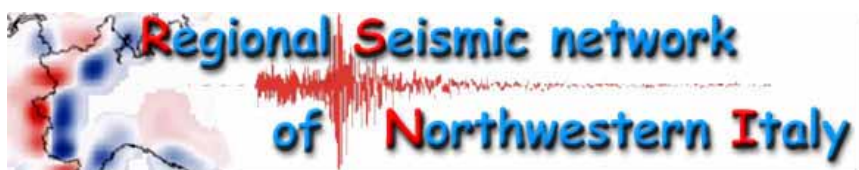




Dip.Te.Ris.

Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle Sue Risorse  
Università di Genova

### *Laboratorio di sismologia*



**“Ricostruzione di un modello geofisico-stratigrafico per  
il sito ove è ubicato l'ex edificio scolastico di via  
Gerolamo Speroni a Recco (Genova) ”**

**Relazione Attività Svolta  
(Novembre 2007)**

***Personale Dip.Te.Ris.:***

*Spallarossa D., Ferretti G., Pavan M., Pasta M. e Zunino E.*

**Relazione a cura di:**

**Ferretti Gabriele, Roberto De Ferrari, Spallarossa Daniele**

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>1. INQUADRAMENTO E PROFILO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DELL'AREA .....</b>	<b>3</b>
<b>2. METODOLOGIE IMPIEGATE: ASPETTI TEORICI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. METODOLOGIE IMPIEGATE: DETTAGLI TECNICI.....</b>	<b>6</b>
<b>4. RISULTATI.....</b>	<b>7</b>
<b>5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....</b>	<b>15</b>
<b>APPENDICE .....</b>	<b>16</b>

## Introduzione

Nell'ambito delle analisi effettuate per conto della Provincia di Genova dal "[Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio \(DICAT\)](#)", Università degli Studi di Genova, si è resa necessaria una campagna di misure per la caratterizzazione dal punto di vista geofisico-stratigrafico del sito di fondazione dell'ex edificio scolastico ubicato in via Gerolamo Speroni a Recco (Genova). Nel dettaglio lo scopo del presente lavoro riguarda la definizione di un modello del sottosuolo per il sito in esame, da cui ricavare la Categoria di appartenenza del sopraccitato suolo di fondazione sulla base del valore di Vs30 secondo quanto previsto dalla normativa vigente (O.P.C.M. 3274 / 2003).

A questo scopo, il Dip.Te.Ris., Università di Genova, ha effettuato un serie di analisi geofisiche mirate alla caratterizzazione del sito in termini di frequenza di risonanza e modello di velocità di propagazione delle onde P e S.

Nel dettaglio sono state eseguite le seguenti analisi:

- definizione delle frequenze di risonanza caratteristiche dell'area in prossimità all'edificio in esame attraverso la metodologia Nakamura
- definizione di un modello di velocità di propagazione delle onde longitudinali Vp attraverso l'analisi della propagazione delle onde P (tomografia sismica).
- definizione di un modello di velocità di propagazione delle onde trasversali Vs attraverso l'analisi delle caratteristiche di dispersione delle onde superficiali di Rayleigh (metodo REMI e MASW)

Le metodologie sopra citate rientrano in studi geofisici attivi (sismica a rifrazione e MASW) e passivi (analisi di rumore ambientale in termini di rapporti spettrali e curve di dispersione/REMI).

E' importante ricordare che le tecniche geofisiche adottate nell'ambito della presente analisi, pur non potendosi considerare sostitutive alle tradizionali prove Down-hole o Cross-hole , consentono comunque una valutazione qualitativa e quantitativa accurata delle caratteristiche stratigrafiche e dinamiche/geofisiche.

In particolare l'applicazione di più tecniche indipendenti (basate su diverse tipologie di dati sismici) permette inoltre una sorta di validazione del modello geofisico finale sulla base dell'analisi di confronto fra i risultati derivati dai diversi tipi di indagine utilizzati.

## 1. Inquadramento e profilo geologico-geomorfologico dell'area

Il terreno oggetto delle indagini è ubicato nel tratto di versante che da località Liceto declina in direzione E verso il centro abitato di Recco, in prossimità della Stazione Ferroviaria ad una quota di circa 25 m.s.l.m..

Il settore di versante che comprende l'edificio oggetto di studio è caratterizzato da sistemazioni a fasce presidiate da muri a secco di altezza contenuta e dal punto di vista morfologico presenta un'acclività media del 40-45 %. L'area collinare soprastante risulta scarsamente urbanizzata mentre a partire dal sito investigato, in direzione del centro abitato, si riscontra un'alta densità di edifici e strade.

Dal punto di vista geomorfologico l'area è caratterizzata dalla presenza di coltre di natura eluvio-colluviale con spessori contenuti entro i 3.0 m, localmente talora fino a 5.0 m sovrapposta al substrato roccioso. Lo spessore dei materiali sciolti è funzione della presenza di riporti in prossimità delle aree modificate dall'azione antropica (strade carrabili ed edifici).

Sulla base del rilevamento di terreno ed in accordo con la cartografia ufficiale (Servizio Geologico Italiano, 1968), il substrato roccioso presente nell'area investigata è rappresentato dai litotipi appartenenti alla Formazione dei Calcari di Monte Antola, costituito da calcari marnosi, marne calcaree, calcareniti ed argilliti, disposti in strati di potenza variabile anche nell'ordine del metro, di colore grigio scuro se freschi e grigio chiaro nelle normali condizioni di alterazione.

Alcuni affioramenti del substrato lapideo sono visibili in corrispondenza della linea di costa e degli spaccati stradali lungo le carrabili che attraversano il versante a monte dell'area di intervento: la disposizione strutturale dell'ammasso roccioso è debolmente a franapoggio, con immersione verso NE e inclinazione sul piano orizzontale variabile. L'ammasso roccioso presenta nei primi metri una ridotta spaziatura tra le discontinuità e un elevato numero delle stesse in rapporto al volume di roccia interessato dalle fondazioni dell'edificio, tali per cui rendono possibile l'assimilazione del livello superficiale del substrato roccioso ad un mezzo continuo-equivalente. A profondità maggiori i Calcari del M.te Antola, pur essendo ancora caratterizzati dalla presenza di giunti pervasivi con spaziatura eterogenea, generalmente presentano caratteristiche geomeccaniche buone, tipiche di un substrato roccioso compatto, con valori di resistenza a compressione monoassiale della matrice rocciosa ( $\sigma_c$ ) dell'ordine di 30 MPa e con peso di volume del materiale roccioso che oscilla tra 25.5 kN/m<sup>3</sup> e 26.5 kN/m<sup>3</sup>.

