of strategic civil infrastructures: an ambient vibration test on the Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge in Istanbul, Turkey*. Bulletin of Earthquake Engineering, 8(3), 671-691.

Plesinger, A. and Wielandt E., 1972, Preliminary results of the investigation of the 2 cps ambient earth noise at European sites, *Europ. Seism. Sic.*, Brasov

Plesinger, A. and Wielandt E., 1974, Seismic noise at 2 Hz in Europe, *J. Geophys.*, 40, 131- 136

Romeo R. and A. Pugliese (1998). *A global earthquake hazard assessment of Italy*. Proc. Of 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, Balkema.

Ribeiro, D., Calçada, R., Delgado, R., Brehm, M., & Zabel, V., 2012. *Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters*. Engineering Structures, 40, 413-435.

Sakaji, K., 1998, Temporal variation of the power spectra of microtremors observed at soil and rock sites, *Graduation thesis, Hokkaido University* (in Japanese)

SESAME European project, 2003, Nature of noise wavefield, *Final Report WP08*.

SESAME European project, 2005, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation, *Deliverable D23.12*

Semblat, J.F., Duval A.M., Dangla P., 2002, Seismic site effects in a deep alluvial basin: numerical analysis by the boundary element method, *Computers and Geotechnics*, 29, 573-585

Schlune, H., & Plos, M., 2008. *Bridge Assessment and Maintenance based on Finite Element Structural Models and Field Measurements*. Chalmers University of Technology.

Schmidt, R.O., 1981, A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation, *PhD thesis Stanford University*, Stanford, CA

Snieder, R., 2004, Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *Phys. Rev., E*, 69, 046610, doi:10.1103/PhysRevE.69.046610.

SORRISO-VALVO M., TANSI C. & ANTRONICO L. (1996) – *Relazione tra frane, forme del rilievo e strutture tettoniche nella media valle del Fiume Crati (Calabria)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **19**, 107-117.

Stephen, R. A., Spiess F. N., Collins J. A., Hildebrand J. A., Orcutt J. A., Peal K. R., Vernon F. L. and Wooding F. B., 2003b, Ocean Seismic Network Pilot Experiment, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4, 10, 1092, doi:10.1029/2002GC000485

Sutton, G. H. and Barstow N., 1990, Ocean-bottom ultralow-frequency (ULF) seismoacoustic ambient noise: 0.002 to 0.4 Hz, *J. Acoust. Soc. Am.*, 87, 5, 2005-2011

Tanimoto, T., Ishimaru S. and Alzivuri C., 2006, Seasonality in particle motion of microseisms, *Geophys. J. Int.*, 166, 253-266

Tokimatsu, K., 1995, Geotechnical site characterization using surface waves, *Earthquake Geotechnical Engineering*, ed. Ishihara, Balkema, Rotterdam, 1333-1368

Toksoz, M. N. and Johnston D. H., 1981, Seismic Wave Attenuation, *Geophys. Reprint Ser.*, 2,459, soc. Of Explor. Geophys., Tulsa, Okla

Toksoz, M. N., Johnston D. H. and Timur A., 1979, Attenuation of seismic waves in dry saturated rocks: Laboratory measurements, *Geophysics*, 44, 681-690

Tolman, H. L., 1999, User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version 1.18, *Tech. Rep. Ocean Modeling Branch contribution*, NOAA/NWS/NCEP, 166

UNI 9614, 1990, Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo.

Tesi di Laurea Specialistica: Studio di un versante in frana – Analisi di Stabilità e caratterizzazione geotecnica– Magarò F. 2012

Tesi PhD: SURVEY, DIAGNOSIS AND MONITORING OF STRUCTURES AND LAND USING GEOMATICS TECHNIQUES: THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ASPECTS. Artese 2015.

Tesi PhD: Fenomenologia del noise sismico ambientale: dalla conoscenza del segnale alle applicazioni empiriche. S. Marzorati.

Ubertini, F., Gentile, C., & Materazzi, A. L., 2011. *On the automatic identification of modal parameters by subspace methods*. In 4<sup>th</sup> International Conference on Experimental Vibration Analysis of Civil Engineering Structures, Varenna, Italy.

Zanon, F. S., 1948, *Microsismi Meteorici, Pure and Applied Geophysics*, 12, 5-6, 200-209 Tinti S. and F. Mulargia (1985). *Completeness analysis of a seismic catalog*, *Ann. Geophys.* 3, 407-414.

Zollo, A. Iannaccone G., Satriano C., Weber E., Lancieri M. and Lomax A. (2005). *Earthquake Early Warning Workshop*, Caltech, Pasadena, July, 2005.

Zollo, A., Amoroso O., Lancieri M., Wu K. L., and Kanamori H. (2010). *A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks*, *Geophys. J. Int.* 183: 963–974, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04765.x

Zollo, A., Iannaccone G., Lancieri M., Cantore L., Convertito V., Emolo A., Festa G., Gallovic F., Vassallo M., Martino C. et al. (2009). *Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation*. *Geophys. Res. Lett.* 36: L00B07, doi:10.1029/2008GL036689.

Zinno R., F.Magarò. *On the monitoring of structures and soils by tomography. Earthquake Resistant Engineering Structures X – 2015 WIT PRESS vol.152*

Zinno R. & F.Magarò. *Monitoring of a bridge with passive seismic techniques: case studies. Heritage 2016 Lisbon – 5<sup>th</sup> International Conference on Heritage and Sustainable Development*

Wang, M., Lynch, J., & Sohn, H., 2014. *Sensor technologies for civil infrastructures* (Vol. 2). Applications in structural health monitoring.

