

1. PREMESSE

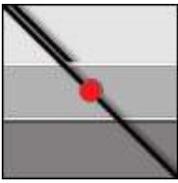
Verso la fine del 2011 è stata condotta una indagine geofisica nel Comune di... al fine di caratterizzare, dal punto di vista sismico, il sottosuolo dell'area in esame sono state effettuate:

- **n° 2 prospezioni sismiche a rifrazione con inversione tomografica** sviluppate in *array lineari* con n° 16 / 24 geofoni ad asse verticale per l'individuazione delle principali unità geofisiche tramite la stima delle velocità di propagazione delle onde longitudinali P (Vp);
- **n° 2 prospezioni sismiche con tecnica passiva Re.Mi. (Refraction Microtremor)** sviluppate in *array lineari* con n° 16 / 24 geofoni a 4.5 Hz ad asse verticale per la ricostruzione sismo - stratigrafica del sottosuolo (onde S) e per l'assegnazione della categoria del sottosuolo di fondazione (Vs,30) come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 14/01/2008*);
- **n° 1 registrazione di rumore sismico ambientale a stazione singola con elaborazione H.V.S.R. (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)** per individuare le frequenze di risonanza del terreno al fine di eseguire una corretta progettazione sismica delle strutture.

In aggiunta, sono stati eseguiti tre profili geoelettrici 2D in configurazione **dipolo - dipolo** per misurare la resistività dei terreni oggetto di intervento e valutare eventuali anomalie di resistività dovute **alla presenza di cavità vuote o riempite**:

- **n° 3 profili geoelettrici 2D in configurazione dipolo - dipolo** per misurare la resistività dei terreni tramite profili di 94 m di lunghezza con 48 elettrodi realizzati in prossimità dei terreni oggetto di intervento.

L'esatta ubicazione dell'area è stata ottenuta tramite un posizionatore GPS interno alla strumentazione geofisica utilizzata e di seguito riportata in gradi e minuti con decimali secondo lo standard WGS-84 e ED50.



2. CENNI TEORICI E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

2.1 Indagini geofisiche di tipo sismico

I metodi d'indagine utilizzati nel presente lavoro rientrano tra le metodologie sismiche più affidabili e versatili attualmente disponibili nel mercato. Sebbene le seguenti procedure utilizzino le velocità di propagazione delle onde sismiche come base di partenza per l'elaborazione dei modelli sismo-stratigrafici del sottosuolo i principi matematici che stanno alla base degli algoritmi di calcolo, sono completamente diversi.

In particolare, la tecnica sismica a rifrazione con inversione tomografica utilizza il concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (*head wave*). Le onde analizzate sono quelle bi-rifratte cioè quelle che giungono alla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo d'incidenza. I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

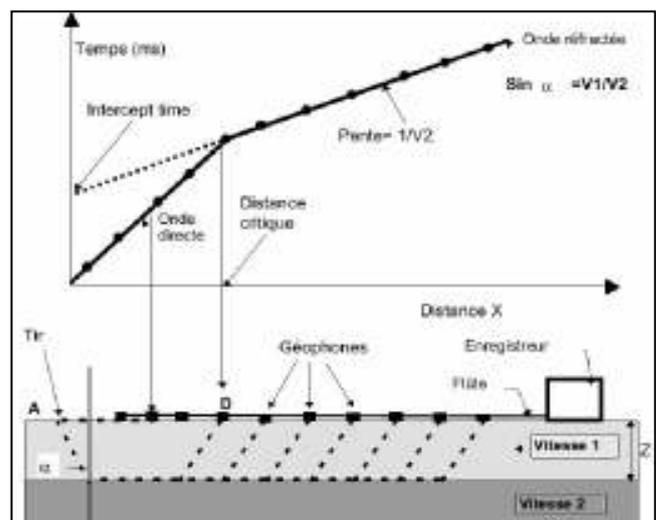
Nel caso della metodologia Re.Mi. si sfrutta la propagazione delle onde che nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei. Questo comportamento è definito **dispersione in frequenza** ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario, le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie. I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati con caratteristiche elastiche lineari. La metodologia H.V.S.R. viene impiegata per individuare la frequenza fondamentale di vibrazione del sottosuolo.

