

**Sig.ri**

**LAZZARIN OSCAR GIANNI**

**DE FANTI VALENTINA**

**LAZZARIN PAOLO**

-----  
**INDAGINE GEOLOGICO GEOFISICA**

**PER LA CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI**

**secondo NTC 2018 dei terreni interessati dal progetto:**

**“ISTANZA DI VARIANTE AL PIANO REGOLATORE GENERALE AI SENSI  
DELL'ART.11 DELLA L.R. 31.12.2012 N.55 MODIFICATIVO DELL'ART.48  
DELLA L.R. 11/2004 COMMA 7.”**

**in località Nogarè (BL) sul terreno cat. censito al Fo.59 mapp.le 922**

-----  
**Feltre, 07 Maggio 2020**

*Handwritten signature in blue ink, possibly reading "S. Bartolomei" or similar.*

## 1. Introduzione;

## 2. Metodologia di analisi;

- metodo MASW (Multichannel Analysis Of Surface Waves);
- metodo E.S.A.C. (Extended Spatial Autocorrelation (OHORI ET AL, 2002, OKADA, 2003));
- Profilo sismico a rifrazione con onde di compressione P;
- Analisi del rapporto spettrale HVSr o tecnica di Nakamura:

## 3. Profili Sismici e calcolo del parametro $V_{s30}$ ;

- Profilo Sismico MASW ed ESAC;
- Calcolo  $V_{s30}$ ;
- Profilo a rifrazione con onde di compressione P;
- Analisi del rapporto spettrale HVSr o tecnica di Nakamura:
  - HVSr1 e HVSr2
- Cenni sul periodo di vibrazione di edifici esistenti in c.a.;

## 4. Conclusioni;

### 1. Introduzione:

Su richiesta dei dell'Architetto Cristiano Musu e per conto dei Sig.ri Lazzarin Oscar Gianni, De Fanti Valentina, Lazzarin Paolo si è eseguita il seguente studio geologico geofisico dei terreni inerenti il progetto di "ISTANZA DI VARIANTE AL PIANO REGOLATORE GENERALE AI SENSI DELL'ART.11 DELLA L.R. 31.12.2012 N.55 MODIFICATIVO DELL'ART.48 DELLA L.R. 11/2004 COMMA 7.", siti in località Nogarè (BL) e catastalmente censiti al Fo.59 mapp.le 922.

Lo studio deve caratterizzare da un punto di vista micro sismico i terreni dell'area e determinarne la categoria sismica come richiesto dalle norme delle costruzioni NTC2018.

La classificazione dei suoli avviene come previsto dalla normativa sulla base del parametro  $V_{s30}$ , questo rappresenta la velocità media di propagazione delle onde di taglio S entro i 30 m di profondità per un "volume significativo"<sup>1</sup>, ed è calcolato mediante la seguente espressione:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \left( \frac{H_i}{V_i} \right)}$$

Dove  $H_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo, per N strati presenti nei 30 m superiori.

L'acquisizione delle velocità delle onde di taglio può essere fatta secondo varie metodologie, prove in foro (down-hole, cross-hole), profili sismici a rifrazione con uso di geofoni orizzontali e

<sup>1</sup> "Per volume significativo di terreno si intende la parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso." DM 14-01-2008

energizzazione di onde SH, analisi delle onde superficiali di Rayleigh (SASW, MASW e Refraction Microtremor).

Nel presente sito per la valutazione del parametro  $V_{s30}$ , si sono eseguite le misure del valore medio di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di sottosuolo tramite l'acquisizione di due stendimenti sismici, di cui uno acquisito con tecnica attiva MASW (Multichannel Analysis Of Surface Waves) con la generazione di onde di superficie (Rayleigh), ed uno con tecnica passiva ESAC (Extended Spatial Autocorrelation (OHORI ET AL, 2002, OKADA, 2003), si è acquisito inoltre un profilo di sismica a rifrazione con onde di compressione P, posto sullo stesso asse del profilo MASW, per una migliore caratterizzazione delle prime morfologie del sottosuolo.

Lo studio inoltre è stato integrato da due punti di misura a stazione singola HVSR con l'acquisizione delle componenti verticali ed orizzontali dello spettro vibrazionale secondo la tecnica HVSR o tecnica di Nakamura.

La planimetria in allegato evidenzia in dettaglio la posizione e la geometria degli stendimenti sismici acquisiti.

## 2. Metodologia di analisi

Gli stendimenti sismici sono stati ubicati e ottimizzati in base allo spazio disponibile nell'area di studio.

Gli stendimenti sismici MASW e a rifrazione sono stati acquisiti con una disposizione lineare sulla base di 22 geofoni equi distanziati di 2.0 m, per uno sviluppo totale di 42 m, questi sono stati sviluppati diagonalmente nell'area di studio con orientazione SUD-NORD (Foto-1).

Per l'acquisizione dei dati si è provveduto ad energizzare il terreno alle distanze di 2.5, 5 m dal primo ed ultimo geofono (shots offset); in fase di elaborazione si sono scelti i sismogrammi che fornivano i migliori risultati.

Lo stendimento sismico ESAC è stato sviluppato a forma di L parallelamente ai lati dell'appezzamento di terreno ed indicativamente orientati secondo le direzioni SW-NE e SE-NW, sulla base di 23 geofoni equi spazati di 2.0 m per uno stendimento di 22+22 m di lato (Foto-2).

L'acquisizione dei dati sismici prevede l'acquisizione delle micro vibrazioni dell'area durante alcune finestre temporali di 30".

Per l'acquisizione dei dati sismici si è utilizzato un sismografo OYO DAS-1 con 48 canali ed acquisizione a 24 bit del segnale e si sono utilizzati geofoni verticali marca Sensor con frequenza di risonanza di 8 Hz.

Dall'analisi spettrale delle velocità di fase dei segnali e del rumore sismico si ottiene l'immagine dello spettro, questi tramite un software dedicato, permettono di calcolare il modello di distribuzione delle velocità  $V_s$  nel sottosuolo e su questo modello si è calcolato il valore medio  $V_{s30}$  richiesto dalla

normativa.

Si è provveduto ad acquisire anche due profili a stazione singola HVSR (tecnica di Nakamura), mediante una terna di geofoni a bassa frequenza di risonanza (4.5 Hz) che ha permesso di registrare la componente verticale e le due orizzontali delle microvibrazioni dell'area per il calcolo dei rapporti spettrali HVSR, per la determinazione del periodo di vibrazione proprio del terreno.

Questo tipo di misura prevede l'utilizzo di una terna di geofoni a bassa frequenza (HVSR) che sono stati posizionati in modo da avere sempre le due componenti orizzontali allineate verso Nord-Sud ed Est-Ovest.

- Generalità sul metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Il metodo MASW è una tecnica non invasiva che permette la misura delle velocità delle onde di taglio nel terreno misurando la propagazione della perturbazione dell'onda sismica sulla superficie del terreno.