## **Bibliografia**

---

### Siti Web:

[www.geopsy.org](http://www.geopsy.org)

<http://www.ingv.it/roma/reti/rms/bollettino/boll.htm>

[http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES\\_TechnicalDoc.htm](http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_TechnicalDoc.htm)

[http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/D13.08\\_finalreport.pdf](http://sesamefp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/D13.08_finalreport.pdf)

[http://www.dstn.it/ssn/PROG/G\\_RISCHI/index\\_f.html](http://www.dstn.it/ssn/PROG/G_RISCHI/index_f.html)

[www.pasisrl.it](http://www.pasisrl.it)

<http://pr5sit.regione.calabria.it> (Portale cartografico – Regione Calabria).

[www.theremino.com](http://www.theremino.com)

Wikipedia

## Allegati

### Allegato A

#### A LINEE GUIDA PER LE MISURE HVSR PROPOSTE DA SESAME

Viene riportato un estratto dalle linee guida per la realizzazione di una campagna di acquisizione di dati ed elaborazione tramite metodo H/V redatte all'interno di un progetto di ricerca europeo denominato SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations) basato su un lavoro di ricerca condotto da esperti del settore per la durata di tre anni. Le raccomandazioni fornite da queste linee guida rappresentano lo stato dell'arte della procedura di acquisizione ed elaborazione dei dati al quale si fa attualmente riferimento.

<p><b>Criteri per una curva H/V affidabile</b> [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]</p>	<p><math>f_0 &gt; 10 / L_w</math>  <math>n_c(f_0) &gt; 200</math>  <math>\sigma_N(f) &lt; 2</math> per <math>0.5f_0 &lt; f &lt; 2f_0</math> se <math>f_0 &gt; 0.5\text{Hz}</math>  <math>\sigma_N(f) &lt; 3</math> per <math>0.5f_0 &lt; f &lt; 2f_0</math> se <math>f_0 &lt; 0.5\text{Hz}</math></p>
<p><b>Criteri per un picco H/V chiaro</b> [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]</p>	<p>Esiste <math>f^-</math> in <math>[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math>          Esiste <math>f^+</math> in <math>[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math>  <math>A_0 &gt; 2</math>  <math>f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_N(f)] = f_0 \pm 5\%</math>  <math>\sigma_f &lt; \varepsilon(f_0)</math>  <math>\sigma_N(f_0) &lt; \theta(f_0)</math></p>

<p><math>L_w</math>  <math>n_w</math>  <math>n_c = L_w n_w f_0</math>  <math>f</math>  <math>f_0</math>  <math>\sigma_f</math>  <math>\varepsilon(f_0)</math>  <math>A_0</math>  <math>A_{H/V}(f)</math>  <math>f^-</math>  <math>f^+</math>  <math>\sigma_N(f)</math>  <math>\sigma_{\log H/V}(f)</math>  <math>\theta(f_0)</math></p>	<p>lunghezza della finestra          numero di finestre usate nell'analisi          numero di cicli significativi          frequenza attuale          frequenza del picco H/V          deviazione standard della frequenza del picco H/V          valore di soglia per la condizione di stabilità <math>\sigma_f &lt; \varepsilon(f_0)</math>          ampiezza media della curva H/V alla frequenza <math>f_0</math>          ampiezza media della curva H/V alla frequenza <math>f</math>          frequenza tra <math>f_0/4</math> e <math>f_0</math> alla quale <math>A_{H/V}(f^-) &lt; A_0 / 2</math>          frequenza tra <math>f_0</math> e <math>4f_0</math> alla quale <math>A_{H/V}(f^+) &lt; A_0 / 2</math>          deviazione standard di <math>A_{H/V}(f)</math>, <math>\sigma_N(f)</math> è il fattore per il quale la curva <math>A_{H/V}(f)</math> media deve essere moltiplicata o divisa          deviazione standard della funzione <math>\log A_{H/V}(f)</math>          valore di soglia per la condizione di stabilità <math>\sigma_N(f) &lt; \theta(f_0)</math></p>
---	---

Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_N(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.2 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_N(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

## **A.1 CONDIZIONI SPERIMENTALI**

Come raccomandazione generale, si suggerisce, prima di eseguire le misure H/V sul campo, che la squadra ponga attenzione alle informazioni geologiche reperibili sull'area in studio. In particolare bisogna porre attenzione alle tipologie di formazioni geologiche, alla probabile profondità del substrato ed alle probabili strutture 2D e 3D presenti.

Durante il progetto SESAME è stata ricavata una valutazione dell'influenza delle condizioni sperimentali sulla stabilità e sulla delle misure H/V da rumore ambientale. Il risultato ottenuto si è basato su 593 registrazioni usate per testare 60 condizioni sperimentali che si possono dividere nelle seguenti categorie:

- Parametri di registrazione
- Durata della registrazione
- Spaziatura fra le misure
- Accoppiamento suolo-sensore in sito
- Accoppiamento artificiale suolo-sensore
- Posizionamento del sensore
- Strutture nelle vicinanze
- Condizioni meteorologiche
- Disturbi

## **A.2 PARAMETRI DI REGISTRAZIONE**

Fino alla saturazione del segnale, i risultati sono equivalenti nonostante il guadagno utilizzato. Comunque si suggerisce di fissare il livello di guadagno al massimo possibile senza raggiungere la saturazione. Il solo effetto noto è una compressione della curva H/V quando usando un valore del guadagno troppo alto ciò implica una forte saturazione del segnale.