## 2. Metodologie impiegate: aspetti teorici

Come precedentemente accennato, il Dip.Te.Ris., ai fini della caratterizzazione geofisica del sito in esame, ha eseguito differenti analisi basate su metodi di indagine differenti di cui vengono brevemente ricordati gli aspetti principali.

1. **metodologia nakamura:** il metodo Nakamura (Nakamura, 1989), basato sul calcolo dei rapporti spettrali tra la componente verticale (V) e quella orizzontale (H) del segnale registrato, consente di definire la frequenza di massima amplificazione di un sito utilizzando il rumore ambientale (microtremore e rumore antropico) nell'ipotesi che lo spettro della componente verticale non sia dominato da sorgenti monocromatiche. Attraverso un sistema di acquisizione composto da un sensore a tre componenti (verticale, Est-Ovest e Nord-Sud) e da un acquisitore digitale si registrano finestre di rumore ambientale dalle quali è possibile elaborare i rapporti H/V. Tali rapporti presentano un comportamento differente caratteristico del sito considerato, mostrando, nel caso di contrasti di impedenza significativi (i.e.  $> 3$ ), un picco di amplificazione corrispondente alla frequenza fondamentale del sito. È importante sottolineare che nei casi più semplici la tecnica Nakamura fornisce l'esatto valore della frequenza fondamentale, dimostrando peraltro che essa dipende da alcune caratteristiche dei

litotipi di indagine; tra le più importanti si ricordano lo spessore delle coltri di copertura e i differenti parametri geotecnici/geofisici che definiscono il contrasto tra i litotipi. Nel dettaglio il valore della frequenza di risonanza individuata è direttamente correlato con la profondità a cui si trova una superficie di contatto ad alto contrasto di impedenza (coltri superficiali – substrato roccioso, per esempio) e la velocità di propagazione delle onde S dei litotipi sovrastanti la superficie di contatto. La formula approssimata (1) indica come la frequenza di risonanza possa essere utilizzata per definire lo spessore di un substrato nota la velocità dei depositi sovrastanti; alte frequenze di risonanza indicano la presenza di coperture sottili mentre frequenze di risonanza basse indicano una profondità del substrato roccioso elevata.

$$F_0 = \frac{V_s}{4H} \quad (1)$$

2. **tomografia sismica da fasi dirette:** la caratterizzazione geofisica, tramite la misura della velocità di propagazione delle onde P delle unità litologiche presenti nell'area di indagine, e la determinazione della geometria (spessori e superfici di contatto) nel sottosuolo rappresentano i principali scopi della prova. Utilizzando array lineari (stese sismiche) composti da un certo numero di geofoni (sensori) verticali (24, 48, ...) vengono registrate le onde sismiche prodotte attraverso sorgenti artificiali collocate in superficie (sollecitazioni verticali per la generazione di onde P tramite masse battenti, per esempio). Dai sismogrammi si ricavano i tempi di arrivo relativi alla fase sismica che per prima giunge all'i-esimo geofono (fasi rifratte per una distanza sorgente-ricevitore maggiore della distanza di cross-over) da cui è possibile definire le dromocrone (curve tempo di arrivo in funzione della distanza sorgente – ricevitore) relative a ciascuna sorgente. Quindi, attraverso una procedura di inversione, viene ricavato un modello di velocità 2D (profilo di velocità) che riporta la variazione di velocità di propagazione delle onde P in funzione della profondità lungo un profilo corrispondente alla posizione della stesa. E' infine fondamentale ricordare che la lunghezza totale della stesa, l'interdistanza fra i geofoni (quindi il numero di geofoni disponibili) e le caratteristiche strumentali dei geofoni (frequenza fondamentale) vincolano a priori la profondità massima raggiungibile e la risoluzione del modello in funzione della massima e della minima lunghezza d'onda analizzabile.
3. **MASW e REMI:** Lo studio delle onde superficiali attraverso le tecniche MASW e REMI prevede la valutazione della variazione di velocità delle onde superficiali (generalmente di Rayleigh) in funzione della frequenza dell'onda stessa ovvero la definizione della curva di dispersione (velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza) caratteristica del sito in esame attraverso una analisi eseguita nel dominio della frequenza. Sulla base della curva di dispersione ottenuta viene applicato un processo di inversione finalizzato ad ottenere la stima di un modello stratigrafico in funzione della variazione con la profondità della velocità di propagazione delle onde S. Il processo di inversione, intuitivamente, prevede un confronto fra la curva di dispersione sperimentale ottenuta e quella relativa ad un modello sintetico che verrà successivamente alterato in base alle differenze riscontrate tra le due curve, fino ad ottenere un modello sintetico a cui è associata una curva di dispersione teorica approssimativamente coincidente con la curva sperimentale. L'ipotesi fondamentale su cui queste tecniche si basano è che il volume di terreno interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo. In particolare la tecnica MASW è usualmente definita attiva, in quanto occorre che l'operatore sia munito di una sorgente per energizzare il sistema (massa battente, per esempio). La tecnica REMI invece viene definita passiva a sottolineare che l'energizzazione non dipende dall'operatore, ma questa sarà spontaneamente presente nell'ambiente in termini di rumore antropico e microtremore. In entrambi i casi si opera convenzionalmente con array lineari con geofoni equidistanti fra loro e, nel caso di MASW, si dispone la sorgente e i ricevitori in

modo che risultino allineati. E' infine fondamentale ricordare che la lunghezza totale della stesa, l'interdistanza fra i geofoni (quindi il numero di geofoni disponibili) e le caratteristiche strumentali dei geofoni (frequenza fondamentale) vincolano a priori la profondità massima raggiungibile e la risoluzione in funzione della massima e della minima lunghezza d'onda analizzabile.