Il contributo maggiore della perturbazione è data dalle onde di Rayleigh, che si propagano con una velocità che è strettamente correlata con le caratteristiche elastiche della porzione di suolo dove si propagano le onde.

In un semispazio stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè le onde di differente lunghezza d'onda si propagano con velocità diverse di fase e di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980).

Questo significa che la velocità di fase apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza.

Il fenomeno della dispersione è collegato al fatto che le onde con alta frequenza (corta lunghezza d'onda) viaggiano prevalentemente attraverso i terreni superficiali, mentre le onde di bassa frequenza (onda lunga) interessano strati più profondi durante la propagazione (Fig.1).

- Generalità sul metodo ESAC (Extended Spatial Autocorrelation)

La tecnica ESAC è una tecnica di misura sismica passiva che prevede l'acquisizione del rumore sismico ambientale o microtremori.

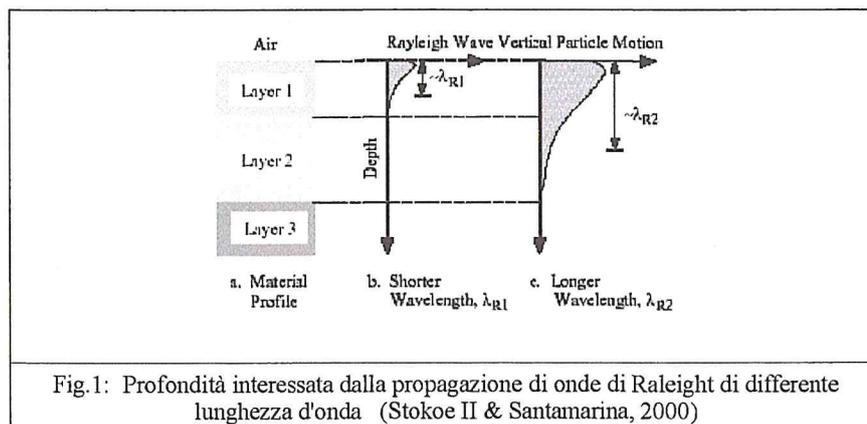
Si definiscono microtremori le oscillazioni molto piccole, rispetto a quelle dei terremoti, comprese tra le frequenze di 0,1 e 20 Hz, e sono legate a varie cause.

Queste oscillazioni sono i rumori sismici ambientali e sono dovuti al vento, alle onde del mare o dell'oceano, ma anche ai macchinari o ai veicoli. Le seconde sono facilmente individuabili per le alte frequenze mostrate. Di seguito si riporta il contributo dei microtremori secondo due autori della letteratura tecnica:

| <b>SORGENTI</b>                             | <b>Gutenberg</b> | <b>Asten - Asten e Henstridge</b> |
|---|------------------|-----------------------------------|
| Onde oceaniche sulle coste                  | 0.05 – 0.1 Hz    | 0.05 – 1.2 Hz                     |
| Perturbazioni meteorologiche a grande scala | 0.1 - 0.25 Hz    | 0.16 – 0.5 Hz                     |
| Cicloni oceanici                            | 0.3 – 1 Hz       | 0.5 – 3 Hz                        |
| Condizioni meteorologiche locali            | 1.4 – 5 Hz       | -                                 |
| Tremori vulcanici                           | 2 – 10 Hz        | -                                 |
| Attività antropica                          | 1-100 Hz         | 1.4 – 30 Hz                       |

Il contributo maggiore di queste perturbazioni è data dalle onde di Rayleigh, che si propagano con una velocità che è strettamente correlata con le caratteristiche elastiche della porzione di suolo dove si propagano le onde.

Similmente a quanto esposto per il profilo MASW anche qui le onde di Rayleigh propagandosi in un mezzo stratificato quale è il sottosuolo hanno un comportamento dispersivo e quindi onde di differente lunghezza d'onda si propagano con velocità diverse di fase e di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980); quelle con un'alta frequenza (corta lunghezza d'onda) viaggiano prevalentemente attraverso i terreni superficiali, mentre quelle con onde di bassa frequenza (onda lunga) interessano strati più profondi (Fig.1).



L'elaborazione dei dati acquisiti sia con tecniche attive MASW che passive ESAC, consiste nell'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh mediante una trasformata bidimensionale "slowness-frequency" ( $p$ - $f$ ) che analizza l'energia di propagazione dello "spettro di rumore" o "dell'impulso sismico" lungo la linea sismica e la successiva rappresentazione su di un grafico  $p$ - $f$  dello spettro di potenza.

I dati selezionati nell'immagine  $p$ - $f$  vengono graficati in un diagramma velocità di fase - frequenza, da cui è possibile ottenere un primo modello monodimensionale, successivamente un processo di inversione ad elementi finiti calcola la distribuzione delle velocità  $V_s$  nel sottosuolo che più si avvicina nei termini R.S.M. ai dati acquisiti.

Nei profili passivi, l'acquisizione dei dati sismici, è bene che venga effettuata su più finestre

temporali in modo da acquisire una immagine statisticamente significativa dello spettro di frequenze dei microtremori dell'area.

Il segnale dei “microtremori”, infatti, è variabile nel tempo in quanto legato al rumore ambientale nel sottosuolo generato in parte da attività antropica ed in parte da cause naturali.

- Analisi del rapporto spettrale HVSR o tecnica di Nakamura:

La tecnica sismica passiva a stazione singola denominata HVSR (Horizontal to Vertical Signal Ratio: rapporto spettrale tra componenti orizzontali H e componenti verticali V; Nogoshi e Igarashi, 1979; Nakamura, 1989) permette di avere una stima delle frequenze proprie di vibrare dei terreni.

L'acquisizione dello spettro dei microtremori fatto con tecnica HVSR, prevede l'acquisizione delle microvibrazioni dell'area lungo tre assi ortogonali, della componente verticale e delle due orizzontali, mediante l'utilizzo di una terna di geofoni a bassa frequenza di risonanza e lunghi tempi di registrazione.

L'elaborazione spettrale dei microtremori tramite il metodo HVSR è stata fatta usando il software Geopsy ed applicando nell'elaborazione uno smoothing dei segnali secondo Konno & Ohmachi con una finestra di smoothing di 25 e l'uso di un cosine taper del 5%.

Questo tipo di elaborazione permette di valutare il rapporto tra la componente verticale e le due componenti orizzontali dei microtremori presenti nell'area e fornisce indicazioni sulle frequenze di risonanza del terreno e le amplificazioni vibrazionali di strutture risonanti alle stesse frequenze per effetto di doppia risonanza terreno-costruzione con possibili effetti distruttivi.

- Generalità sul metodo di sismica a rifrazione con onde di compressione P:

La sismica a rifrazione valuta il tempo di arrivo ai geofoni della prima perturbazione sismica indotta al suolo, che si propaga come onda di compressione onda P.

