



RELAZIONI SPECIALISTICHE



Scuola Primaria

Via Santa Veronica
Orosei (NU)

Cod. R22079



Tel 02 36527601
ufficiotecnico@tecnoindagini.it
www.tecnoindagini.it

Committente:
Comune di Orosei
Via Santa Veronica, 5
10075 - Orosei (NU)

RELAZIONE GEOLOGICA

ALLEGATO

PROSPEZIONE SISMICA M.A.S.W.
(Multichannel Analysis Surface Waves)

SOMMARIO

1. PREMESSA	3
2. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO (NTC 2018).....	4
3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E UBICAZIONE INDAGINI.....	5
4. INDAGINI GEOLOGICO-TECNICHE IN SITO	7
4.1. PROSPEZIONE SISMICA MASW	7
4.2. ELABORAZIONE DATI.....	9
5. ANALISI E COMMENTO DEI RISULTATI	11
6. CONCLUSIONI.....	14

1. PREMESSA

A seguito dell'incarico conferito dal Comune di Orosei (NU), in data 30 Agosto 2022 è stata eseguita una campagna di prospezioni sismiche finalizzate alla definizione del parametro $V_{s,eq}$ ed alla conseguente delineazione della categoria di sottosuolo (preliminare) dei terreni su cui sorge la Scuola secondaria nel territorio comunale di Orosei (NU) in Via Verdi.

In particolare sono state realizzate prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis Surface Waves - $V_{s,eq}$) secondo quanto previsto dalla Circolare Esplicativa del Ministero Infrastrutture e Trasporti n. 7 del 21/01/2019 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici recante "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" (Circolare pubblicata sul supplemento ordinario n. 5 alla Gazzetta ufficiale n. 35 dell'11 febbraio 2019 - § 6.2.2 - tabella C6.2.I in cui si prevede espressamente l'impiego di indagini di tipo geofisico mediante l'utilizzo di strumentazione in superficie - NTC 2018).

Per quanto concerne le indagini M.A.S.W., è esperienza comune che, in presenza di terreni dotati di buona velocità sismica la massima profondità esplorata sia molto elevata in confronto alla lunghezza dello stendimento, fino a 3 volte maggiore. Viceversa, in presenza di terreni lenti, le profondità d'investigazione diminuiscono sensibilmente sino ad un mezzo e più della lunghezza dello stendimento medesimo. Tutte le frequenze risultano più penetranti in presenza di terreni veloci, in quanto la lunghezza d'onda è molto maggiore quando viene condotta la corrispondenza fra tempi e lunghezze (o profondità). Pertanto la corrispondenza dipende strettamente dalla velocità. L'associazione fra profondità massima e frequenza minima, definita in forma semiautomatica dal programma di elaborazione utilizzato, ha confermato la piena validità ai fini progettuali dei risultati ottenuti.

2. CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO (NTC 2018)

La normativa "Norme tecniche per le costruzioni 2018" afferma che ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (§ 3.2.2), deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale. In mancanza di tali studi si può utilizzare la classificazione dei terreni descritta di seguito. La classificazione deve riguardare i terreni compresi tra il piano di imposta delle fondazioni degli edifici ed un substrato rigido di riferimento, (bedrock) ovvero quelli presenti ad una profondità commisurata all'estensione ed all'importanza dell'opera.

La classificazione è basata sulla stima dei valori della velocità equivalente di propagazione delle onde sismiche di taglio $V_{s,eq}$. In base a tale grandezza sono state identificate le seguenti **categorie di sottosuolo (Tab. 3.2.II)**:

- 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 metri;
- B** *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, caratterizzati da un graduale 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 metri, 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 terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s 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 metri.

La classificazione del sottosuolo è effettuata sulla base delle condizioni stratigrafiche e dei valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

3. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E UBICAZIONE INDAGINI

A seguire viene riportato l'inquadramento corografico dell'area di specifico interesse - Scuola Secondaria, Via Verdi a Orosei (NU) - unitamente all'ubicazione planimetrica delle indagini eseguite ed alla documentazione fotografica di merito.