**E' ancora una volta importante ricordare come il confronto fra i risultati ottenuti attraverso ciascuna delle metodologie sopra citate sia fondamentale per valutare l'affidabilità del modello ricostruito relativo alla caratterizzazione delle unità litologiche presenti nell'area di studio in termini di geometria (spessore e profondità) e caratteristiche geofisiche (velocità di propagazione delle onde P ed S)**

### 3. Metodologie impiegate: dettagli tecnici

Nell'ambito del presente lavoro sono state eseguite le seguenti prove di cui vengono riportati i dettagli relativi alla strumentazione impiegata e alla geometria di installazione. La geometria dell'array è risultata essere fortemente vincolata dalle condizioni logistiche di installazione presso il sito in esame che ha limitato a 23 m la lunghezza massima della stesa.

**Stesa sismica di 23m** (ubicata nel giardino davanti al portone di ingresso)

- 24 canali
- distanza intergeofonica 1m
- energizzatore: mazza da 5 kg
- Rifrazione (geofoni 100Hz)
- MASW (geofoni 4.5Hz)
- REMI(geofoni 4.5Hz)

**Misure di rumore ambientale esterne** (metodo Nakamura) presso 7 punti interni al parco utilizzando un acquirettore Marslite HD e un sensore Lennartz LE/3D-5s

In figura 1 è riportata l'ubicazione delle varie misure

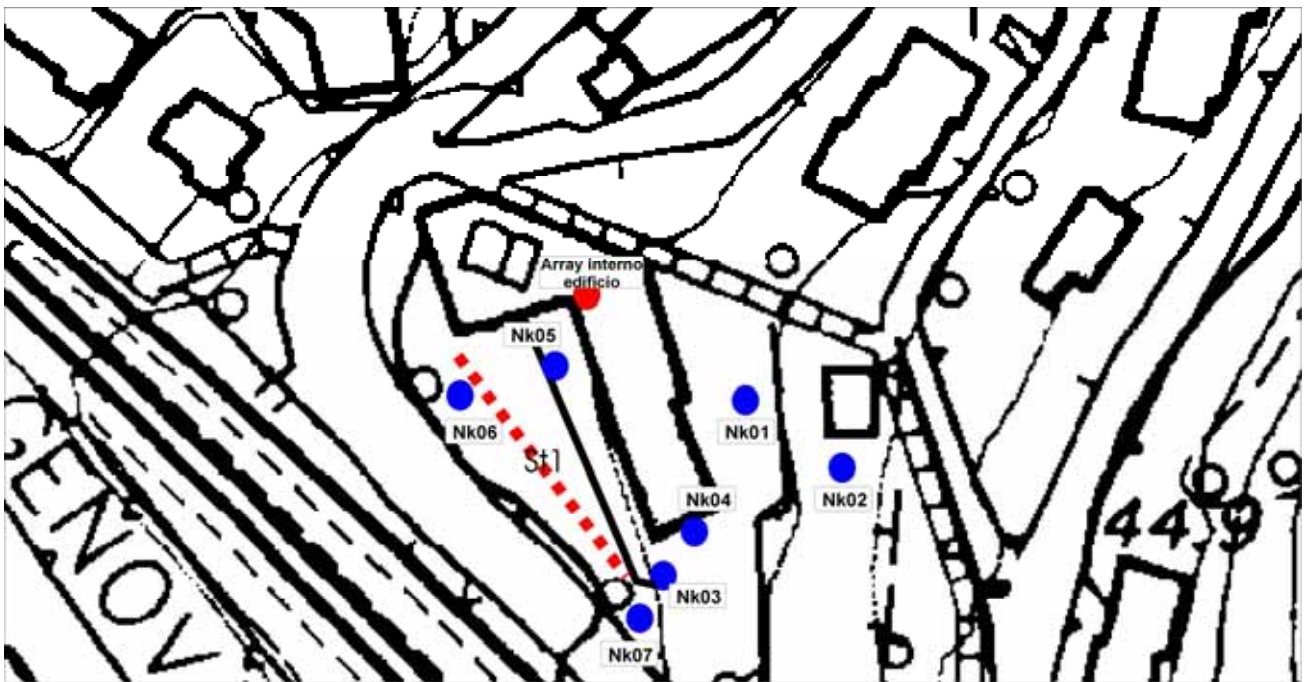
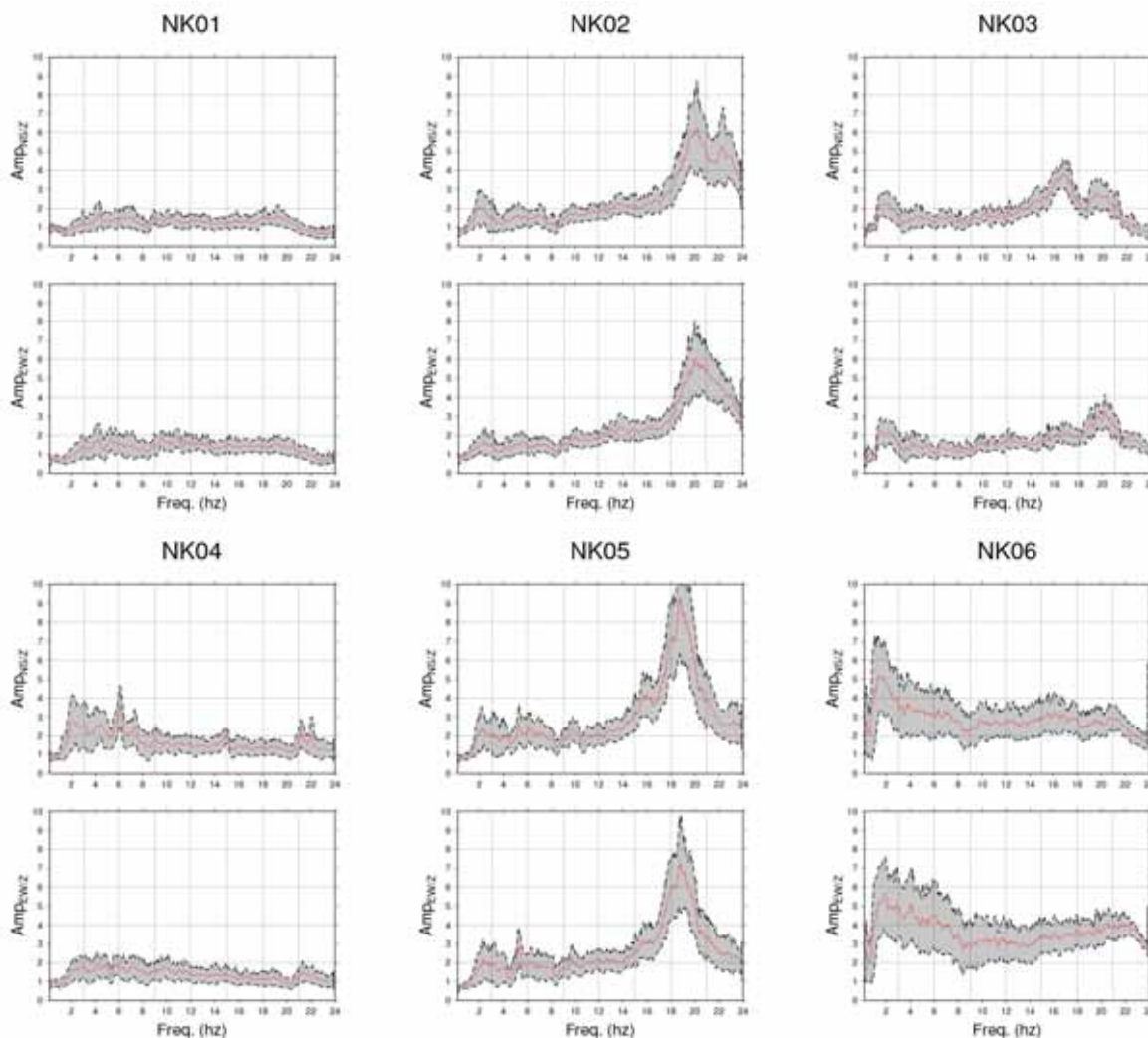