Un campionamento di 50 Hz è sufficiente, essendo la frequenza massima di interesse ingegneristico non più alta di 25 Hz, sebbene campionamenti più alti non influenzino i risultati H/V.

La lunghezza dei cavi che connettono il sensore alla stazione non influenza i risultati H/V fino a 100 metri.

### **A.3 DURATA DELLA REGISTRAZIONE**

Per avere una misura affidabile, si raccomanda di verificare la seguente condizione:  $f_0 > 10/lW$ . Questa condizione deriva dal fatto che, alla frequenza di interesse, devono esserci almeno 10 cicli significativi per ogni finestra.

E' necessario un gran numero di finestre e di cicli: si raccomanda che il numero totale di cicli significativi:  $n_C = lW * nW * f_0$  sia maggiore di 200.

Se risultassero presenti alcuni transienti durante la registrazione, essi dovranno essere rimossi dal segnale da processare, di conseguenza si dovrà aumentare la durata della registrazione al fine di ottenere la verifica delle condizioni sopra menzionate per ottenere una buona qualità della finestra del segnale.

### **A.4 SPAZIATURA SULLE MISURE**

Per la microzonazione, si raccomanda di adottare inizialmente una spaziatura larga (per esempio una maglia di 500 metri) e, nel caso risultassero variazioni laterali, densificare i punti di misura per esempio restringendo la maglia a 250 metri.

Per studiare la risposta di un singolo sito non si dovrebbe mai utilizzare un solo punto di misura per derivare il valore di  $f_0$ . Si raccomanda di eseguire almeno tre misure per punto.

### **A.5 ACCOPPIAMENTO SUOLO-SENSORE IN SITO**

L'accoppiamento suolo-sensore in sito dovrebbe essere effettuato con cura. Cemento e asfalto danno buoni risultati, mentre misurando in suoli soffici o irregolari, tipo fanghi, prati, suoli arati, ghiaccio, ghiaia, neve non compatta, ecc., si dovrebbe agire con molta attenzione.

Per garantire un buon accoppiamento suolo-sensore il sensore dovrebbe essere posto direttamente sul suolo, eccetto in situazioni speciali nelle quali può essere necessaria un'interfaccia.

Le superfici cementate o asfaltate non influiscono sul risultato H/V nella banda di frequenza principale, sebbene leggere perturbazioni si possono osservare nell'intervallo 7 – 8 Hz senza cambiare la forma della curva H/V. Nell'intervallo 0.2 – 20 Hz non si osservano picchi artificiali. Si dovrebbero eseguire dei test in siti ad alta frequenza al fine di controllare l'influenza dello spessore dell'asfalto.

L'erba non influisce sui risultati H/V, è necessario che il sensore sia in buon contatto con il suolo e non, per esempio, posto in maniera instabile sull'erba, quale potrebbe essere il caso di un sensore separato dal terreno dall'erba alta. In questi casi è bene rimuovere lo strato di erba prima di installare il sensore o fare una buca dove installarlo direttamente sul suolo. Registrare sull'erba in presenza di vento può completamente perturbare i risultati al di sotto di 1 Hz.

Evitare di posizionare il sensore su strati superficiali di suoli soffici, tipo fango, suolo arato o coperture artificiali e sintetiche di campi sportivi.

Evitare registrazioni su suoli saturi d'acqua, per esempio dopo forti piogge.

Evitare registrazioni su ghiaie superficiali non coesive, poiché il sensore risulterebbe non correttamente accoppiato con il terreno e si otterrebbero curve fortemente perturbate. Cercare di trovare un altro tipo di suolo superficiale a qualche metro di distanza oppure rimuovere la copertura ghiaiosa fino a raggiungere il suolo se possibile.

Registrazioni su neve o ghiaccio possono disturbare i risultati. In questi casi, si raccomanda di compattare la neve ed installare il sensore su una piastra di legno o metallo per evitare problemi al sensore dovuti alla forte umidità. Quando si registra in queste condizioni bisogna assicurarsi che la temperatura sia prevista dalle specifiche fornite dal produttore dello strumento.

### **A.6 ACCOPPIAMENTI ARTIFICIALI SUOLO-SENSORI**

Quando è necessaria un'interfaccia artificiale tra il suolo e il sensore si raccomanda fortemente di eseguire alcuni test prima di registrare il segnale per esaminare possibili influenze dovute all'interfaccia.

L'uso di piastre metalliche fra il sensore ed il suolo non modificano i risultati.

Nel caso di un terreno inclinato che non fornisce una messa in bolla corretta, la migliore soluzione consiste nel porre il sensore su una pila di sabbia o all'interno di un contenitore di plastica riempito di sabbia.

Evitare, in generale, materiali soffici e non coesivi come gommapiuma, cartone e ghiaia (imballati o no), per aiutarsi a posizionare il sensore.