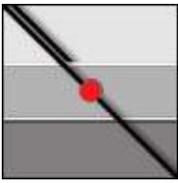
2.2 Prospezione sismica a rifrazione

2.2.1 Basi teoriche di sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione si basa sulla misura del tempo richiesto perché una perturbazione di origine elastica si trasmetta dalla sorgente ai geofoni percorrendo gli strati superficiali, a bassa velocità, e la superficie di separazione di due mezzi elastici differenti, a velocità più elevata.

La prospezione sismica a rifrazione è particolarmente indicata per ottenere rapide informazioni strutturali nel caso di strutture a grandi dimensioni, che siano costituite almeno da uno strato rifrangente ad alta velocità, giacente sotto una serie stratigrafica avente velocità più bassa. Se in un sistema di assi cartesiani si riportano i tempi di arrivo delle onde sismiche in funzione della loro distanza dal punto di scoppio, si ottiene una famiglia di curve "tempi - distanze" che dipendono dalle caratteristiche geologiche locali. Tali

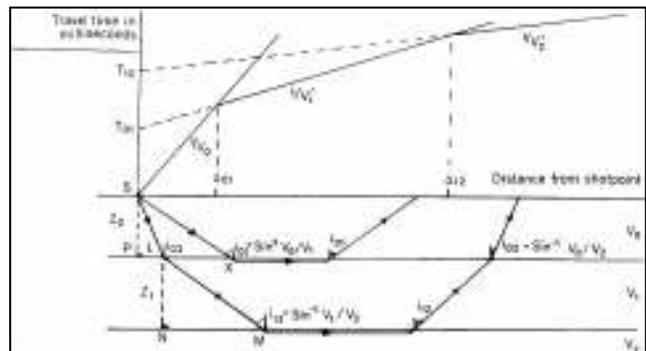




curve sono dette “dromocrone”.

Nella figura riportata a fianco, sono rappresentate le dromocrone riguardanti le onde dirette, riflesse e rifratte, più la dromocrona degli impulsi diretti nell’areato. Nel punto angolare D corrispondente al geofono G0, arriveranno contemporaneamente le onde dirette e le onde rifratte. Per i geofoni posti ad una distanza minore di G0, il primo arrivo sarà rappresentato da un’onda diretta. Da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una distanza corrispondente a G0. Oltre il punto angolare D i primi arrivi sono sempre rappresentati dalle onde rifratte. Si possono costruire dromocrone anche nel caso di “n” strati, purché le velocità aumentino sempre con la profondità; ogni punto angolare indicherà il passaggio da uno strato al successivo, e le velocità saranno indicate dalla pendenza dei rispettivi rami di dromocrone. Se gli strati sono poco potenti (come di solito avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l’alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva (figura seguente).

I principali limiti della sismica a rifrazione risiedono nell’impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l’energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta, tale situazione è nota come “orizzonte muto”. Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l’orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile.



2.2.2 Strumentazione, acquisizione ed elaborazioni

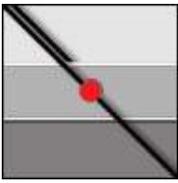
Le stese sismiche effettuate hanno una lunghezza di 75 m nella linea sismica n°1 e di 94 m nella linea sismica n°2 e sono state eseguite utilizzando le onde di compressione P (Vp). La massima profondità indagata può essere stimata intorno a 17 m dal p.c. locale.

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo a 16 + n canali modello “SoilSpy Rosina” con registrazione degli eventi in forma digitale. I sensori sono costituiti da una catena di 16 geofoni a componente verticale con frequenza propria di vibrazione di 4,5 Hz e distanza geofonica di 5 m per la linea n°1 e 24 geofoni con distanza geofonica di 4 m per la linea n°2.

L’energizzazione delle onde di compressione P è avvenuta utilizzando un fucile sismico (*mini bang*) dotato di cartucce calibro 8 di tipo industriale. Sono stati previsti n°6-7 *shot* per linea in modo da ottenere una quantità di dati sufficienti per ottenere un modello sismico del sottosuolo attendibile.

Per l’interpretazione dei dati si è utilizzato un programma di elaborazione della sismica di superficie con la tecnica tomografica.

La tomografia sismica è una tecnica dettagliata di esplorazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo (in questo caso si tratta di terreno); questo si basa sul primo arrivo delle perturbazioni sismiche, cioè del tempo necessario per compiere distanze prestabilite fra sorgente e ricevitore.



La prospezione sismica con elaborazione tomografica, con il suo estremo dettaglio, permette di mettere in risalto fenomeni di anisotropia anche in presenza di un orizzonte apparentemente omogeneo.