Figura 1: ubicazione delle indagini effettuate; simboli blu: punti misura relativi all'acquisizione di rumore per l'applicazione della metodologia Nakamura); linea rossa: ubicazione dell'array lineare

## 4. Risultati

### H/V rumore (punti misura esterni)

L'applicazione della metodologia Nakamura ha permesso di evidenziare per il sito in esame la presenza di un significativo picco di amplificazione ad alte frequenze, presumibilmente associabile con un contrasto di impedenza medio-alto relativo ad una superficie di contatto molto superficiale. Frequenze di amplificazione intorno ai 16-18 Hz indicano la probabile presenza di un sottile strato di depositi superficiali (riporto e coltri eluvio-colluviali) che sovrasta il substrato roccioso (calcarei del M.te Antola): considerando una velocità  $V_s$  variabile fra 300 e 500 m/s è possibile ipotizzare la presenza del substrato roccioso ad una profondità di circa 5 – 7m. La presenza di cavità sotterranee artificiali (scarichi fognari, fosse biologiche,...), la cui ubicazione non è conosciuta, può compromettere significativamente l'analisi fornendo curve H/V discordanti dall'andamento medio. I punti misura 1,4 e 6 possono quindi rappresentare casi particolari non legati alle reali caratteristiche geologico-geofisiche del sito.



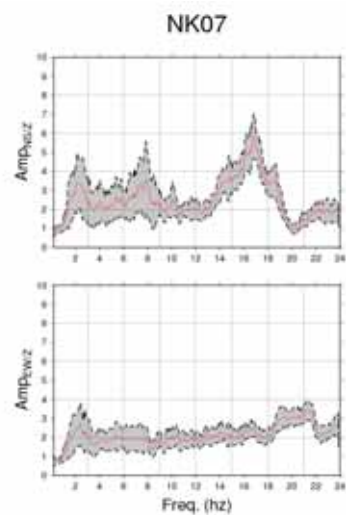


Figura 2: curve H/V ottenute attraverso l'analisi di rumore ambientale (metodo Nakamura) Per la maggior parte delle misure effettuate risulta evidente la presenza di un picco di amplificazione ad una frequenza intorno ai 16-18 Hz



## Stese sismiche:

Attraverso l'analisi dei dati registrati per mezzo dell'array lineare installato è stato possibile definire dei modelli stratigrafici-geofisici per il sito in esame. Nelle pagine seguenti vengono riportati i risultati ottenuti applicando la metodologia REMI e la tomografia sismica da onde P rifratte. Come discusso nel paragrafo successivo, i modelli ottenuti convergono verso una situazione listo-stratigrafica caratterizzata da un sottile strato di depositi superficiali profondo circa 5 -6 m che sovrasta materiali più compatti, presumibilmente legati al substrato roccioso. Nel dettaglio, possono dal punto di vista dell'andamento della velocità di propagazione delle onde P (figure 13 e 15) e delle onde S (figure 6 e 8) essere distinte tre unità litologiche:

- Strato superficiale (fino ad una profondità di 5 -6 m) caratterizzato da una  $V_s$  pari a circa 300 m/s e una  $V_p$  pari a circa 1000 – 1500 m/s
- Strato intermedio (compreso fra 5 e 10 m di profondità) caratterizzato da una  $V_s$  pari a circa 600 m/s e una  $V_p > 1800$  m/s
- Strato profondo (per profondità  $>$  di 10 m) caratterizzato da  $V_s > 800$  m/s e  $V_p > 2000$  m/s

## REMI

Considerando la geometria di installazione dell'array lineare (lunghezza e distanza inter-geofonica) e sulla base di una valutazione qualitativa relativa all'analisi FK (figura 4), è stata considerato corretto utilizzare la curva di dispersione derivata nell'intervallo di frequenze comprese fra 13 e 30 Hz. Tale curva è stata quindi invertita utilizzando due tipi di stratificazioni (una più semplificata con un minor numero di strati ed una più complessa caratterizzata da un numero maggiore di strati) che hanno comunque condotto a risultati molto simili in termini di andamento della velocità  $V_s$  con la profondità. E' tuttavia necessario osservare, in entrambi i modelli, la presenza di uno strato estremamente superficiale (a profondità minore di 3m) caratterizzato da valori molto elevati di  $V_s$ . Tale risultato non deve essere considerato come realistico bensì come un artefatto legato ad un possibile problema sulla definizione delle curve di dispersione alle alte frequenze (aliasing) che il processo di inversione tramuta in uno strato superficiale ad alta velocità.