### A.7 CONDIZIONI DI AFFIDABILITA'

Il primo requisito, prima di ogni estrapolazione dalle informazioni e prima di ogni interpretazione, riguarda l'affidabilità della curva H/V. Affidabilità implica stabilità, ad esempio il fatto che l'attuale curva H/V ottenuta dalla registrazione selezionata sia rappresentativa di tutte le curve H/V che possono essere ottenute da registrazioni di altri rumori ambientali e/o con altre selezioni di finestre fisicamente possibili.

Questo requisito ha severe conseguenze:

1. Al fine di ottenere un picco significativo, si raccomanda di verificare le seguenti condizioni:  $f_0 > 10/lw$ . Questa condizione è proposta poiché alla frequenza d'interesse vi siano almeno 10 cicli significativi per ogni finestra. Se i dati lo permettono, ma questo non è obbligatorio, è anche utile controllare se si verifica una più stringente condizione ( $f_0 > 20/lw$ ), che fornisce almeno 10 cicli significativi per frequenze pari alla metà della frequenza di picco, e quindi garantisce l'affidabilità dell'intero picco.
2. E' necessario un grande numero di finestre e di cicli: si raccomanda che, quando si usa una selezione automatica di finestra con parametri di default, il numero totale di cicli significativi:  $n_c = lw * nW * f_0$  sia maggiore di 200 (il che significa, per esempio, per un picco a 1 Hz, che vi siano almeno 20 finestre di 10 secondi ciascuna; o, per un picco a 0.5 Hz, 10 finestre di 40 secondi ciascuna). Nel caso nessuna selezione di finestra sia considerata (sono presi in conto solo transienti), si raccomanda, per sicurezza, che questo numero minimo di cicli  $n_c$  sia abbassato circa 2 volte alle basse frequenze (es. sopra 400) e più di 4 o 5 volte alle alte frequenze, dove i transienti sono molto più frequenti (es. sopra 1000).
3. E' necessario un accettabile basso livello di scattering tra le finestre. Un valore di deviazione standard grande spesso significa che il rumore ambientale è fortemente non-stazionario e sottolinea certi tipi di perturbazioni, che potrebbero influenzare significativamente il senso fisico della frequenza di picco H/V. Quindi si raccomanda che  $\sigma_A(f)$  sia minore di un fattore 2 (per  $f_0 > 0.5$  Hz), o di un fattore 3 (per  $f_0 < 0.5$  Hz), su un intervallo di frequenza pari a  $0.5 f_0 - 2f_0$ .

Perciò nel caso in cui una particolare selezione di parametri in fase di processing non diano soddisfacenti risultati in termini di stabilità, si raccomanda di

riprocessare le registrazioni con altri 73 parametri. La verifica di tutte le tre condizioni sopra riportate spesso porta a forti variazioni per alcuni parametri, il che può risultare impossibile e in alcuni casi la decisione migliore è quella di tornare sul sito e ripetere le misure con durata maggiore e/o condizioni sperimentali maggiormente controllate. Inoltre, bisogna essere molto cauti se la curva H/V mostra valori di ampiezza molto distanti da 1 (es. maggiore di 10 o minore di 0.1): in questi casi è molto probabile che le misure siano errate (malfunzionamento del sensore o del sistema di registrazione, sorgenti di rumore artificiali molto forti o molti vicine) e devono essere ripetute. E' obbligatorio prima verificare le registrazioni originali in dominio del tempo.

### **A.8 IDENTIFICAZIONE DELLA FREQUENZA $f_0$ PICCO NITIDO**

Il caso di picco nitido si ha quando la curva H/V mostra un chiaro e singolo picco H/V:

- Il concetto di nitidezza può essere correlato alle seguenti caratteristiche: l'ampiezza del picco H/V ed il suo relativo valore rispetto al valore H/V in altre bande di frequenza, il relativo valore della deviazione standard  $\sigma_A(f)$ , e la deviazione standard  $\sigma_f$  di  $f_0$  stimati da una finestra individuale.
- La proprietà di essere singolo è correlata al fatto che in nessun'altra banda di frequenza l'ampiezza H/V ha un altro picco nitido che soddisfa gli stessi criteri.

## Allegato B

[http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V\\_spectral\\_ratio](http://www.geopsy.org/wiki/index.php/H/V_spectral_ratio)

### PROGRAMMA ACQUISIZIONE DATI HVSR – GEOPSY E DINVER

Il progetto *Geopsy.org* consiste in una serie di programmi, o moduli, correlati tra loro ma indipendenti, dei quali il principale è *Geopsy*®, mentre un altro utile è un applicativo di tale programma chiamato *Dinver*.

#### B.1 ELABORAZIONE PROVA HVSR

In questa sezione si spiega come utilizzare *Geopsy*® per l'interpretazione di dati misurati da una singola stazione con il metodo dei rapporti spettrali o HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*).

Il risultato dell'elaborazione è una curva, detta di ellitticità, che rappresenta appunto il rapporto spettrale tra il segnale delle componenti orizzontali e quello della componente verticale.

Questa curva permette di valutare in modo diretto le frequenze di risonanza del sito indagato; una sezione seguente di questa guida mostrerà come utilizzare il programma *dinver* per ricavare la stratigrafia, e quindi una stima delle velocità equivalenti, a partire dalla curva di ellitticità. Il calcolo del rapporto H/V segue queste fasi:

1. Registrazione del segnale ambientale nelle 3 componenti.
2. Scomposizione del segnale in finestre temporali, con l'obiettivo di isolare le parti della registrazione in cui il segnale risulta maggiormente stazionario ed eliminare i rumori transitori, o transienti.
3. Calcolo e smussamento dello spettro di ampiezza ricavato tramite la trasformata di Fourier per ognuna delle finestre selezionate su tutte e tre le componenti.
4. Combinazione, con un'operazione di media, delle due componenti orizzontali per ognuna delle finestre selezionate.
5. Calcolo del rapporto H/V per ogni finestra.
6. Calcolo della media dei rapporti H/V delle singole finestre, che rappresenterà la curva H/V definitiva.