Per l'elaborazione si è utilizzato il Software Rayfracy, prodotto dalla Intelligent Resource inc., che effettua l'inversione di dati sismici attraverso due fasi distinte.

Nella prima fase l'inversione avviene con il metodo Delta T-V (Gebrande and Miller 1985), che si basa sulla ricostruzione di velocità per ogni CMP (common midpoint). Questo metodo permette di ottenere un modello del campo di velocità indagato immettendo solo dati geometrici, topografici e primi arrivi.

Il software permette quindi di effettuare un controllo sul modello proveniente dall'inversione tramite l'algoritmo di "forwaed modelling", che permette di ricostruire le dromocrone relative al nuovo modello consentendo, ad esempio, di evidenziare zone con scadente modellizzazione, errori di picking, ecc. La fase successiva consiste nel perfezionamento del modello ottenuto tramite il Wavpath Eikonal Traveltime tomography processing (Schuster 1993 - Geophysics - September 1993 - Volume 58, Issue 9, pp. 1341 - 1323; Watanabe - SEG meeting 1999), che rappresenta una vera e propria inversione tomografica tramite il tracciato di raggi e la ricostruzione del fronte d'onda generato tenendo conto della frequenza del segnale utilizzato, con una soluzione alle differenze finite dell'equazione Eikonal. Tale inversione non presenta le limitazioni evidenziate nel metodo Delta T-V, e permette di ottenere un modello di velocità altamente affidabile.

2.3 Indagine sismica di tipo passivo in array (Re.Mi.)

La procedura Re.Mi. è un metodo di prospezione sismica sviluppato presso l'Università di Reno in Nevada (Louie, 2001) e viene classificato come metodo passivo in quanto utilizza il rumore ambientale. I vantaggi promossi da questo metodo sono molteplici: è molto veloce e semplice da usare in fase di acquisizione, raggiunge una buona profondità e risoluzione d'indagine ma soprattutto permette di ottenere migliori risultati in ambienti particolarmente urbanizzati.

La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da prendere in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale - rumore.

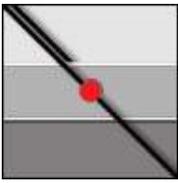
Il rumore incoerente, cioè di tipo casuale, nel caso Re.Mi. rappresenta la fonte del segnale utile che si vuole registrare. I microtremori generati dall'ambiente si propagano nel suolo e di questi si cerca di distinguere il modo fondamentale di vibrazione dell'onda di Rayleigh da quelli superiori e dall'aliasing spaziale. C'è, in questo caso, la necessità di soddisfare la condizione di "omnidirezionalità" delle sorgenti, cioè si suppone che il rumore ambientale provenga sostanzialmente da tutte le direzioni.

I tempi di registrazione dei microtremori sono decisamente più elevati rispetto alle indagini di tipo attivo. La registrazione sarà analizzata in finestre temporali che variano dai 10 ai 30 secondi.

Sono da considerare la lunghezza dello stendimento L e la distanza intergeofonica Δx . Quest'ultima agisce sul segnale come una specie di filtro in frequenza. Supponendo, infatti, che il segnale arrivi da tutte le direzioni, maggiore è la spaziatura, minore sarà la frequenza del segnale utile campionabile e viceversa. Se la frequenza è più bassa aumenta la profondità d'indagine.

La fase più delicata è quella del *data processing*, che consiste nel trattamento dei dati acquisiti con l'obiettivo di stimare la velocità di fase delle onde di Rayleigh (V_r) che sono correlabili con le velocità V_s di propagazione delle onde S ($V_s \approx 1,1 V_r$).

Le varie tecniche di processing trasformano l'informazione registrata nel dominio $x - t$ (spazio tempo), in un dominio dove l'energia associata all'evento è funzione della frequenza e di altre variabili. Tutto questo allo scopo, attraverso lo spettro, di localizzare la densità di energia maggiore, alla quale sono di solito



associate le onde di Rayleigh. Con procedura manuale vengono selezionati dei punti sullo spettro, che andranno a formare la curva di dispersione sperimentale. La scelta di questi valori, denominata *picking*, è condizionata da alcune indicazioni ma è imprescindibile dall'abilità e dall'esperienza dell'interprete anche in base ad altre conoscenze in merito al sito in esame.