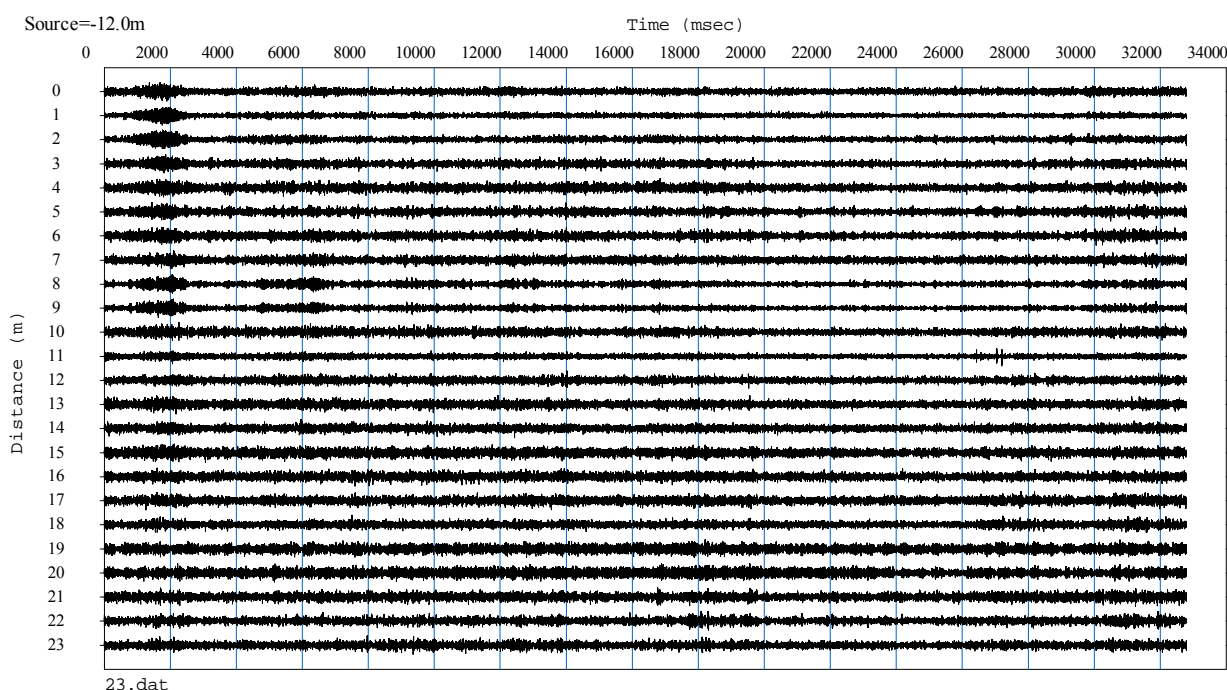


Figura 3: esempio di registrazione di rumore utilizzato per l'applicazione della metodologia REMI

Figura 4: trasformazione velocità di fase – frequenza (FK): definizione della curva di dispersione (REMI)

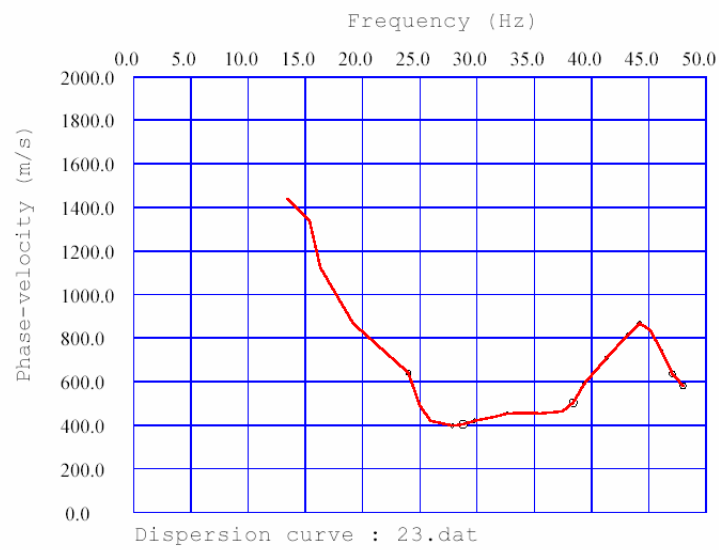


Figura 5: curva di dispersione ottenuta dall'analisi di rumore attraverso la metodologia REMI

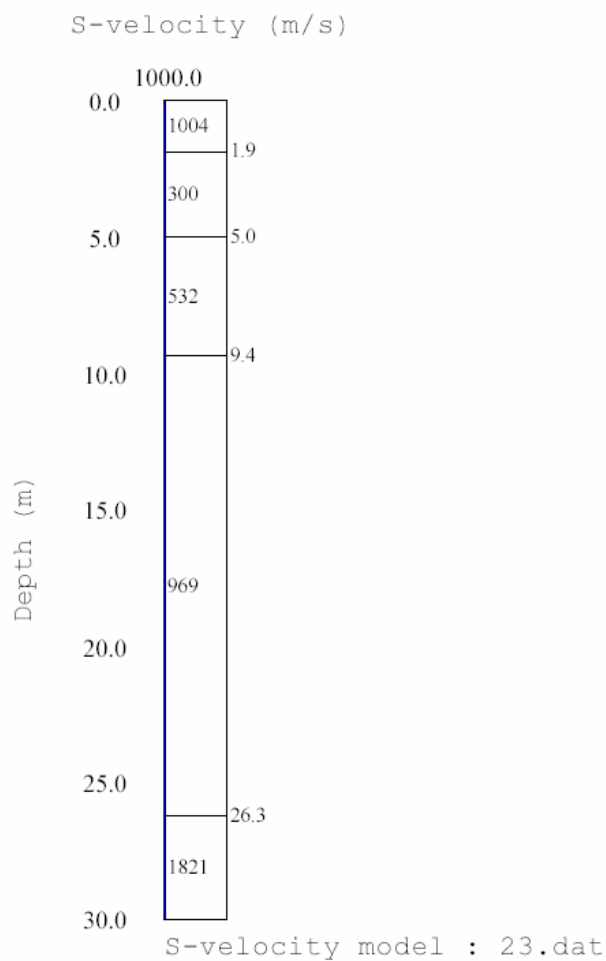


Figura 6: modello mono-dimensionale in Vs ottenuto tramite un processo di inversione della curva di dispersione ottenuto (figura 5) considerando un modello a 5 strati (REMI)