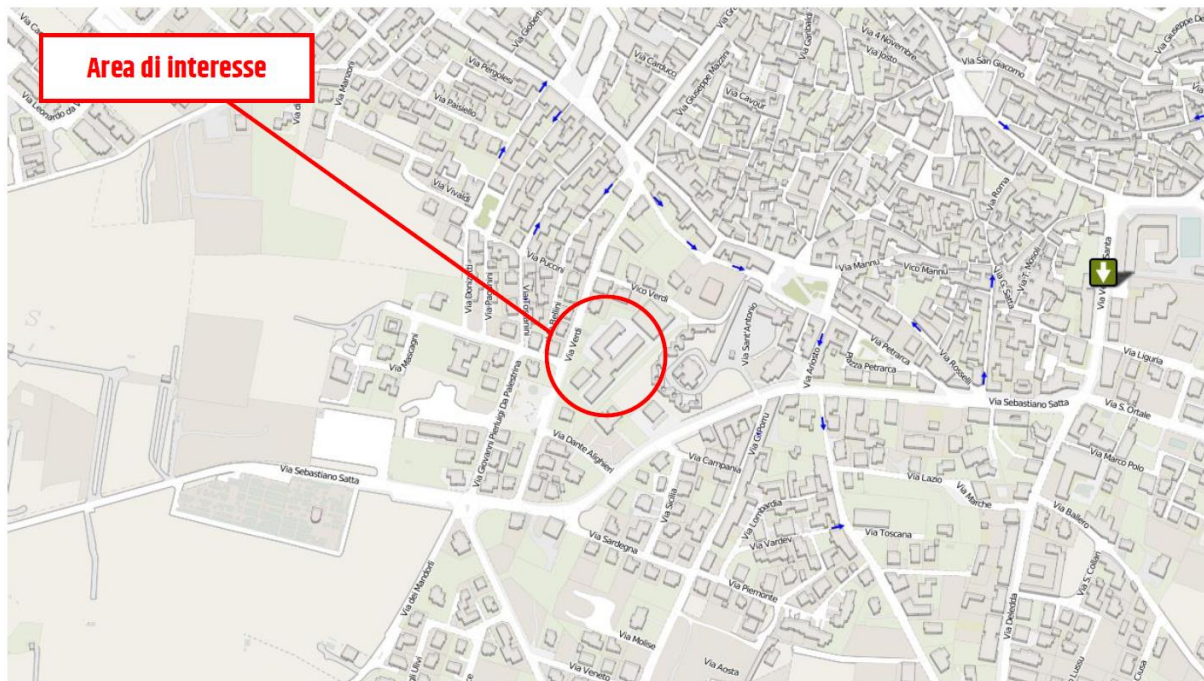


Figura 1 – Inquadramento corografico dell'area di interesse



Figura 2 – Inquadramento dell'area di interesse su base satellitare

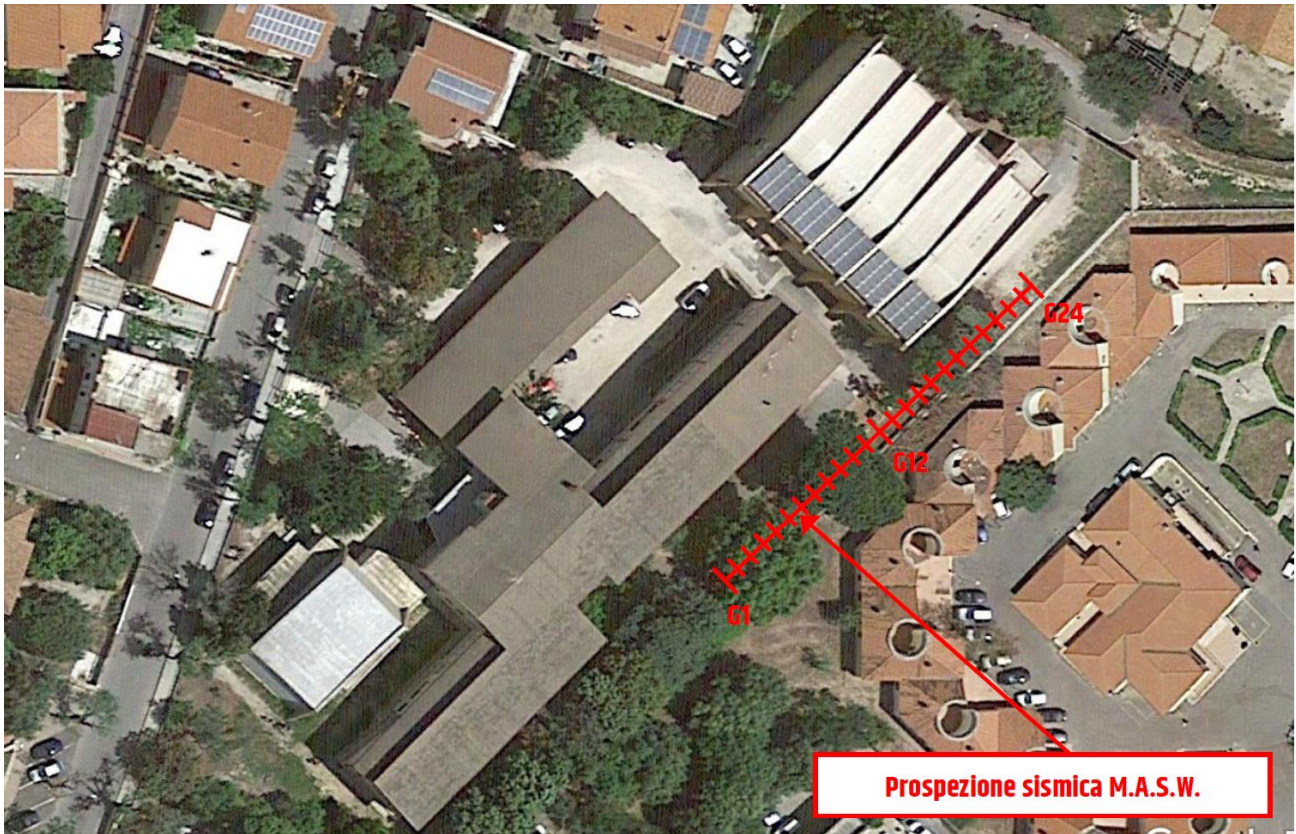


Figura 3 – Ubicazione planimetrica indagini eseguite con posizionamento geofoni (da G1 a G24)

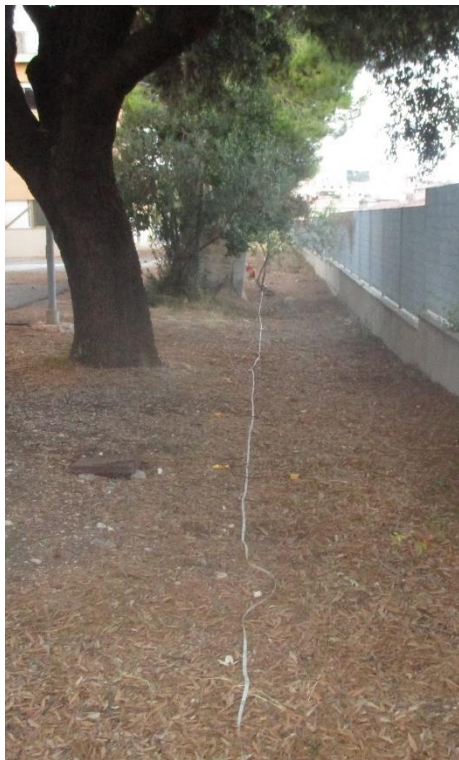


Foto 1 – Stesa sismica M.A.S.W.



Foto 2 – Strumentazione sismografica di acquisizione

4. INDAGINI GEOLOGICO-TECNICHE IN SITO

4.1. PROSPEZIONE SISMICA MASW

Il metodo MASW è una tecnica di indagine non invasiva che si basa sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali. La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici. L'intero processo comprende tre passi successivi: l'acquisizione delle onde superficiali (Ground Roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s . Per ottenere un profilo V_s è necessario produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse è stata utilizzata nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi. L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati. Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale V_s dalla curva di dispersione e vengono solitamente stimati utilizzando misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali. Quando si generano le onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh, vengono generate anche una molteplicità di tipi diversi di onde. Fra queste le onde di corpo, le onde superficiali non piane, le onde riverberate (Back Scattered) dalle disomogeneità superficiali, il rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane. Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale. Quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità, mentre le onde di corpo dirette viaggiano, come è implicito nel nome, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni).

Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali. Queste onde, in prossimità della sorgente, seguono un complicato comportamento non lineare e non possono essere trattate come onde piane. Le onde superficiali riverberate (Back Scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno. La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza indipendentemente dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione. La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale.

Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza. La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili (x ; y), il cui legame costituisce la curva di dispersione. È anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma.

In questo caso MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti S/N (Signal/Noise). Un buon rapporto S/N assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo V_s di inversione. Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una mazza battente o un cannone sismico. La strumentazione utilizzata per l'esecuzione delle indagini si compone di un sismografo a 24 canali ad elevata sensibilità, 24 geofoni con frequenza propria di 4,5 Hz e mazza battente da 8 kg per la generazione dell'impulso sismico di energizzazione. L'indagine MASW è stata eseguita posizionando uno stendimento lineare di lunghezza pari a 46 metri con i 24 geofoni equidistanziati di 2 m. L'acquisizione dei dati è stata effettuata tramite quattro energizzazioni ubicate ad una distanza di 5 m e 10 m dal primo geofono e quindi ad una distanza di 5 m e 10 m dal ventiquattresimo geofono. Per ognuno dei quattro punti di energizzazione sono stati sommati n° 7 impulsi sismici.

Il principale vantaggio di un metodo di registrazione multicanale è la capacità di riconoscimento dei diversi comportamenti, che consente di identificare ed estrarre il segnale utile dall'insieme di varie e differenti tipologie di onde sismiche. Quando un impatto è applicato sulla superficie del terreno, tutte queste onde vengono simultaneamente generate con differenti proprietà di attenuazione, velocità e contenuti spettrali.