Il *sampling rate* utilizzato è stato di 512 Hz in modo da ottenere un elevato dettaglio del segnale. La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato è stato di circa 8 minuti. Il software utilizzato per l'analisi spettrale è *Grilla v.6.1 beta release 2011*.

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 10 Hz), sono state utilizzate le stesse linee impiegate per la tomografia sismica. Per una corretta ricostruzione sismica del sottosuolo e una buona stima delle onde Vs è necessario adottare una modellizzazione numerica che può essere rappresentata dalla seguente equazione:

$$\hat{v}_s = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad [2.1]$$



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

In via | H = profondità alla quale si desidera stimare Vs [m] (30 m in caso di Vs30);

riportai | hi = spessore dello strato i - esimo [m];

ambien | vi = velocità delle onde Vs all'interno dello strato i - esimo [m/s].

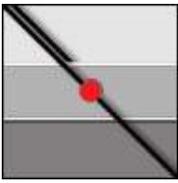
o di suolo, si

ente in diversi

o et al., 2000

a, b; Parolai et al., 2002; Scherbaum et al., 2003; D'Amico et al., 2004, 2006; Hinzen et al., 2004).

TIPO DI SUOLO	Vs min [m/s]	Vs media [m/s]	Vs max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto - poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturate).	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia).	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI - GHIAIOSI (es. ghiaie e suoli con < 20% di ghiaia, sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose).	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere).	100	150	200



2.4 Indagine sismica di tipo passivo a stazione singola (H.V.S.R.)

La tecnica sismica passiva (tecnica dei rapporti spettrali o H.V.S.R., Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non richiede nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la **frequenza caratteristica di risonanza del sito** che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno adottare adeguate precauzioni nel costruire edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la **frequenza fondamentale di risonanza di un edificio**, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito (*free field*) e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la **velocità media delle onde di taglio V_s** calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. Sarà quindi possibile calcolare la $V_{s,30}$ e la relativa categoria di sottosuolo come esplicitamente richiesto dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008*;
- la **stratigrafia del sottosuolo** con un *range* di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostante per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

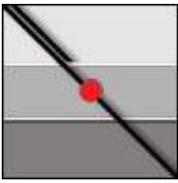
Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremori. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

- dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ;
- dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
- dalla risposta dello strumento.

Possiamo scrivere questo come:

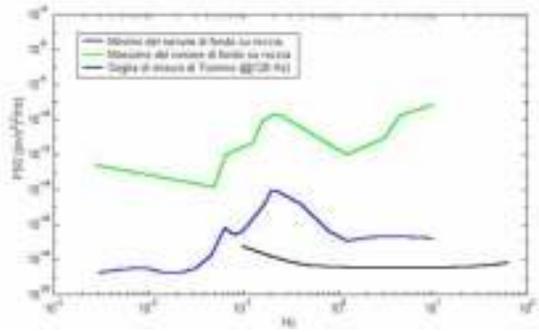
$$\text{segnale registrazione al sito } x = \text{sorgente} * \text{effetti di percorso} * \text{funzione trasferimento strumento}$$

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche *microtremore* poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi poiché il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nel tragitto dalla sorgente s al sito x le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione riguardante la sorgente è persa e non sono



più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni concernenti il percorso del segnale e, in particolare, relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però “sepolta” all’interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSr che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali del sottosuolo; informazione di notevole importanza nell’ingegneria sismica.

Per l’acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale della ditta Micromed S.r.L modello “*Tromino ENG Y - Plus*” che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra - leggeri e ultra - compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno due terne velocimetriche con i sensori ortogonali tra loro e con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. Nella figura a fianco si riporta la curva di rumore di “*Tromino*” a confronto con i modelli standard di rumore sismico massimo (in verde) e minimo (in blu) per la Terra. Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.



2.5 Indagine geo-elettrica con inversione tomografica

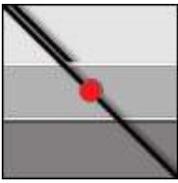
La tecnica *dell’imaging* elettrico (o tomografia elettrica) adotta una procedura automatizzata sia per l’acquisizione che per l’elaborazione e consente di raccogliere dati elettrici del sottosuolo con una densità elevata impiegando cavi *multicore* con spaziatura interelettrodica variabile (generalmente da 1-2 m a 10). L’unità di misura è costituita da un georesistivimetro classico assistito da un computer che mediante un software dedicato gestisce la configurazione geometrica e la sequenza del grande numero di letture che vengono effettuate. Gli elettrodi da controllare sono molte decine, spesso qualche centinaio, ed i vari cavi impiegati vengono tra loro connessi, e collegati all’unità di misura.