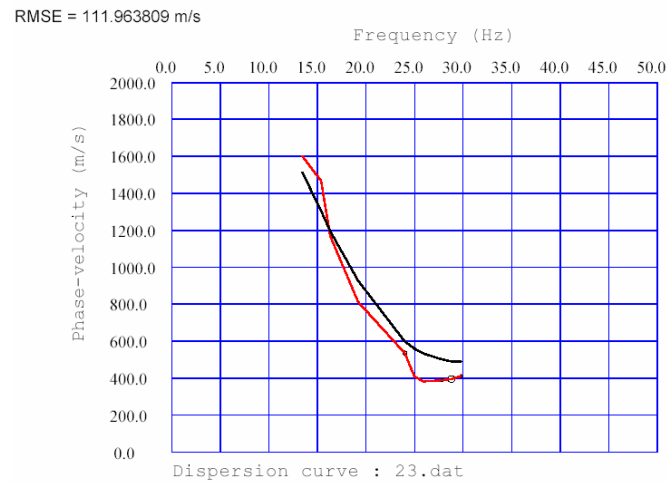


Figura 7: comparazione tra la curva teorica associata al modello 1D in figura 6 e la curva sperimentale derivata dalle registrazioni di rumore

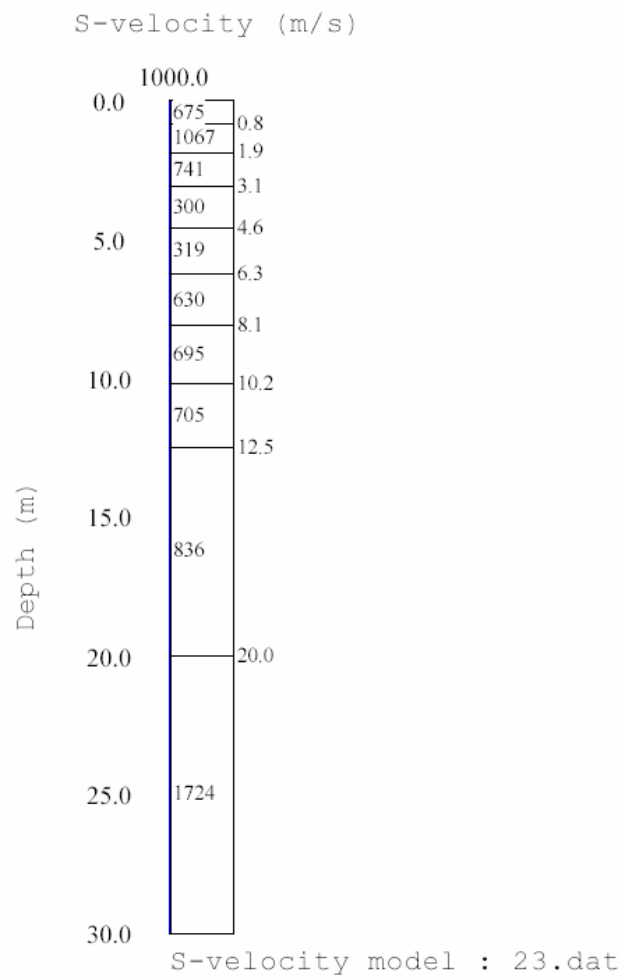


Figura 8: modello mono-dimensionale in Vs ottenuto tramite un processo di inversione della curva di dispersione ottenuto (figura 5) considerando un modello a 10 strati (REMI)

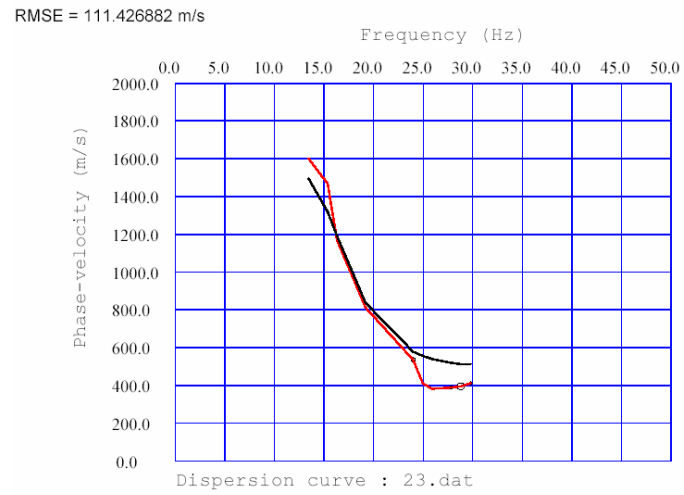


Figura 9: comparazione tra la curva teorica associata al modello 1D in figura 8 e la curva sperimentale derivata dalle registrazioni di rumore

## Tomografia sismica da onde rifratte

Come nel caso del REMI, la geometria di installazione della stesa ed in particolare la limitata lunghezza dell'array lineare, vincolata come già detto dalle condizioni logistiche di installazione presso il sito in esame, ha significativamente ridotto le reali potenzialità esplorative della metodologia per quanto riguarda la profondità di indagine raggiungibile. Considerando una regola empirica per cui la massima profondità raggiungibile può essere approssimativamente valutata pari a  $1/4 - 1/5$  la lunghezza della stesa, nel caso in esame, si può ipotizzare di riuscire a ricostruire con affidabilità il modello 2D di velocità  $V_p$  fino a circa 5-6 m di profondità. Ciò nonostante l'analisi effettuate risulta essere comunque idonea per riconoscere la presenza di un substrato veloce a profondità prossime ai 5 m. La distribuzione dei raggi sismici riportata in figura 14 (pannello inferiore) permette una valutazione qualitativa dell'effettiva dimensione dell'area risolta.