Queste proprietà sono individualmente identificabili in una registrazione multicanale e lo stadio successivo del processo fornisce grande versatilità nell'estrazione delle informazioni utili. I risultati ottenuti, vengono discussi nei paragrafi successivi e riportati di seguito.

4.2. ELABORAZIONE DATI

Per l'analisi dei segnali sismici registrati si sono utilizzati i pacchetti software della centralina sismografica PASI GEA24 ed EliaSoft, ottenendo le seguenti restituzioni grafiche:

- Sismogramma delle velocità;
- Spettro di velocità e curva di dispersione misurata;
- Spettro di velocità e curva di dispersione calcolata;
- Modello sismico del terreno (Velocità sismica delle onde S e densità stimata del terreno).

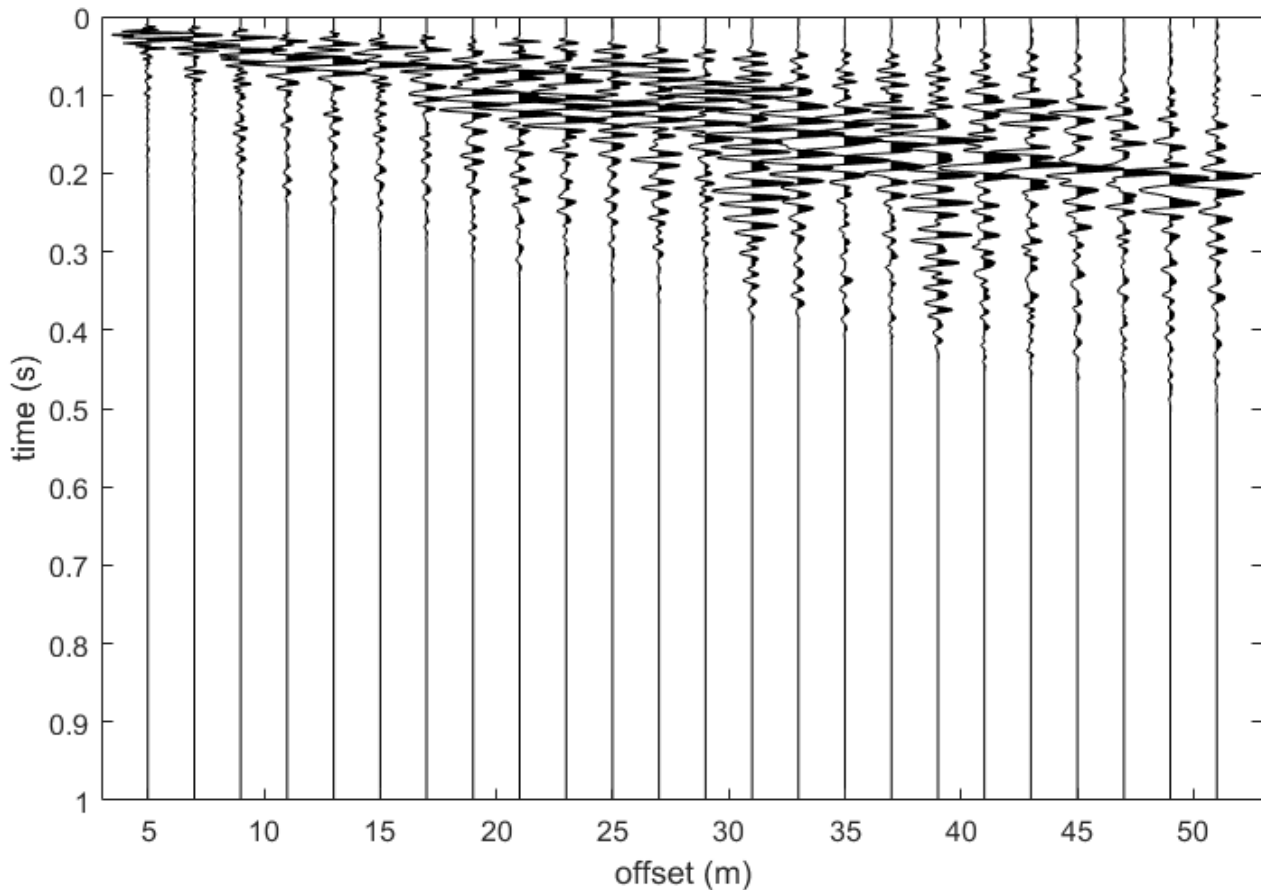


Figura 4 – Sismogramma delle velocità

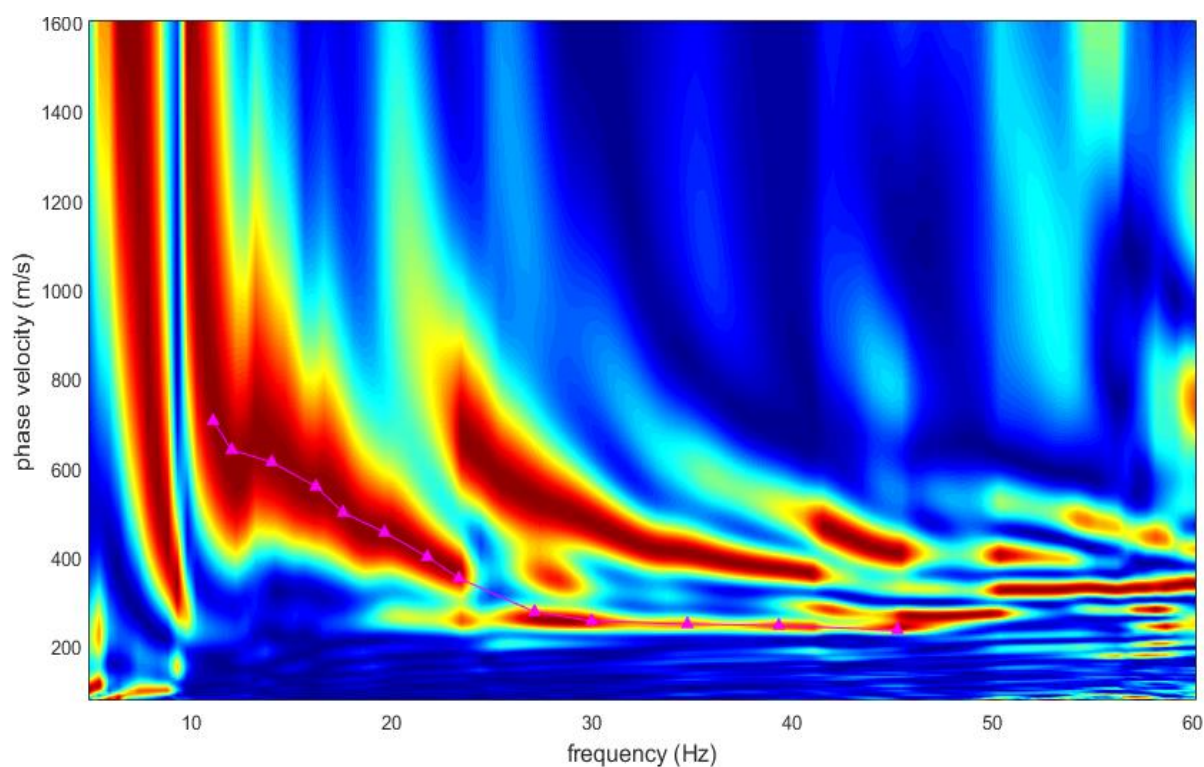