L'energizzazione del suolo, per la generazione delle onde di compressione (P), avviene tramite la generazione di un colpo inferto verticalmente mediante una mazza di 7 Kg ed una opportuna piastra di battuta. Spostando opportunamente il punto di shot, e la geometria di acquisizione, si riesce ad indagare il sottosuolo in profondità ed individuare le geometrie ed i sismostrati che lo compongono.

Tracciando il tempo di arrivo della perturbazione sismica che dalla sorgente (shot) si propaga lungo il profilo sismico, su di un grafico tempo-distanza, si ottiene il grafico delle dromocrone.

Da questo è possibile individuare ad ogni cambio di pendenza un diverso rifrattore sismico e una volta nota la velocità dei diversi rifrattori è possibile calcolarne la rispettiva profondità, e renderla su di un grafico (sismostrati Fig.4).

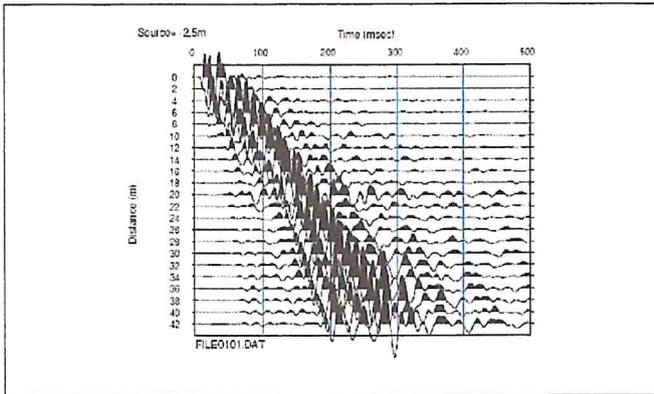


Fig.2: SS1 profilo sismico a rifrazione con onde P, sismogrammi acquisiti con shot a -2.5 m offset

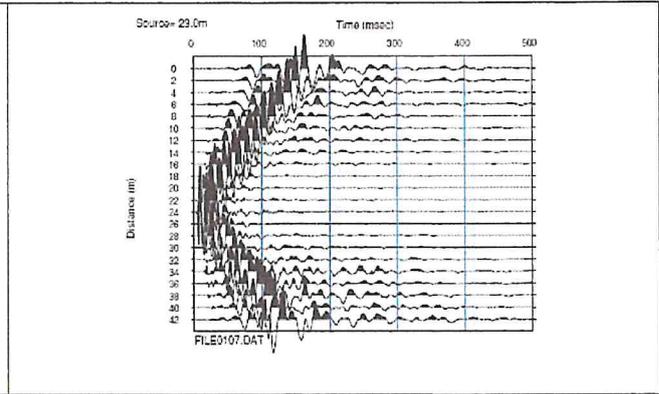


Fig.3: SS1 profilo sismico a rifrazione con onde P, sismogrammi acquisiti con shot a 23.0 m

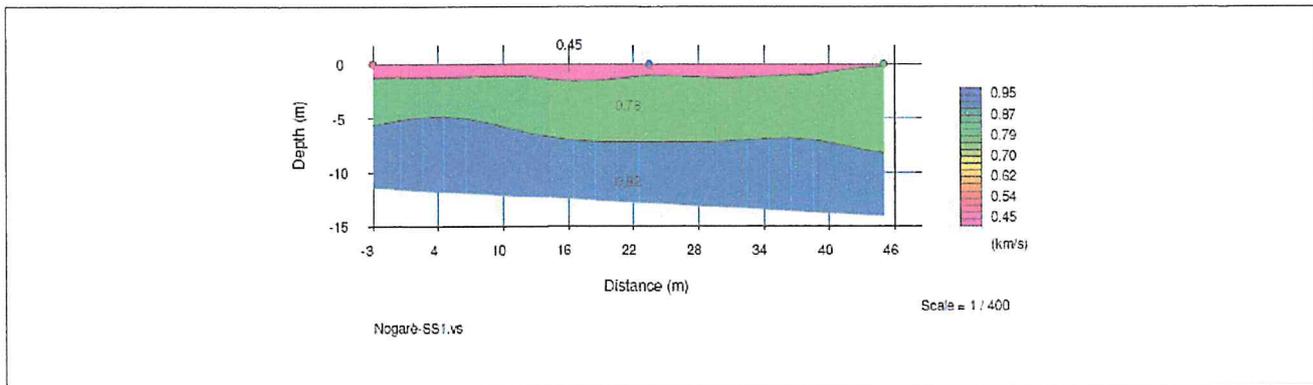


Fig.4: SS1 profilo sismico a rifrazione con onde P, sezione sismica elaborata, isocroni e loro velocità