In pratica, il rilievo consiste dapprima nel posizionare gli elettrodi nel terreno secondo arrays 2D o 3D , quindi nell’effettuare il collegamento ai *take-out* dei cavi che portano il segnale (di input ed output) all’unità di misura. Dal software vengono poi impostate la configurazione prescelta ed i relativi parametri geometrici (passo di misura, numero di misure ecc.).

Le misure sono ciclicamente ripetute fino ad un massimo di 4-6 volte qualora non si raggiunga prima una stabilizzazione della lettura (indicata da un basso scarto percentuale tra il 2-6%). Le misure non soddisfacenti, comunque salvate nel *data set*, potranno essere eliminate in sede di analisi. Per ottenere una densità di valori idonea alla costruzione di una pseudosezione di resistività è necessario che il passo di misura non superi la distanza interelettrodica.

Il primo risultato dell’analisi è costituito da una pseudosezione che è solo rappresentativa della sezione reale. Ritrae, infatti, l’andamento della resistività apparente, una specie di valore mediato, con la pseudopropfondità, calcolata con semplici considerazioni geometriche. Ogni misura viene posta convenzionalmente al centro del quadripolo attivo ed alla pseudopropfondità che gli compete.

I dati acquisiti in campagna e rappresentati secondo pseudosezioni (2D) o pseudopiani (3D) vengono successivamente elaborati per risalire alla elettrostratigrafia reale (resistività vera) del volume indagato che si ottiene utilizzando una tecnica di inversione. Il sistema è interfacciato ad un PC interno su cui è installato un software dedicato che lavora su piattaforma Windows per gestire l’attivazione successiva e programmata di 4 elettrodi alla volta (due di corrente e due di potenziale nel caso configurazioni



convenzionali quali Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo o polo-polo). Le misure vengono effettuate in corrente continua con periodo di misura che può essere compreso tra 0,8s e 0,12s con cicli di alcuni secondi; i voltaggi variano da un minimo di 0,2mV a massimi di 600V picco-picco mentre l'intensità di corrente varia da minimi di 0,001 mA a massimi di 100° con energizzazioni di 200 W.

Ogni valore di resistività apparente fornito strumentalmente è il risultato di un ciclo di misura che è costituito generalmente da 3-8 ripetizioni delle misure. Il valore proposto rappresenta il risultato di una media mobile tra le letture (minimo di 3 letture) protratta fino al punto in cui la differenza tra successive letture scende al di sotto di scarti compresi tra 3 e 5%. Per evitare disturbi legati a fenomeni di polarizzazione le misure sono separate da un ritardo di regime che di default è fissato a 2500ms.

Nelle indagini geoelettriche è possibile scegliere diversi tipi di configurazioni in base a criteri che considerano, ad esempio, il tipo di *target* da individuare, la profondità massima da raggiungere o la sensibilità delle misurazioni condotte. Le configurazioni si distinguono in base alla distribuzione geometrica della programmazione di attivazione delle coppie di elettrodi attivati per l'acquisizione.

Nel caso in questione è stata adottata in acquisizione la configurazione dipolo - dipolo con il seguente array geometrico: 48 elettrodi e spaziatura interelettrodica di 2 m per ogni linea; sono stati impostati 7 livelli di misura che hanno interessato una *tranche* massima di terreno di circa 20 m.

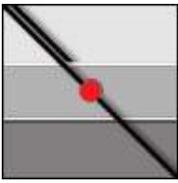
Questo tipo di arrangiamento è molto vantaggioso in quanto fornisce uno tra i più elevati rapporti segnale/rumore. L'elaborazione è effettuata in termini bidimensionali con inversione del modello utilizzando il software [Res2Dinv v3.55](#) prodotto dalla Geotomo (Malesia).