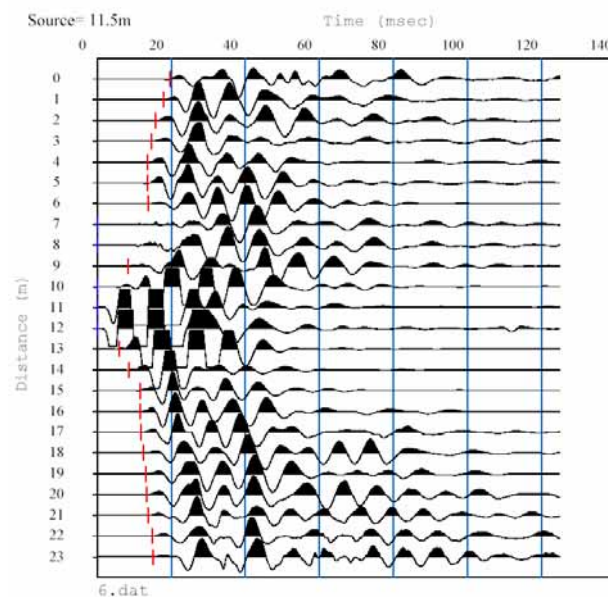


Figura 10: forme d'onda relative allo shot inline con offset dal 1°geofono pari a 11.5m