Figura 5 – Spettro di velocità e curva di dispersione misurata

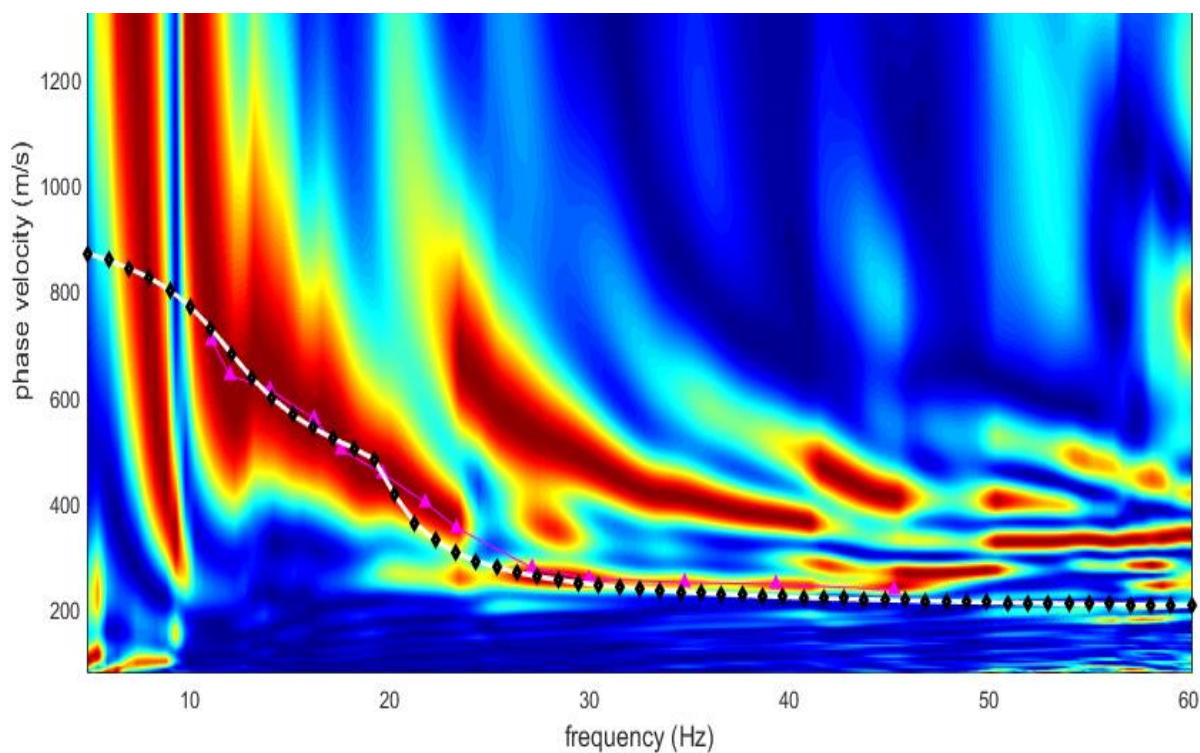


Figura 6 – Spettro di velocità e curva di dispersione calcolata

5. ANALISI E COMMENTO DEI RISULTATI

Come previsto dalla normativa sismica vigente (Testo Unico – D.M. 17/01/2018 – NTC 2018) è stata attuata la classificazione del tipo di suolo di fondazione dell'area di specifico interesse. La classificazione sismica del primo sottosuolo è stata effettuata mediante un approccio di tipo complesso con la specifica finalità di eseguire la verifica incrociata tra i risultati ottenuti da differenti metodologie d'indagine.

Il risultato finale dell'elaborazione consiste quindi nella rappresentazione grafica del profilo di velocità e nel calcolo della relativa $V_{s,eq}$ e della densità del terreno così come definito di seguito.