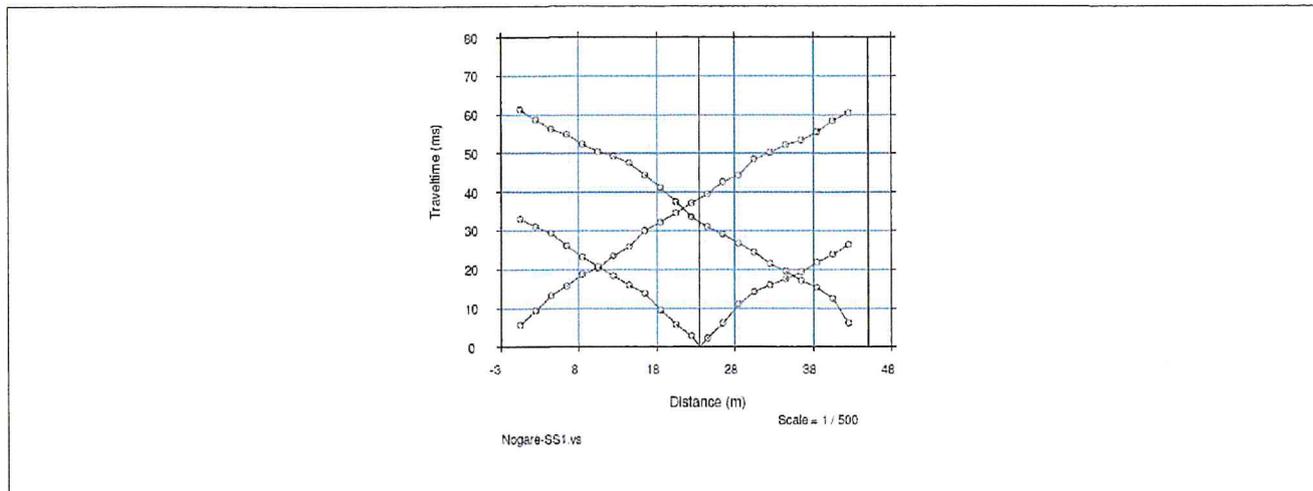


Fig.5: dromocrone profilo sismico a rifrazione con onde di compressione

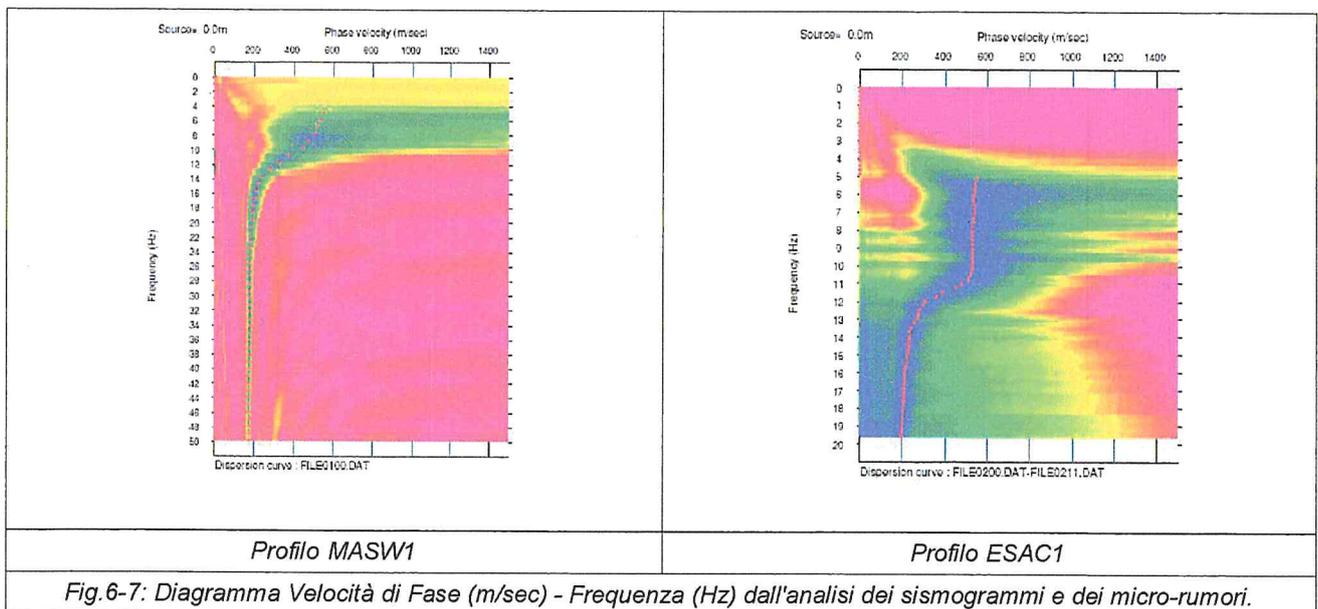
### 3. Profili Sismici e calcolo del parametro $V_{s30}$

#### • Profili sismici MASW ed ESAC

L'acquisizione dei profili sismici MASW ed ESAC si è dimostrata più che sufficiente per avere uno spettro significativo delle frequenze e delle delle micro vibrazioni dell'area, di queste si sono scelte quelle più idonee alla elaborazione con il miglior rapporto segnale/rumore e dalle quali si è calcolato lo spettro di dispersione (fase-frequenza) che hanno evidenziato delle curve ben individuabili e continue nel range di frequenze tra circa 5 e 20 Hz di cui si sono scelte le terne velocità di fase, frequenza ed ampiezza più idonee all'analisi.

Lo spettro complessivo mostra una buona rappresentazione del campo a medio-bassa frequenza che rappresenta i terreni più profondi e mostra valori di velocità fase-frequenza di valore medio, si evidenzia un cambio abbastanza netto della pendenza della curva di dispersione ad una frequenza di circa 10 Hz in entrambi i profili, che appaiono molto simili nell'andamento della curva di dispersione.

Le immagini degli spettri velocità di fase e frequenza (Fig.6-7) ed i valori campionati (Fig. 8-9) mostrano una curva ben definita e riconoscibile.



Dall'elaborazione delle curve campionate si genera un primo modello sismostratigrafico e tramite un processo di inversione e di modeling diretto, si ricava il modello sismico monodimensionale (1D) (Fig. 10-11) le cui caratteristiche sismostratigrafiche sono quelle medie sulla lunghezza dello stendimento.

Su questo modello viene calcolato il valore del parametro  $V_{s30}$  richiesto dalle norme NTC2018.

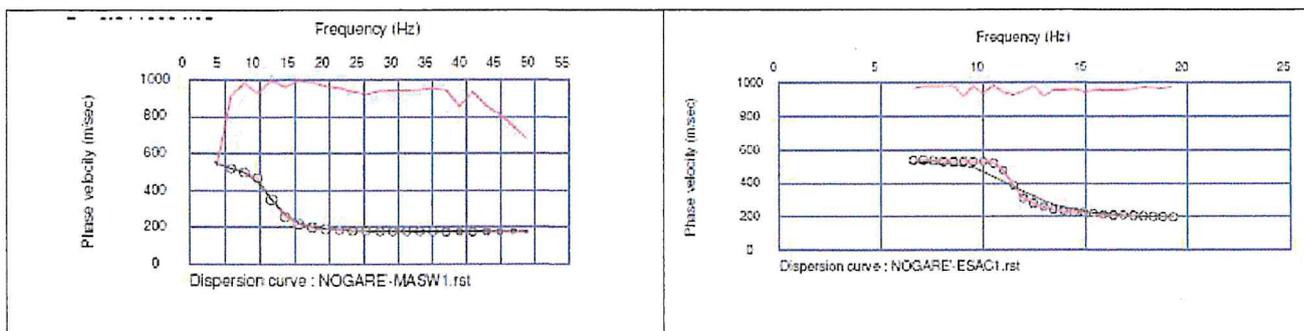


Fig.8-9: Curva di dispersione dei valori selezionati sui diagrammi (Fig.6-7), velocità di fase (m/sec) - frequenza (Hz), il best fit calcolato (tratto nero), qualità misure (tratto rosso in alto).