Geopsy è in grado di assistere attivamente l'utente nella fase di selezione delle finestre ed esegue in modo automatico tutti gli altri passaggi, dal 3 al 6, permettendo di ottenere in modo semplice e veloce la curva H/V.

L'apparente semplicità di un'indagine HVSR, sia in fase di acquisizione che di elaborazione dei dati, non deve far pensare che sia una misura priva di insidie. L'acquisizione è infatti un'operazione da eseguire con grande accortezza: tanto il posizionamento dello strumento che la valutazione consapevole del livello e della natura del rumore ambientale che si sta registrando sono molto importanti per la riuscita del sondaggio.

In fase di elaborazione occorre invece grande attenzione nella verifica della qualità e dell'affidabilità della curva ottenuta.

Ad esempio, il fatto che i criteri SESAME, in Allegato A, siano rispettati non implica necessariamente che il risultato sia aderente alla situazione reale, né che l'acquisizione sia stata eseguita correttamente. D'altro canto, quando i criteri non sono rispettati non si può concludere immediatamente che l'acquisizione o l'elaborazione siano errate, ma la curva ottenuta potrebbe semplicemente stare ad indicare, a titolo esemplificativo, un terreno omogeneo e compatto che non dà luogo a fenomeni di amplificazione. I criteri quindi indicano se la curva contiene o meno elementi significativi dal punto di vista geofisico, ma possono dire poco sulla sua correttezza e coerenza.

### **B.2 SCELTA DELLE FREQUENZE DI INTERESSE**

È utile avere un'idea del range di frequenze utile entro cui si può calcolare l'HVSR. Se ad esempio la frequenza di campionamento è di 200 Hz, significa che, per il teorema di Nyquist, non sarà assolutamente possibile visualizzare frequenze superiori a  $200/2 = 100$  Hz.

Il limite inferiore che si può raggiungere in frequenza dipende dai sensori utilizzati, dalla qualità dell'acquisitore, dalla durata della registrazione e dalla scelta delle finestre. Come regola generale (anche se molto empirica) si può considerare che la frequenza più bassa osservabile (o almeno decentemente osservabile) si ha dividendo la durata del campionamento per 10, ad esempio 1200

$\text{secondi}/10 = 18 \text{ secondi} = \text{circa } 0,008 \text{ Hz}$ , per un'acquisizione di 20 minuti. Questo calcolo è del tutto teorico in quanto presuppone che venga utilizzata una sola finestra comprendente l'intera registrazione. Nella pratica si utilizzano molte finestre più brevi e la minima frequenza raggiungibile dipenderà dalla durata di queste finestre: se ad esempio si usano finestre di 60 secondi si potrà osservare fino a  $60/10 = 6 \text{ secondi} = \text{circa } 0,17 \text{ Hz}$ .

In Geopsy è possibile scegliere le frequenze entro cui calcolare il rapporto H/V. La minima frequenza che si può indicare è 0,01 Hz, la massima è virtualmente illimitata.

Se si inserisce una frequenza massima oltre la frequenza di Nyquist, il rapporto H/V oltre tale frequenza sarà piatto. Se si inserisce una frequenza minima inferiore alla frequenza corrispondente a un decimo della lunghezza delle finestre temporali utilizzate (0,17 Hz nell'esempio precedente), Geopsy calcolerà lo stesso il rapporto H/V al di sotto di tale frequenza ma evidenzierà la zona tratteggiandola di rosso, indicando che in quell'area il rapporto non è affidabile.