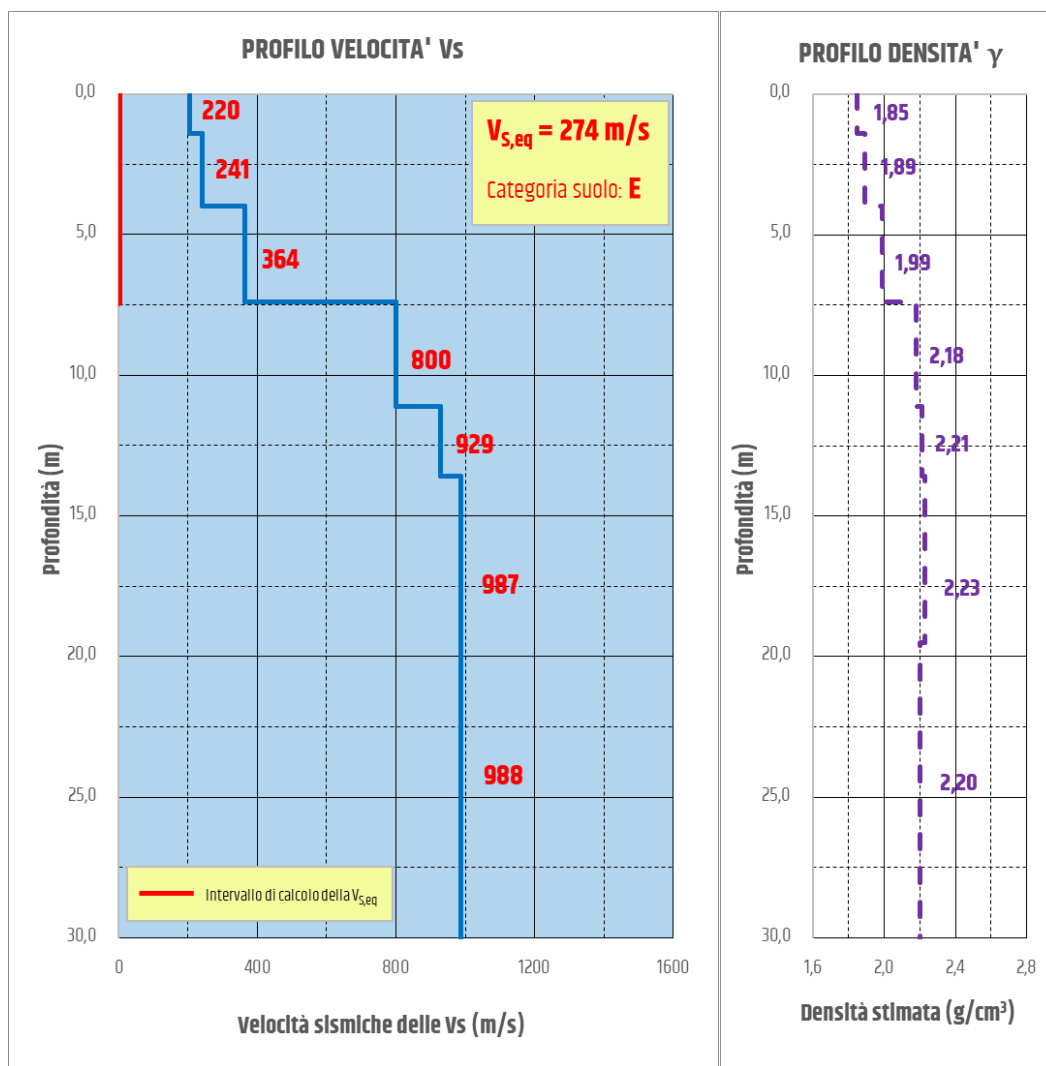


Figura 7 – Stratigrafia sismica in termini di velocità Vs e densità stimata del terreno

I risultati ottenuti dalle prospezioni sismiche M.A.S.W., hanno permesso di attuare la **modellizzazione sismica** del primo sottosuolo sino alla massima profondità di 30 m dal piano campagna attuale. In particolare sono stati individuati tre strati principali di terreno caratterizzati da velocità delle onde s diversificate:

- primo strato**, che si sviluppa sino a 4.0 m circa di profondità da piano campagna, con Vs comprese tra 220 m/s e 241 m/s;
- secondo strato**, con velocità superiore, si sviluppa sino a 7.4 m circa di profondità da piano campagna, con velocità delle onde Vs di 364 m/s;

- c. **terzo strato**, sviluppato sino alla massima profondità raggiunta, pari a 30 m di profondità, presenta velocità delle onde Vs comprese tra 800 m/s e 988 m/s.

Come previsto nella RSL (§ 3.2.2 delle NTC 2018) in merito all'approccio semplificato, la classificazione del sottosuolo è stata effettuata contestualmente alle condizioni stratigrafiche individuate ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (m/s) in luogo della precedente $V_{S,30}$, secondo la seguente formulazione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove H costituisce la profondità del substrato, definito come formazione litoide o terreno molto rigido, (in genere caratterizzato da V_s superiore a 800 m/s). Tuttavia, nella condizione litostratigrafica di profondità H del substrato superiore a 30 m, la $V_{S,eq}$ viene definita dal parametro $V_{S,30}$ (ovvero $V_{S,eq} = V_{S,30}$). Sulla base dei dati a disposizione lo strato sismico 03, caratterizzato da valori di Vs compresi tra 800 m/s e 988 m/s, è attribuibile al substrato roccioso, rappresentato dalla **Formazione di Orosei** costituita da alternanze di conglomerati poligenici e brecce più o meno arenacee prevalenti, arenarie, peliti arenacee, sabbie di età presumibilmente miocenica media (v. Figura 8 - Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – Foglio 501 Orosei).