Di seguito viene esposto il procedimento utilizzato comunemente per l'analisi:

- Il procedimento di calcolo prevede la suddivisione iniziale del volume in una griglia di regolarizzazione (analogica a quella impiegata nelle computazioni ad elementi finiti). Ad ogni cella della griglia viene attribuito un valore di resistività sulla base dei dati misurati ed a quelle di confine viene impostata una resistività pari alla media delle letture eseguite.
- Il modello iniziale viene quindi sottoposto ad un processo di inversione che utilizza una routine conosciuta con il nome di smoothness-constrained least-square method (de Groot-Hedlin e Constable 1990, Sasaki 1992) implementata con una tecnica di ottimizzazione quasi-Newtoniana (Loke e Barker 1996a) che la velocizza notevolmente. Le elaborazioni considerano in blocco tutti i dati acquisiti ed ottimizzano un modello a celle di resistività. Questo modello è meno viziato dalla assunzione di una elettrostratigrafia piana valida per il monodimensionale e risulta, quindi, più adattabile alle complesse geometrie che si incontrano nella realtà.
- L'inversione ha termine al momento in cui si ottiene una buona coincidenza, in senso statistico (scarto quadratico medio), tra i dati sperimentali e quelli teorici (confronto tra pseudosezioni misurate e calcolate).
- Disponendo di una taratura (sondaggio meccanico o dati desunti da scavi) il modello geoelettrico del sottosuolo proposto al termine dell'analisi può essere ricondotto a quello geolitologico.

3. EVOLUZIONE NORMATIVA E CENNI DI INGEGNERIA SISMICA

La storia della classificazione sismica Italiana comincia dopo il terribile terremoto di Reggio Calabria e Messina del 1908 (XI grado MCS) che provocò la morte di circa 80.000 persone. In seguito a questo evento ci fu un deciso impegno dello Stato a tradurre in legge le conoscenze scientifiche e tecniche sulle costruzioni sino ad allora maturate. Fu così emanato il Regio decreto n°193 [1909] nel quale è contenuta la prima classificazione sismica del territorio Italiano. Negli anni a seguire si continuò ad aggiornare la normativa tecnica ampliando la classificazione in base alle zone colpite da eventi sismici. Nel 1962 fu pubblicata la Legge n°1684, in seguito ai terremoti di Carnia (1956), Valle del Velino (1961) e Irpinia (1962) dove, per la prima volta, si prescrisse l'applicazione delle norme sismiche ai comuni "soggetti a



intensi movimenti sismici” e non solo a quelli colpiti dal terremoto. In seguito ai terremoti dei Monti Nebroli (1967), della Valle del Belice (1968) e di Tuscania (1971), fu emanata la Legge n° 64 [1974], che costituisce una pietra miliare nel panorama della normativa sismica poiché stabilì che la classificazione sismica dovesse procedere sulla base di comprovate motivazioni tecniche scientifiche. La promulgazione dell’Ordinanza P.C.M. n° 3274 del 20/3/2003 e successive modifiche ed integrazioni ha determinato sul panorama nazionale un grande rinnovamento sul fronte della normativa tecnica in zona sismica, rappresentata fino ad allora dai contenuti del D.M. 16 gennaio 1996. La principale novità introdotta dall’O.P.C.M. n° 3274 è l’abbandono del carattere puramente prescrittivo e convenzionale che caratterizzava le norme tecniche di vecchia concezione, come il D.M. 16/01/1996, per abbracciare un’impostazione puramente prestazionale, in cui gli obiettivi della progettazione e quindi il livello di sicurezza sono esplicitamente dichiarati, a seconda della risposta sismica attesa per la struttura e il sito di costruzione, per un prefissato livello di severità dell’azione sismica.

Le attuali norme tecniche per le costruzioni (N.T.C. D.M. - 14 gennaio 2008) ereditano gran parte dei contenuti dell’O.P.C.M. n° 3274 in merito alla progettazione in zone sismiche; tuttavia rispetto a quest’ultimo documento sono anche stati apportati importanti cambiamenti, di cui forse il più rilevante riguarda la definizione dell’azione sismica.

Per comprendere pienamente il significato della nuova normativa è necessario rifarsi al concetto di **risposta sismica locale**. Dal punto di vista strettamente fisico, per effetto di sito (risposta sismica locale) s’intende l’insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base (R), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (S). Nel presente lavoro si sfrutterà la teoria di Nakamura che relaziona lo spettro di risposta del substrato roccioso (rapporto spettrale $H / V = 1$) con quello effettivamente misurato in superficie.