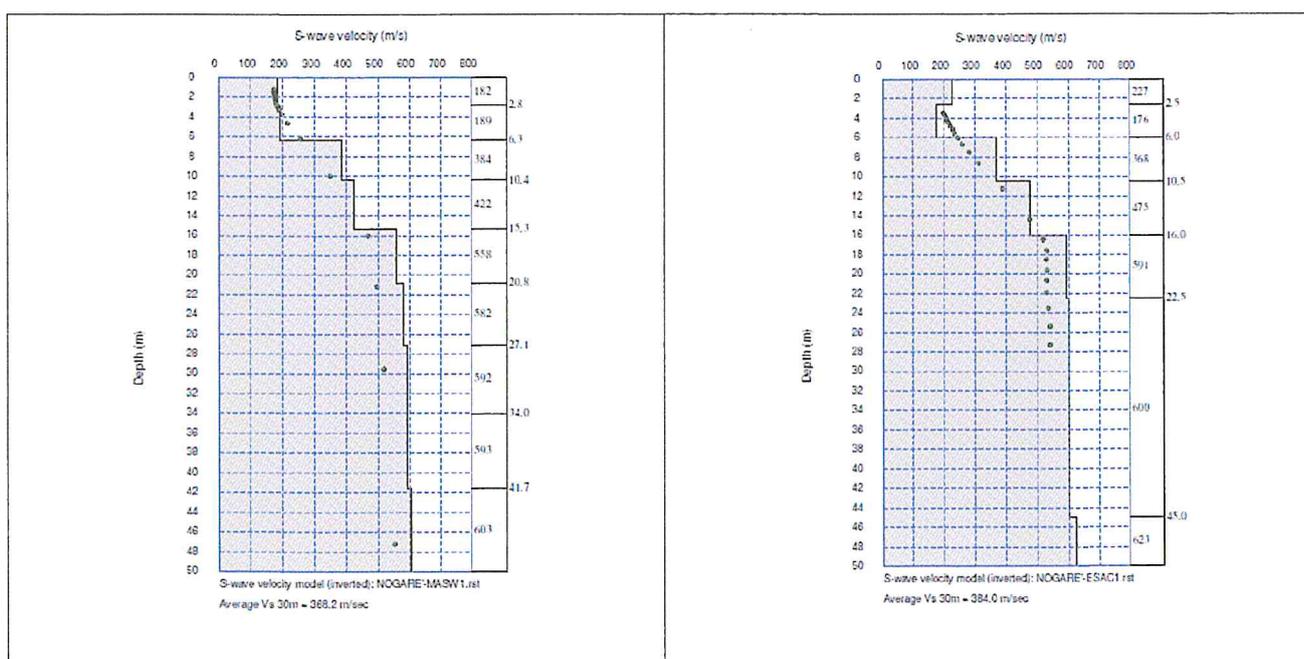


Fig.6-7: Profili MASW1 ed ESAC1: Modelli calcolati della distribuzione della velocità Vs nel sottosuolo e velocità apparente campionata (punti verdi), e rispettivo valore Vs 30 calcolato;

• **Calcolo Vs<sub>30</sub>:**

Sulla base dei risultati dei profili sismici MASW ed ESAC e del profilo sismico a rifrazione si è potuto caratterizzare i terreni dell'area da un punto di vista sismico e calcolarne il parametro Vs30, come previsto delle norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018).

I valori elaborati dai due profili mostrano valori confrontabili di Vs30, la leggera differenza è da attribuirsi a piccole differenze nelle due metodiche, il MASW più sensibile ai cambiamenti superficiali grazie allo spettro più spostato verso le alte frequenze, quello ESAC con lo spettro esteso verso le basse frequenze. Sulla base delle risultanze si è calcolato il valore medio fino ai trenta metri di profondità (Vs30) che risulta:

MASW1  $V_{s30} = 368$  m/sec

==> Valore medio  $V_{s30} = 376$  m/sec.

ESAC1  $V_{s30} = 384$  m/sec

Le presenti NTC 2018 nel *Cap.3.2 AZIONE SISMICA, par. 3.2.2 Categorie di suolo e Condizioni topografiche*:

classificano la media delle velocità di taglio dei terreni da p.c. fino a 30 m come rientranti in:

**Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.**

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica   |
|-----------|--|
| A         | Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.   |
| B         | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.  |
| C         | Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.   |
| D         | Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. |
| E         | Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.  |

**CATEGORIA B** : "Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s."

• **Condizioni Topografiche**

**Tab. 3.2.III – Categorie topografiche**

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica  |
|-----------|---|
| T1        | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$                      |
| T2        | Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$  |
| T3        | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ |
| T4        | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$                  |

L'area non mostrando condizioni topografiche rientra in **categoria T1**, ovvero "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $\leq 15^\circ$ ."

- **Profilo sismico a rifrazione con onde P:**

L'interpretazione dei dati di sismica a rifrazione parte dall'analisi degli oscillogrammi dai quali si ottengono le dromocrone (Fig.5), i diagrammi spazio/tempo dei primi arrivi della sollecitazione sismica ai vari geofoni, da cui si può riconoscere la presenza dei rifrattori, cioè di sismostrati a velocità crescente di trasmissione delle onde P.

L'esecuzione del profilo sismico a rifrazione ha permesso di evidenziare meglio la morfologia dei rifrattori sismici, le interfacce sismiche che delimitano strati con caratteristiche di impedenza sismica differente (impedenza sismica è il prodotto della densità dello strato  $\rho$  e la velocità delle onde sismiche, si definisce  $I = \rho_i * V_{s_i}$  ).

L'elaborazione ha permesso di riprodurre su sezione la morfologia dei rifrattori sismici e le velocità sismiche loro attribuite. (Fig.4)

Le velocità sismiche evidenziano una situazione sismo stratigrafica, nella parte alta del sottosuolo, riconducibile a tre strati, caratterizzati da velocità sismiche che aumentano con la profondità.

Si riconosce un primo strato superficiale con velocità delle onde di compressione P di valore basso di 0.45 Km/s, con uno spessore di circa un metro.

Questo è riconducibile alla copertura dei terreni limo sabbiosi ghiaiosi superficiali allo stato sciolto.

Il secondo sismostrato evidenzia velocità delle onde di compressione P medio basse di circa 0.8 Km/s, con una morfologia dello strato leggermente ondulata che si estende fino a circa 6-7 m da p.c.

Sulla base delle velocità sismiche misurate, della morfologia ed alle caratteristiche geomorfologiche dell'area, questo sismostrato può essere correlato a sedimenti ghiaiosi sabbiosi, allo stato mediamente addensato.

Segue il terzo sismostrato, di cui non si è arrivato ad individuare lo spessore, che mostra velocità appena più alte di 0.9 Km/s e che si estende in profondità; queste velocità possono essere correlabili a sedimenti ghiaiosi sabbiosi, allo stato da mediamente addensato.

- **Analisi del rapporto spettrale HVSR o tecnica di Nakamura:**

- **HVSR PUNTI 1 e 2:**

Una stima delle frequenze proprie di vibrare dei terreni è possibile tramite la tecnica sismica passiva a stazione singola denominata H/V (rapporto spettrale tra componenti orizzontali H e componenti verticali V; Nogoshi e Igarashi, 1979; Nakamura, 1989).