## ALLEGATO C

### C.1 SCRIPT Matlab® PER ELABORAZIONI HVSR

Analisi H/V di registrazioni

Questo script richiede in ingresso le tre componenti EW, NS, UD, di una registrazione di weak motion e restituisce in uscita gli Spettri di Ampiezza delle componenti Orizzontale e Verticale ed il Rapporto Spettrale HVSR

```
clear all; close all
```

```
load STA1 Caricare le tracce in tempi
```

```
Fs = 100; Frequenza di campionamento
```

```
Dt = 1/Fs; Intervallo di campionamento(t)
```

```
Fn = 1/(2*Dt); Frequenza di Nyquist
```

```
L = length(UD); Lunghezza del segnale
```

```
T = L*Dt; Durata temporale del segnale
```

```
t = linspace(0,T,L); Vettore asse dei tempi
```

```
Dw = 1/((L-1)*Dt); Intervallo di campionamento(f) grafico delle tre componenti in tempi
```

```
figure
```

```
subplot(3,1,1),plot(t,NS,'g')
```

```
title('Componente Nord-Sud')
```

```
xlabel('Tempo (s)')
```

```
ylabel('Accelerazione')
```

```
subplot(3,1,2),plot(t,EW,'c')
```

```
title('Componente Est-Ovest')
```

```
xlabel('Tempo (s)')
```

```
ylabel('Accelerazione')
```

```
subplot(3,1,3),plot(t,UD,'b')
```

```
title('Componente Verticale')
```

```
xlabel('Tempo (s)')
```

```
ylabel('Accelerazione')
```

```
%trasformate delle tracce in frequenza centrate in zero
```

```
V=fftshift(fft(UD));
```

```
HN=fftshift(fft(NS));
```

```
HE=fftshift(fft(EW));
```

```
%spettri di ampiezza e di fase in indice di frequenza
```

```
ampHN=abs(HN);
```

```
faseHN=angle(HN);
```

```
ampHE=abs(HE);
```

```
faseHE=angle(HE);
```

```
ampV=abs(V);
```

```
faseV=angle(V);
```

```
figure subplot(3,2,1),plot(ampHN,'g')
```

```
title('Componente Nord-Sud')
```

```
xlabel('Indice Frequenze')
ylabel('Ampiezza')
subplot(3,2,2),plot(faseHN,'g')
title('Componente Nord-Sud')
xlabel('Indice Frequenze')
ylabel('Fase (rad)')
subplot(3,2,3),plot(ampHE,'c')
title('Componente Est-Ovest')
xlabel('Indice Frequenze')
ylabel('Ampiezza')
subplot(3,2,4),plot(faseHE,'c')
title('Componente Est-Ovest')
xlabel('Indice Frequenze')
ylabel('Fase (rad)')
subplot(3,2,5),plot(ampV,'b')
title('Componente Verticale')
xlabel('Indice Frequenze')

clear all;clc;
%close all;
t_in=clock;

data=importdata('prova S1_2015_3_3_12_16.saf');

% % % % % Y_i=data.data;
% % % % % freq_data=fft(Y_i);

% % % % % %% Signals de-trending
% % % % % time_data=detrend(time_data);
% % % % %
Fs = 250; % Sampling frequency
% % % % %
% % % % % %% Filtraggio dati
% % % % % filter_yn=1;
% % % % % if filter_yn
% % % % % % filter_order=floor(Fs/(filter_freq*2)); % va bene????
% % % % % filter_order=16; % filter order must be even (bandpass?)
% % % % % filter_freq_m=0.75;
% % % % % filter_freq_M=30;
% % % % % d=fdesign.lowpass('N,F3dB',filter_order,filter_freq_M,Fs);
% % % % % % d=fdesign.highpass('N,F3dB',filter_order,filter_freq,Fs);
% % % % % %
d=fdesign.bandpass('N,F3dB1,F3dB2',filter_order,filter_freq,filter_freq2,Fs);
% % % % % lpf=design(d,'butter');
% % % % % filter_is_stable=isstable(lpf)
% % % % % % fvtool(lpf);
% % % % % filtered_data=filter(lpf,time_data);%(floor(end/2):floor(3*end/4),:));
```

```

% % % % % % % % % filtered_data=raw_data(end/2:3*end/4,:);
% % % % % % % % % temp_data=raw_data;
% % % % % % % % % time_data=filtered_data;
% % % % % % % % % save(fileDest_fdata,'raw_data')
% % % % % % % % % raw_data=temp_data;
% % % % % % else
% % % % % % filtered_data=time_data;%(end/2:3*end/4,:);
% % % % % % end

filtered_data=data.data;
%% Calcolo fft

T = 1/Fs; % Sample time
L = size(filtered_data,1); % Length of signal
t = (0:L-1)*T; % Time vector
ch_n=size(filtered_data,2); % # of channels

NFFT = 2^(nextpow2(L)); % Next power of 2 from length of signal
% filtered_data=[filtered_data;zeros(2^(nextpow2(L)+1)-L,size(filtered_data,2))];
% % % % ...per i dati grezzi
% % % Y_nf=zeros(ch_n,NFFT/2+1);
% % % for i=1:ch_n
% % % y_i=raw_data(:,i);
% % % Y_i = fft(y_i,NFFT)/L; %%%%%%%%%%% MODIFICARE
QUESTA RIGA
% % % f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
% % % Y_nf(i,:)=2*abs(Y_i(1:NFFT/2+1));
% % % end

%...per i dati filtrati
Y_f=zeros(ch_n,NFFT/2+1);
Y_f_angle=zeros(ch_n,NFFT/2+1);
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% % % tic
for i=1:ch_n
y_i=filtered_data(:,i);
Y_i = fft(y_i,NFFT)/L; %%%%%%%%%%% MODIFICARE
QUESTA RIGA
% Y_i = fft(y_i)/L; %%%%%%%%%%% MODIFICARE QUESTA
RIGA
Y_f(i,:)=2*abs(Y_i(1:NFFT/2+1));
Y_f_angle(i,:)=angle(Y_i(1:NFFT/2+1));
end
% % % t1=toc
% % %
% % % tic
% % %
% % % Y_i2 = fft(filtered_data,NFFT)/L; %%%%%%%%%%%
MODIFICARE QUESTA RIGA