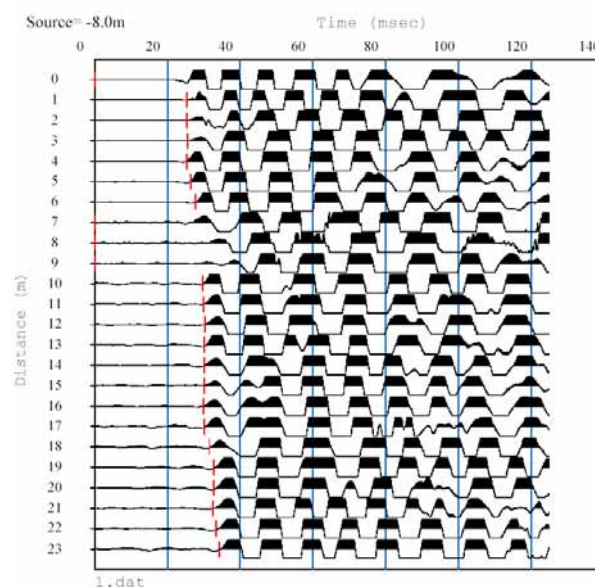


Figura 11: forme d'onda relative allo shot inline con offset dal 1°geo pari a 8m

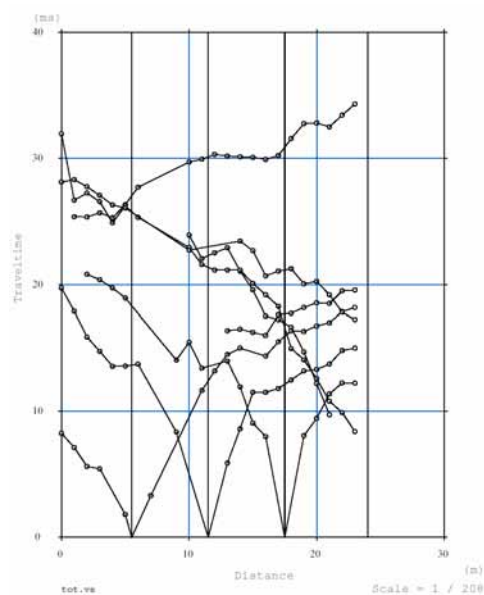


Figura 12: dromocrone sperimentali (fasi P) per 7 energizzazioni

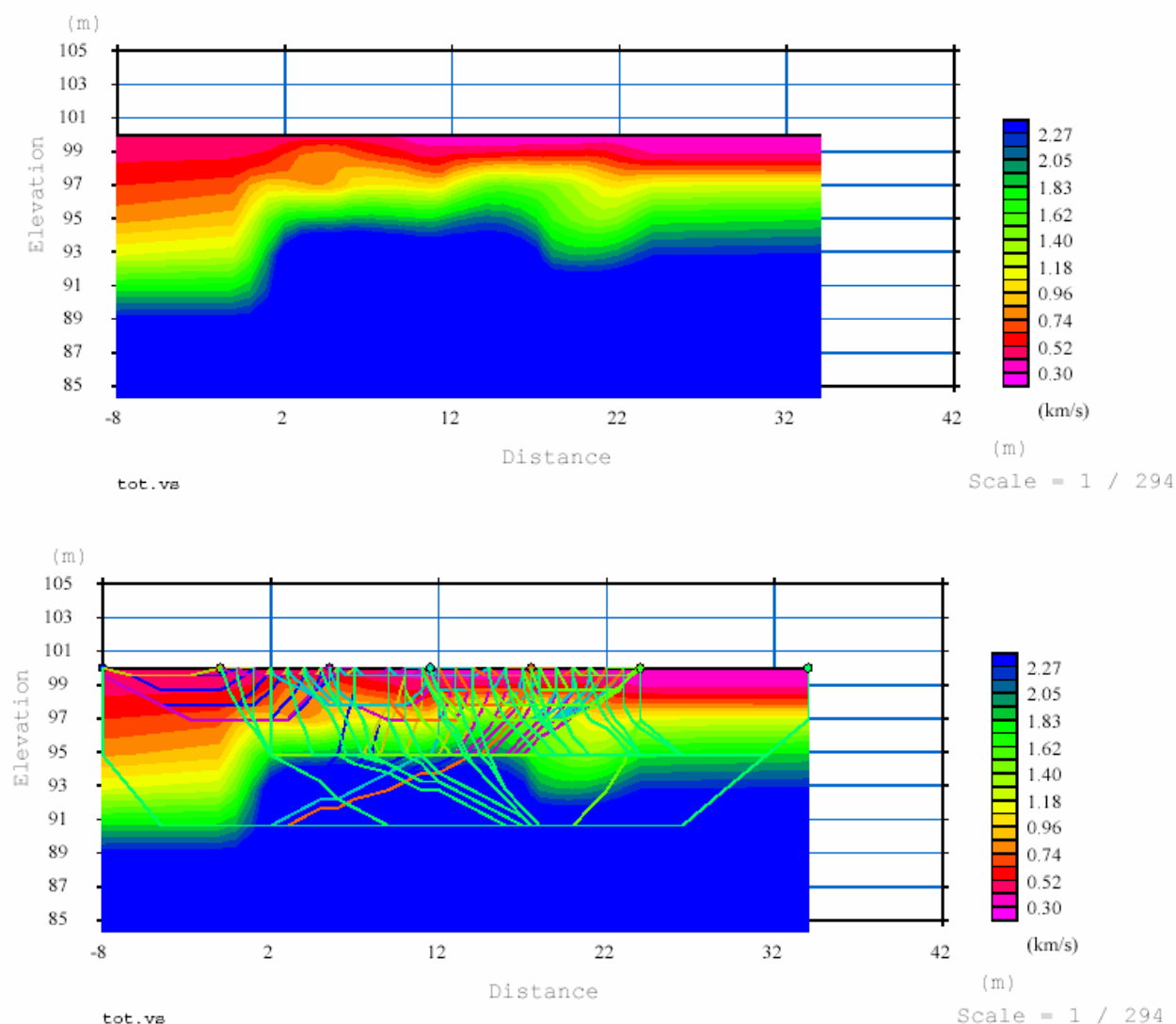


Figura 14: pannello superiore: risultato tomografia sismica (da rifrazione); modello 2D in  $V_p$ ; pannello inferiore: distribuzione dei raggi sismici e ubicazioni delle sorgenti in superficie (ubicate ad una distanza dal 1° geofono della stesa di -8, -1, 5.55, 11.5, 17.5, 24 e 34 m)

## 5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il sito investigato dal punto di vista geologico-geomorfologico ricade in un settore di versante caratterizzato da sottili coperture sciolte sovrastanti il substrato roccioso rappresentato dalla formazione dei Calcari del M.te Antola.

Attraverso l'interpretazione congiunta di tutti i risultati delle indagini geofisiche si possono individuare le seguenti caratteristiche geofisiche:

1. presenza di un contrasto di impedenza sismica significativo superficiale collocabile ad una profondità di 5 – 7 m. Tale contrasto è evidente sia dai rapporti spettrali H/V da rumore (picco di risonanza a frequenze maggiori di 16 Hz) sia dal modello ricavato attraverso la metodologia REMI sia del profilo tomografico ricavato dalle fasi rifratte.
2. il modello di velocità può essere approssimativamente descritto da due strati: il più superficiale ( $H < 5 - 7$  m) con  $V_p = 1000 - 1500$  m/s e  $V_s = 300 - 400$  m/s; il più profondo con  $V_p > 2000$  m/s e  $V_s > 700$  m/s. Tuttavia la profondità di analisi è fortemente limitata dalla lunghezza della stesa sismica (23 m).

Il contrasto di impedenza sopra citato può essere interpretato, dal punto di vista stratigrafico, come il passaggio tra la coltre costituita da riporti e terreni di natura eluvio-colluviale e i sottostanti calcari caratterizzati da un ulteriore livello superficiale alterato di circa 5.0 m di spessore.

In generale tutti i risultati ottenuti dalle diverse tipologie di indagini geofisiche convergono verso un modello geofisico-stratigrafico del sottosuolo univoco, le cui caratteristiche sono riassunte in figura 14 che ben si addice ad una situazione geologica di versante come quella rappresentata dall'area oggetto di studio.

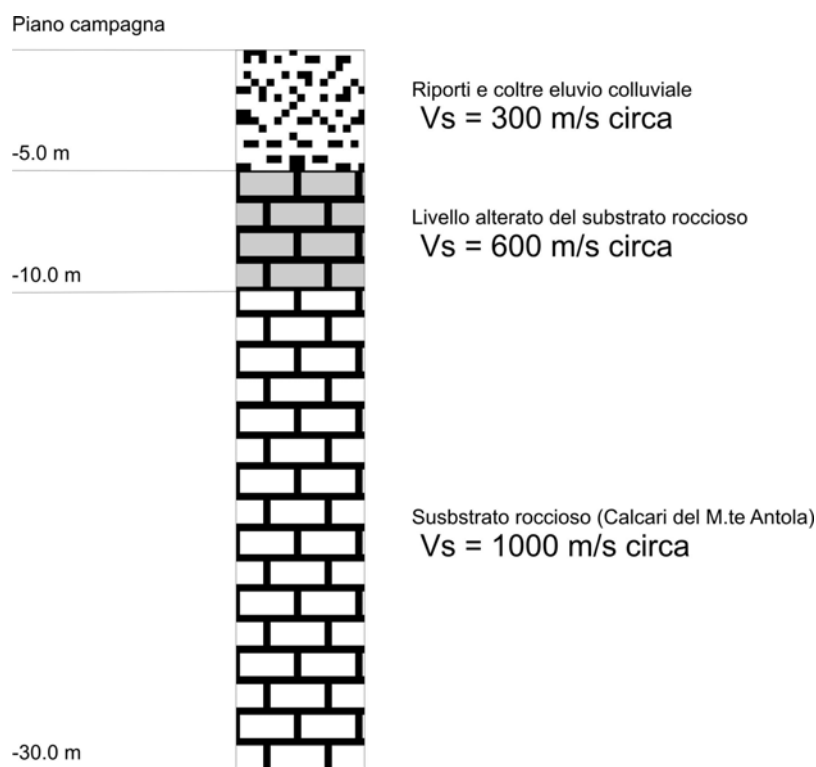


Figura 15: Modello stratigrafico ottenuto dalla sintesi dei risultati delle indagini geofisiche

Concludendo, alla luce dei risultati ottenuti, per il sito in esame è ragionevole presupporre una  **$V_{s30} = 817$  m/s** e pertanto con riferimento alla normativa vigente (O.P.C.M. 3274 / 2003) apparterebbe alla **Categoria di suolo di fondazione A**, “formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi con  $V_{s30}$  superiore 800 m/s comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5.0 m”

## Appendice

Al fine di valutare sperimentalmente le frequenze di risonanza dell'edificio in esame, è stata installata una rete sismica temporanea (per la durata di una settimana) a geometria verticale (una stazione per piano secondo un allineamento verticale). Sulla base di una metodologia basata sui rapporti spettrali H/V (analogamente alla metodologia Nakamura), le registrazioni raccolte hanno permesso una valutazione sperimentale delle frequenze di risonanza della struttura.

**Misure di rumore ambientale interne** considerando un array verticale installato all'interno dell'edificio a differenti piani (4 stazioni funzionanti dal 24.10.07 al 31.10.07)

Sta1: piano terra-palestra

Sta2: primo piano-cucina

Sta3: piano terzo

Sta4: piano quarto (ultimo piano)