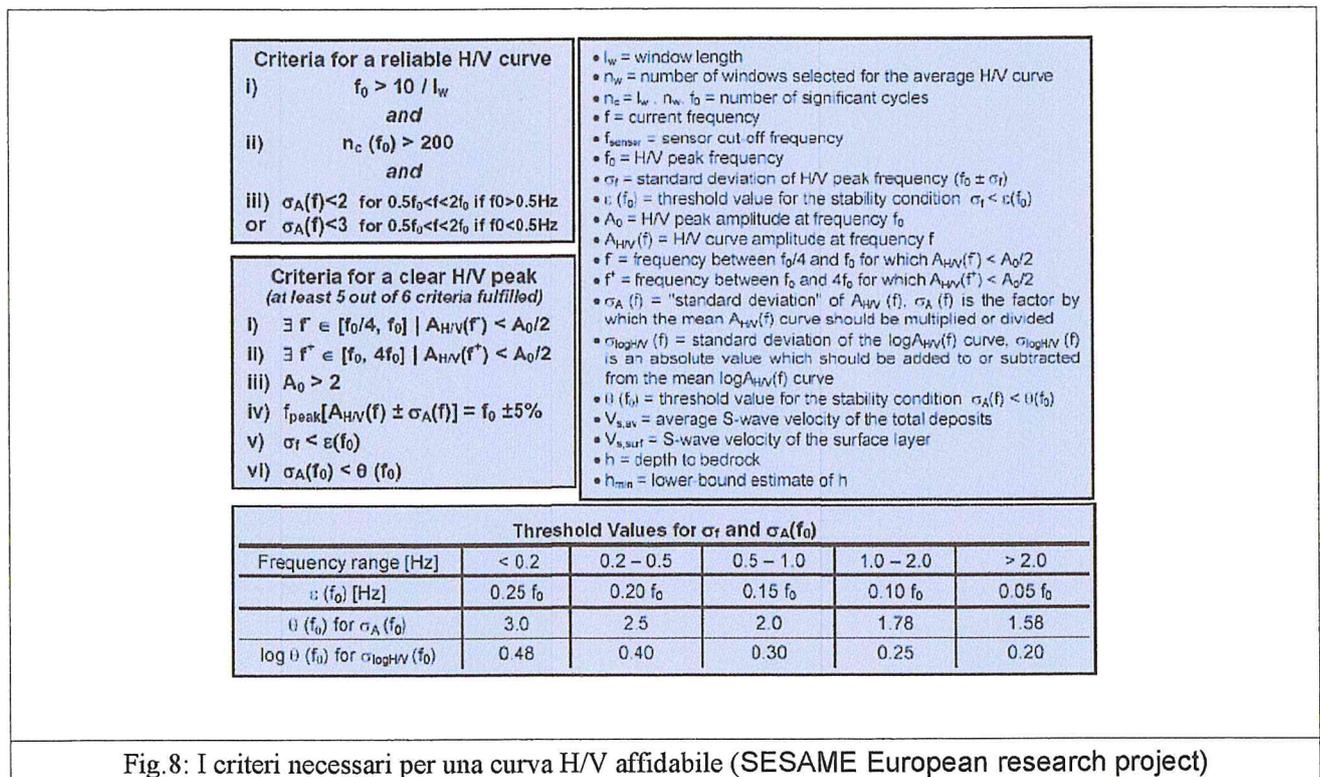
L'acquisizione dello spettro dei microtremori fatto con tecnica HVSR, prevede l'acquisizione delle microvibrazioni dell'area lungo tre assi ortogonali, della componente verticale e delle due orizzontali, mediante l'utilizzo di geofoni a bassa frequenza di risonanza e lunghi tempi di registrazione.

La corretta elaborazione di questi dati impone che siano rispettati dei criteri (Fig.8) per poter validare i risultati e ritenere le curve di amplificazione significative.

Questi criteri seguono le linee guida del progetto europeo su cui sono basate "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations – measurements, processing and interpretation", SESAME European research project.

Le linee guida (Fig.8) indicano che una curva HVSR per poter essere considerata significativa deve soddisfare almeno 5 punti su 6.

Le dati elaborati delle HVSR1 e 2 (Fig.10-11) soddisfano tutti i criteri di qualità ed affidabilità richiesti dalle linee guida del progetto Sesame (Fig.8).



L'elaborazione spettrale dei microtremori tramite il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Signal Ratio) è stata fatta usando il software Geopsy ed applicando nell'elaborazione uno smoothing dei segnali secondo Konno & Ohmachi con una finestra di smoothing di 25 e l'uso di un cosine taper del 5%.

Questo tipo di elaborazione permette di valutare il rapporto tra la componente verticale e le due componenti orizzontali dei microtremori presenti nell'area e fornisce indicazioni sulle frequenze di risonanza del terreno e le possibili amplificazioni vibrazionali di strutture risonanti alle stesse frequenze.

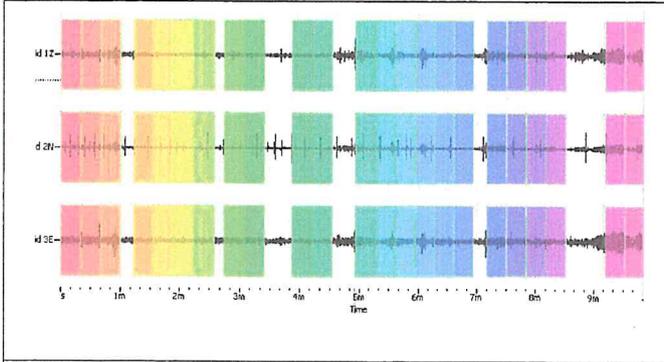


Fig.8: HVSAR1: registrazione di rumore ambientale, intervalli di misura stazione-1 esterna (dall'alto in basso, componenti vert., NS, EW)

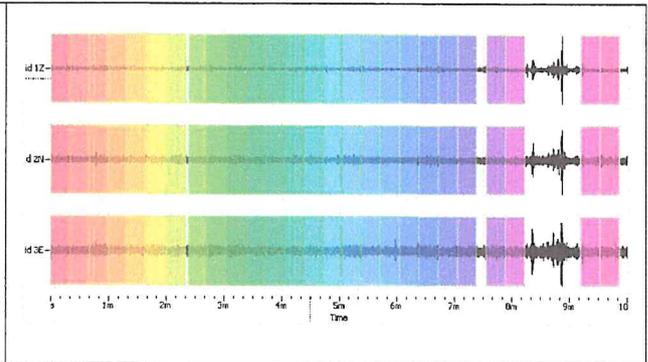


Fig.9: HVSAR2 registrazione di rumore ambientale, intervalli di misura stazione-2 esterna (dall'alto in basso, componenti vert., NS, EW)

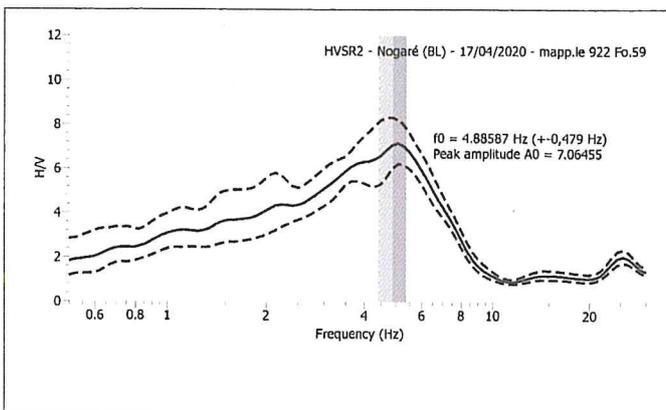


Fig.10: HVSAR1: rapporti H/V stazione-1, evidenziato il picco e piu'/meno la deviazione standard