```

```

% % % %   Y_i = fft(y_i)/L; %%%%%%%%%%% MODIFICARE
QUESTA RIGA
% % % Y_f2=2*abs(Y_i2(1:NFFT/2+1));
% % % Y_f_angle2=angle(Y_i(1:NFFT/2+1));
% % %
% % % t2=toc

% % figure,plot(f,Y_f)
% m = {'-+', '-o', '-*', '-.', '-x', '-s', '-d', '-^', '-v', '->', '-<', '-p', '-h'};
% % set(gca(), 'LineStyleOrder',m, 'ColorOrder',[0 0 0], 'NextPlot','replacechildren')
% fp=f(f<=filter_freq_M);%(1:2000);
% Y_f_p=Y_f(:,1:length(fp));
% Y_f_angle_p=Y_f_angle(:,1:length(fp));
%
% legend_v=cell(length(cfg.s_v),1);
% for i=1:length(cfg.s_v)
%   legend_v{i}=['S' num2str(cfg.s_v(i))];
% end
%
% legend_o=cell(length(cfg.s_o),1);
% for i=1:length(cfg.s_o)
%   legend_o{i}=['S' num2str(cfg.s_o(i))];
% end

m = {'-+', '-o', '-*', '-.', '-x', '-s', '-d', '-^', '-v', '->', '-<', '-p', '-h'};
% Y_f=2*abs(Y_i);
% Y_f_angle=angle(Y_i);

hf_v=figure;
figure(hf_v),subplot(2,1,1),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(f,Y_f),ylabel('|Y(f)|'),legend('X','Y','Z')%legend({'S1
','S2','S3','S4','S5','S6','S7','S8'})%xlabel('Frequency (Hz)'),
figure(hf_v),subplot(2,1,2),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(f,Y_f_angle),ylabel('\angle[Y(f)]')%title('Phase'),xla
bel('Frequency (Hz)'),

t_fin=clock;
el_time=etime(t_fin,t_in)
% hf_v=figure;
% figure(hf_v),subplot(2,1,1),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(fp,Y_f_p(:,cfg.s_v)),title('Spectrum - vertical
sensors'),ylabel('|Y(f)|'),legend(legend_v)%legend({'S1','S2','S3','S4','S5','S6','S7','S8'
'})%xlabel('Frequency (Hz)'),
% figure(hf_v),subplot(2,1,2),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(fp,Y_f_angle_p(:,cfg.s_v)),ylabel('\angle[Y(f)]')%tit
le('Phase'),xlabel('Frequency (Hz)'),
%
% hf_o=figure;
% figure(hf_o),subplot(2,1,1),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(fp,Y_f_p(:,cfg.s_o)),title('Spectrum - horizontal

```

```

sensors'),ylabel('|Y(f)|'),legend(legend_o)%legend('S1','S2','S3','S4','S5','S6','S7','S8')
% xlabel('Frequency (Hz)'),
% figure(hf_o),subplot(2,1,2),set(gca(), 'LineStyleOrder',m,
'NextPlot','replacechildren'),plot(fp,Y_f_angle_p(:,cfg.s_o)),ylabel('\angle[Y(f)]')%tit
le('Phase'),xlabel('Frequency (Hz)'),

% %...per i dati filtrati VERSIONE SEMPLIFICATA
% Y_f=[];
% Y_f_sign=[];
% for i=1:ch_n
%   y_i=filtered_data(:,i);
%   Y_i = fft(y_i)/L; %%%%%%%%%%%%%%% MODIFICARE QUESTA
RIGA
%   f = Fs/2*linspace(0,1,length(Y_i));
%   Y_f=[Y_f;2*abs(Y_i)];
%   Y_f_sign=[Y_f_sign;2*(Y_i)];
% end

% %% Prova cross_spettri
% c13=xcorr(filtered_data(:,3),filtered_data(:,9));
% L_x = length(c13); % Length of signal
%
% NFFT_x = 2^(nextpow2(L_x));
%
% f_xcorr = Fs/2*linspace(0,1,NFFT_x);
% c13_ff=fft(c13,NFFT_x)/L_x;
% % % % [Pxx_cov,f_cov] = pcov(c13,4,NFFT_x,Fs)
% figure(),plot(f_xcorr(:),2*abs(c13_ff))
% figure(),plot(f_xcorr(:),angle(c13_ff))

% %% Prova IFFT
% colors=['b' 'g' 'r'];
% for ff=1:2:3
% ifY = ifft(fftshift(Y_f_sign(ff,:))); % inverse Fourier transform of fixed data
% cy = real(ifY); % remove imaginary parts
%
% figure(1),hold on % new window for plot
% % plot(t(1:length(cy)),raw_data((1:length(cy)),ff)); hold on % plot original signal
% plot(t(1:length(cy)),cy,colors(ff)); grid on % plot corrected signal
% xlabel('Time (s)'); % time expressed in seconds
% ylabel('Amplitude'); % amplitude as function of time
% end

% %% Salvataggio dati
% save_flag=input('Save(1:Y - 2:N)?');
% if save_flag==1
%   save(fileDest_fft,'f','Y_f','Y_f_angle')%,'Y_nf')
%   if (isempty(filter_string)==0)
%     save(fileDest_fdata,'data_num')

```

# Allegati

---

% end  
% end

# On the monitoring of structures and soils by tomography

R.Zinno<sup>1</sup>, F.Magarò<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> *Department of Computer Science, Modeling, Electronics and Systems Engineering, University of Calabria, Italy*