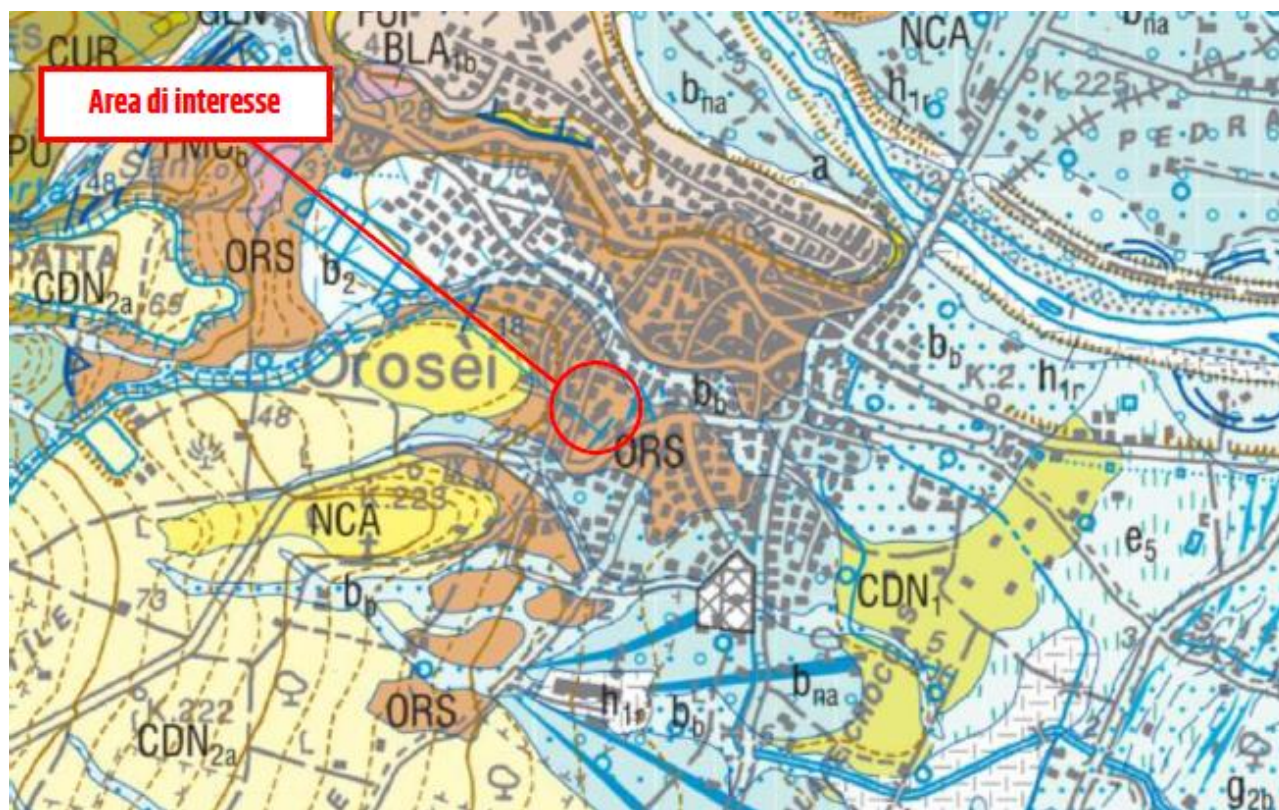


Figura 8 – Stralcio della Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – Foglio 501 Orosei.
In marrone è riportata la Formazione di Orosei

Pertanto, l'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito di ricostruire, per il settore di specifico interesse, il modello stratigrafico in funzione delle velocità sismiche V_s e di determinare il parametro **$V_{s,eq} = 274 \text{ m/s}$** calcolato fino ad una profondità di riferimento pari a 7.4 m. Ai fini della caratterizzazione sismica del sito per la definizione delle azioni sismiche di progetto (§ 3.2.2 NTC 2018), la categorizzazione sismica del sottosuolo definita con il metodo M.A.S.W. identifica la categoria di sottosuolo C come quella di appartenenza così come specificato dalla normativa:

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 metri, 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.

Tuttavia l'analisi incrociata dei dati litostratigrafici sito specifici acquisiti (presenza di un basamento roccioso sviluppato ad una profondità inferiore a 30 metri) e di quelli geofisici ottenuti (velocità delle onde V_s di 274 m/s), portano ad individuare la **categoria di sottosuolo E** come quella teorica di riferimento:

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 metri.

6. CONCLUSIONI

Il presente lavoro è costituito da una campagna di prospezioni sismiche finalizzate alla definizione della $V_{s,eq}$ e conseguentemente alla definizione della categoria di sottosuolo preliminare dei terreni su cui sorge la Scuola Secondaria ubicata nel territorio comunale di Orosei (NU) in Via Verdi.