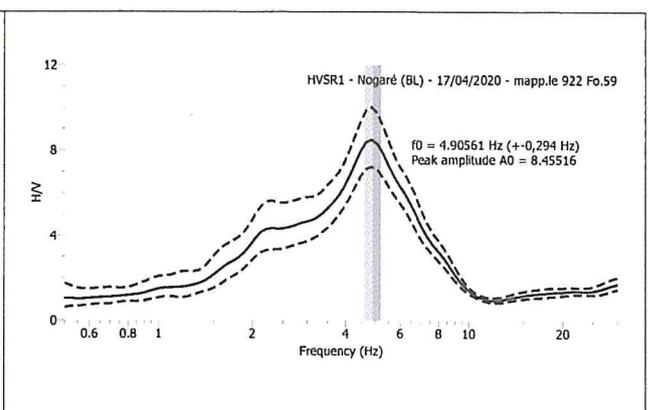


Fig.11: HVSAR2: rapporti H/V stazione-2, evidenziato il picco e piu'/meno la deviazione standard

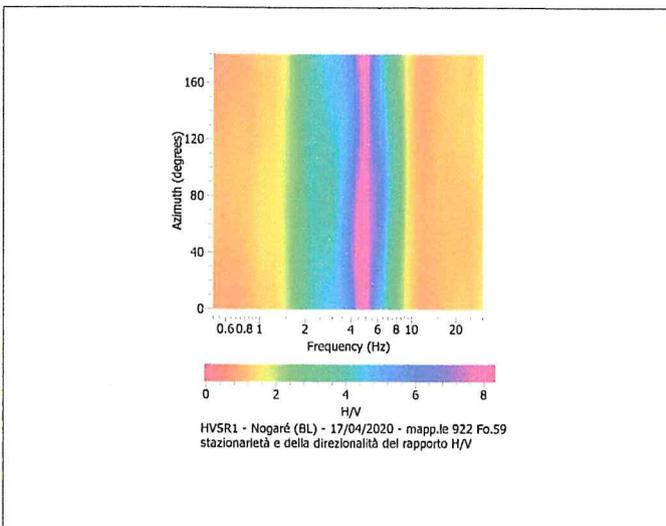


Fig.12:HVSAR1 stazionarietà e direzionalità rapporto H/V

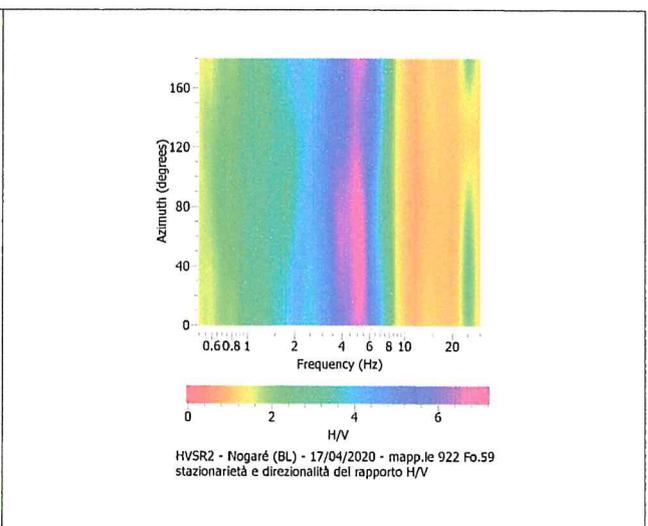


Fig.13:HVSAR2 stazionarietà direzionalità rapporto H/V

L'elaborazione dei rapporti spettrali acquisiti sono visibili nelle curve HVSAR riportate nel diagramma di Fig.10-11, che mostrano entrambe un chiaro ed evidente picco alla frequenza di 4,9 Hz, con un rapporto di picco massimo  $A_0 = 7,1$  e  $8,4$ .

Questo può essere correlato ad una risonanza del terreno data da un orizzonte stratigrafico competente in profondità.

Utilizzando per il calcolo la formula della risonanza e utilizzando come velocità quella media misurata nei primi 20 metri con le prove MASW ed ESAC,

$$(f_0 = V_s / 4 \times h) \text{ da cui}$$
$$h = V_s / (4 \times f_0) = (303 \text{ m/s}) / (4 \times 4.9 \text{ Hz}) = 15,5 \text{ m}$$

si ottiene una profondità di 15,5 m.

Questa profondità è la stessa in cui le due prove MASW ed ESAC evidenziano un salto di velocità a circa 15-16 m di profondità.

L'elaborazione dei rapporti spettrali HVSR acquisiti nell'area mostra la presenza di un evidente picco con un fattore di ampiezza di  $A_0 = 7,1$  e  $8,4$ .

Trattasi di un fattore di amplificazione significativo anche se ad una frequenza relativamente elevata (4,9 Hz pari ad un periodo di  $T=0.2$  s).

Il riferimento tecnico "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations – measurements, processing and interpretation", SESAME European research project" riporta un valore minimo di attenzione  $A \geq 2$ .

Il sito potrebbe evidenziare amplificazioni sismiche dannose qualora la struttura dovesse risuonare alle stesse frequenze del suolo.

#### • Cenni sul periodo di vibrazione di edifici esistenti in c.a.

Esistono numerose formule semi empiriche per il calcolo del periodo proprio di una struttura in funzione della sua altezza e della sua tipologia. Fermo restando che tali periodi possono essere misurati in modo semplice anche tramite indagini passive, tra le varie formule proposte considereremo, a titolo di esempio le relazioni proposte in alcune normative internazionali (ATC, 1978; CEN, 2003; NZSEE, 2006) e da vari autori per le succitate differenti modalità di progettazione [Hong e Hwang (2000) per il metodo FBD; Chopra e Goel (2000); Crowley e Pinho (2004) per il metodo DBD].

In particolare, i valori forniti dall'espressione di maggiore interesse per gli edifici europei (CEN, 2003) sono stati confrontati con i risultati di un'ampia analisi parametrica basata su simulazioni analisi numeriche nonché con i risultati di vaste campagne di rilievo sperimentale del periodo fondamentale di edifici esistenti mediante analisi di vibrazione ambientale (Gallipoli et al., 2008; Navarro et al., 2004).

Nella Fig. 14 sono diagrammati i risultati ottenuti applicando le espressioni H-T fornite nei dei riferimenti più autorevoli sopra menzionati.