## Abstract

Since 2009, with the coming into force of the January 14, 2008 Ministerial Decree "New technical standards for construction", and the explanatory ministerial communication N°.617 of February 2, 2009, the question of seismic hazard and the design of seismic-resistant structures in Italy has acquired increasing importance. One of the most discussed aspects in recent Italian and international scientific literature concerns the dynamic interaction between land and structure, and the effects which dynamic coupling may have on individual buildings. In effect, from systems dynamics, it is well known that resonance can have catastrophic effects on a stimulated system, leading to a response that is not compatible with the provisions in the design phase. The method used in this study to estimate the frequency of oscillation of the structure is as follows: analysis of HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) relations. This allows for evaluation of very simple oscillation frequencies for land and structures. The tool used for data acquisition is an experimental digital tomograph. This is an engineered development of the experimental Languamply RE 4500 tomograph, equipped with an engineered amplification circuit and improved electronically using extremely small electronic components (size of each individual amplifier 16 x 26 mm). This tomograph is a modular system, which is completely "free" and "open", designed to interface Windows, Linux, OSX and Android with the outside world. It an amplifier designed to carry out microtremor measurements, yet which will also be useful for seismological and seismic measurements in general. The development of single amplifiers of small dimension allows for a very clean signal since being able to position it a few centimetres from the geophone eliminates cable "antenna" phenomena, which is a necessary characteristic in seeking to have signals which are clean at the very low voltages to be measured.

*Keywords: HVSR technique; Seismic hazard; resonance frequency, Southern Italy.*

## **Monitoring of a bridge with passive seismic techniques: case studies**

R.Zinno & F.Magarò

*Department of Computer Science, Modeling, Electronics and Systems Engineering,  
University of Calabria, Italy*

**ABSTRACT:** The test passive seismic single station detects the frequencies at which the motion of the ground is amplified by resonance stratigraphic. The test is commonly referred to as evidence "HVSr" or simply "H / V" means the ratio between the spectral components horizontal (H) and the spectral component vertical (V). The method used in this study to estimate the frequency of oscillation of the structure is as follows: analysis of HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) relations. This allows for evaluation of very simple oscillation frequencies for land and structures. The tool used for data acquisition is an experimental digital tromograph. As the ground, excited by the waves that pass through it, has more vibration modes also the structures and buildings in the c.a. They have in turn the resonance frequency of the building. It 's hould avoid the phenomena of double resonance that is, those cases in which the natural frequency of the terrain has peaks with resonance frequencies similar to those of the building. This technique is aimed to study the dynamic behavior of bridges in the province of Cosenza, in southern Italy, and understand the frequency of these structures to see if their earthquake resistance.

*Keywords: HVSr technique; Seismic hazard; resonance frequency, Southern Italy*

### ***UN GIS PER LA CONSERVAZIONE E LA VALORIZZAZIONE DELL'ANTICA VIA ANNIA – POPILIA***

*Serena ARTESE<sup>1</sup>, Floriana MAGARÒ<sup>1</sup>, Angela MICELI<sup>1</sup>, Chiara MICELI<sup>1</sup>, Paolo TALARICO<sup>1</sup>, Assunta VENNERI<sup>1</sup>, Giuseppe ZAGARI<sup>1</sup>, Raffaele ZINNO<sup>1</sup>*

*Università della Calabria - DIMES Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronica e Sistemistica, Via P. Bucci cubo 39/C, 87036 Rende, Italy*

*serena.artese@unical.it, [floriana.magaro@unical.it](mailto:floriana.magaro@unical.it), [angela.miceli.smartlab@gmail.com](mailto:angela.miceli.smartlab@gmail.com),  
chiara.miceli@unical.it, [paolo.talarico.smartlab@gmail.com](mailto:paolo.talarico.smartlab@gmail.com), [assunta.venneri.smartlab@gmail.com](mailto:assunta.venneri.smartlab@gmail.com),  
[giuseppe.zagari@unical.it](mailto:giuseppe.zagari@unical.it), [raffaele.zinno@unical.it](mailto:raffaele.zinno@unical.it)*

### ***Riassunto***

La ricerca vuole contribuire allo sviluppo di un processo metodologico che abbia per finalità la conservazione e la valorizzazione di Beni Culturali.

Nel presente lavoro è descritta una metodologia per implementare un GIS, finalizzato alla tutela di manufatti, aventi rilevanza storico-artistica individuati come Beni Culturali, che si trovano lungo il tracciato dell'antica via Annia - Popilia.

Su scala territoriale, si prevede l'implementazione di strati con informazioni riguardanti caratteristiche geotecniche, idro-geologiche, urbanistiche e storico - artistico. A livello del singolo manufatto, l'inserimento dei dati è ottenuto da un'attività di rilievo e schedatura su campo concernente la rilevanza storico-artistica, l'ubicazione e gli aspetti strutturali.

Per ogni manufatto sarà possibile, inoltre, mettere a punto una scheda di monitoraggio, con l'indicazione dei punti di criticità da tenere sotto controllo, delle indagini da effettuare periodicamente e degli interventi necessari ai fini della messa in sicurezza e della ripresa strutturale. I dati sullo stato di manutenzione saranno, inoltre, utili per progetti di restauro.

Il progetto pilota riguarda il caso studio del "Ponte di Annibale" sito tra i comuni di Altiglia e Scigliano, in provincia di Cosenza. Il GIS potrà essere utilizzato come sussidio per la realizzazione di attività a scopo turistico (guide, itinerari, geosito, ecc.).

---

<sup>1</sup> SmartLab – Structural Monitoring Advanced Materials Rehabilitation Testing - Università della Calabria - DIMES Dipartimento di Ingegneria Informatica, Modellistica, Elettronica e Sistemistica, Via P. Bucci cubo 39/C, 87036 Rende, Italy.