La caratterizzazione sismica del primo sottosuolo dell'area d'interesse è stata attuata mediante la realizzazione di indagini sismiche ovvero attraverso l'esecuzione di prospezioni sismiche M.A.S.W. (Multichannel Analysis Surface Waves – $V_{s,eq}$).

In tal modo è stata definita la velocità equivalente delle onde di taglio S, sino a 30 m di profondità e la conseguente categoria di sottosuolo preliminare di riferimento. La **modellizzazione sismica** (M.A.S.W.) realizzata ha fornito la seguente velocità equivalente delle onde S (calcolata a partire dal piano campagna attuale):

intervallo 0-30 m di profondità

$V_{s,eq} = 274 \text{ m/s}$

L'analisi geolitologica e stratigrafica effettuata ha evidenziato come lo strato sismico 03, ubicato alla profondità di 7.4 m, risulti attribuibile al substrato roccioso, rappresentato dalla **Formazione di Orosei** costituita da alternanze di conglomerati poligenici e brecce più o meno arenacee prevalenti, arenarie, peliti arenacee, sabbie di età presumibilmente miocenica media.

La **categorizzazione sismica del sottosuolo** definita con il metodo M.A.S.W. identifica la **categoria di sottosuolo E** come quella di appartenenza così come definito dalla normativa.

Si sottolinea come la presente relazione fornisca la categoria di sottosuolo preliminare relativa all'area di interesse investigata riferendo, in assenza di dati progettuali specifici, il parametro $V_{s,eq}$ così ottenuto alla superficie topografica del piano campagna da cui hanno avuto adito le indagini.

Cusano Milanino, 05/10/2022

Dott. Geol. Stefano Bonfoco

Ordine dei Geologi della Lombardia N° 1750 AP

Tecnoindagini S.r.l.



TECNOINDAGINI SRL
Via Monte Sabotino n° 14
20095 Cusano M. (MI)
P.IVA 06383520969