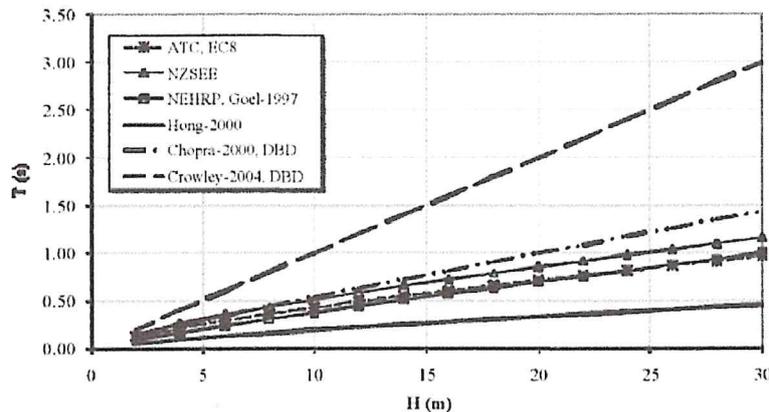


Fig.14: Relazioni semplificate periodo altezza per strutture intelaiate in c.a. fornite in letteratura.

Ai due estremi entro le quali si colloca la maggior parte delle formule sono quelle proposte da Chopra e Goel (2000) e Hong e Hwang (2000) per strutture in cemento armato:

$$T = 0.0294 * A^{0.804} ; T = 0.067 * A^{0.9}$$

dove A è l'altezza della struttura in metri.

Secondo questi autori pertanto un edificio per mostrare una frequenza di risonanza di 4.9 Hz è compreso tra i due limiti estremi di altezza di 4 e 11 m, a seconda della formula considerata.

#### 4. Conclusioni

L'analisi dei dati sismici acquisiti ha evidenziato una velocità di propagazione delle onde di taglio di valore medio-basso,

il cui valore medio calcolato sui primi trenta metri è:  $(368+384)/2 = V_{s30} = 376\text{m/sec}$ .

Le presenti Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018) nel *Cap.3.2 AZIONE SISMICA, par. 3.2.2 Categorie di suolo e Condizioni topografiche*, classifica la velocità misurata nella seguente classe sismica:

**CATEGORIA C : " Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s,30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s".**

Il profilo sismico a rifrazione ha permesso di evidenziare in dettaglio le variazioni morfologiche della copertura terroso sabbiosa superficiale e dei terreni in profondità e le loro velocità sismiche.

Si sono individuati tre sismostrati con velocità crescenti con la profondità e con una morfologia degli strati mediamente omogenea, che hanno mostrato valori di velocità di propagazione delle onde sismiche P di valore da basso a medio basso.

Le velocità di propagazione delle onde di compressione P misurate permettono di ricostruire una successione stratigrafica costituita da circa 0.8 di terreni limo sabbiosi ghiaiosi allo stato sciolto nella parte più superficiale, a cui segue un orizzonte intermedio fino alla profondità di circa 6-7 m di terreni ghiaiosi sabbiosi con uno stato mediamente addensato, che passa ad uno strato più profondo più prettamente ghiaioso ed allo stato mediamente addensato.

L'analisi e l'elaborazione dei rapporti spettrali acquisiti su due stazioni HVSR secondo il metodo di Nakamura, ha evidenziato la presenza su entrambe le curve di un evidente picco alla frequenza di 4.9 Hz, pari ad un periodo T di circa 0,2 s, con una ampiezza di  $A_0=7.1-8.4$ . Questo risulta probabilmente legato ad una interfaccia con un evidente contrasto di impedenza ( $>4$ ) alla profondità di circa 16-17 m da p.c.

L'ampiezza evidenziata dai picchi risulta significativamente superiore al valore minimo di attenzione riportato dalla documentazione tecnica ( $A \geq 2$ ).

Questo valore di frequenza, pari ad un periodo di oscillazione di 0.2 secondi, è un periodo di oscillazione che può essere proprio di strutture con un'altezza compresa tra 4 e 11 m.

Le linee guida del progetto SESAME indicano che qualora esista la presenza di un chiaro picco, e ne sia esclusa l'origine industriale, esiste un chiaro contrasto di impedenza sismica a qualche profondità e che la frequenza  $f_0$  è la frequenza fondamentale del sito.

Indica inoltre che esiste l'80% di possibilità che la reale amplificazione dello spettro di Fourier nell'intorno della frequenza  $f_0$  sia superiore all'ampiezza  $A_0$  del valore H/V misurato.; l'amplificazione inizia dalla frequenza  $f_0$  ma potrebbe avvenire anche a frequenze superiori anche se la curva H/V del sito non mostra particolari amplificazioni a frequenze superiori.

Feltre, 07 Maggio 2020

Dott. Geol. Sergio Bartolomei



*Sergio Bartolomei*

## **Bibliografia**

- ATC, 1978: Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings, Report N. ATC3-06, Applied Technology Council, California.
- BSSC, 2003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), 2003 Edition, Building Seismic Safety Council, Washington D.C.
- CEN, 2003. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Final Draft, Comite Europeen de Normalisation, Brussels, December 2003.
- Chopra A. K., Goel R. K., 2000. Building Period Formulas for Estimating Seismic Displacements. Earthquake Spectra - May 2000 - Volume 16, Issue 2, pp. 533-536.
- Crowley, H., Pinho, R., 2004. Period-height relationship for existing European reinforced concrete buildings, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, Special Issue 1, 93-119.
- Gallipoli M., Mucciarelli M., Vona M., 2006, Stima di alcuni parametri principali degli edifici con metodi speditivi, GNGTS – 25° Convegno Nazionale, Roma 28-30 novembre 2006.
- Masi, A., 2003. Seismic vulnerability assessment of gravity load designed R/C frames, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 1, N. 3, 371-395.
- Masi A., Vona M., 2008, Estimation of the period of vibration of existing RC building types based on experimental data and numerical results. In: Increasing Seismic Safety by combining Engineering Technology and Seismological Data, Springer book. WB/NATO Publishing Unit, 2008.
- Mucciarelli M., Herak M., 2008, (Editors). Increasing Seismic Safety by combining Engineering Technology and Seismological Data, Springer book. WB/NATO Publishing Unit, 2008.
- Navarro M., F. Vidal, M. Feriche, T. Enomoto, F. J. Sánchez, I. Matsuda, 2004. Expected ground–RC building structures resonance phenomena in Granada city (Southern Spain), Proc. 13th World Conf. on Earthq. Engin., Vancouver, B.C., Canada, August 1- 6, 2004, Paper No. 3308.
- NZSEE, 2006. Assessment and improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes, Recommendations of a NZSEE Study Group on Earthquake Risk Buildings, June 2006.
- SAP2000, 1999. Three dimensional static and dynamic finite element analysis and design of structures, Computers and Structures Inc. Berkeley, California.

### Documentazione Fotografica



Foto 1: profilo sismico MASW-1 visione verso Nord



Foto 2: sprofilo sismico MASW-1 visione verso Sud



Foto 2b: profilo sismico ESAC-1 visione verso Nord



Punto di misura HVSR-1



Punto di misura HVSR-2