Il moto sismico è amplificato in corrispondenza di determinate frequenze che corrispondono alle frequenze naturali f_n di vibrazione del deposito:

$$f_n = 1 / T_n = (V_s * (2n - 1)) / (4 * H) \quad \text{con } n = 1, 2, \dots, \quad [3.1]$$

mentre risulta ridotto di amplificazione alle frequenze elevate a causa dello smorzamento del terreno. Di particolare importanza è la prima frequenza naturale di vibrazione del deposito denominata frequenza fondamentale di risonanza:

$$f_1 = 1 / T_1 = V_s / 4H \quad [3.2]$$

E’ quindi necessario porre estrema attenzione a fenomeni di **“doppia risonanza”**, cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei manufatti ivi edificati in quanto le azioni sismiche su di essi sarebbero gravose.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall’altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani.} \quad [3.3]$$

E’ la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{freq. naturale edificio} \approx \text{freq. fondamentale di risonanza del sito} \quad [3.4]$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché da luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

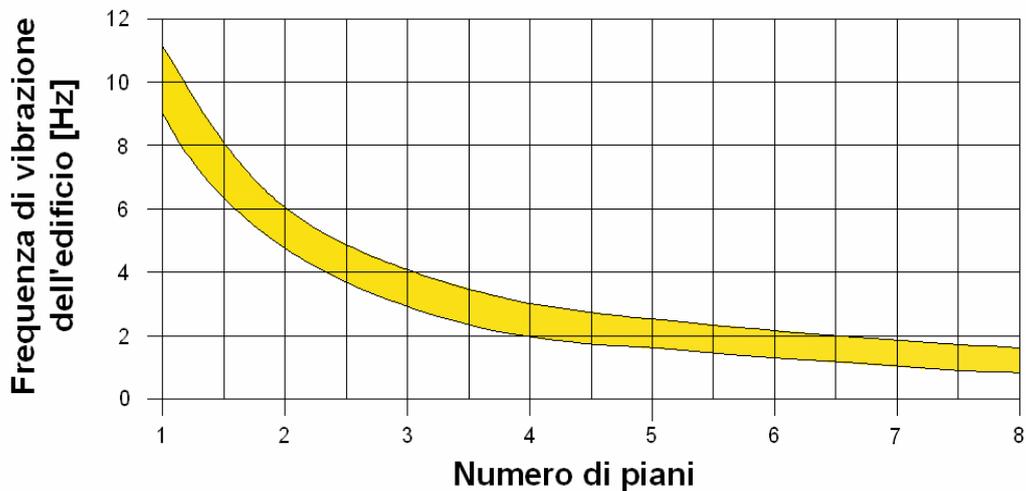
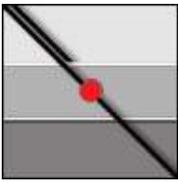


Figura - Frequenza di vibrazione degli edifici rapportata al numero di piani.

4. ANALISI SISMICA DI SITO E DEFINIZIONE CATEGORIA DI SOTTOSUOLO

4.1 Risultati ottenuti dalle indagini sismiche effettuate

L'obiettivo primario delle indagini geofisiche è la ricostruzione sismo - stratigrafica di sito mediante la stima del gradiente geosismico. L'allegato sismico "Tav. n°1: Sezione sismica con inversione tomografica n°1" e "Tav. n°2: Sezione sismica con inversione tomografica n°2", mostra l'andamento del sottosuolo attraverso una scala cromatica di colori che parte dal nero e incrementa verso il bianco. Lo spessore delle unità geosismiche può essere stimato attraverso la scala metrica posta sulle ordinate del grafico. Ai fini dell'elaborazione finale dei dati, il profilo altimetrico è stato rilevato direttamente sul terreno acquisendo la quota di ogni geofono.

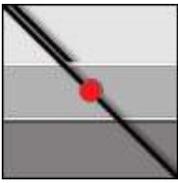
A seguire sono riportate le misure Re.Mi. e H.V.S.R. con la relativa sismo - stratigrafia del sottosuolo e la frequenza fondamentale di risonanza di sito. I dati sismici sono stati acquisiti nelle aree in prossimità dei punti critici di progetto in funzione della morfologia del terreno e degli spazi disponibili.

4.2 Prospezione sismica a rifrazione con inversione tomografica

Le linee sismiche sono state eseguite nei pressi del futuro intervento il cui risultato grafico (sezione sismica 2D) è riportato in allegato: Tav. n°1 e Tav. n°2.

E' risultato possibile individuare tre differenti unità geosismiche in funzione dei contrasti di velocità. Le unità sono state così distinte:

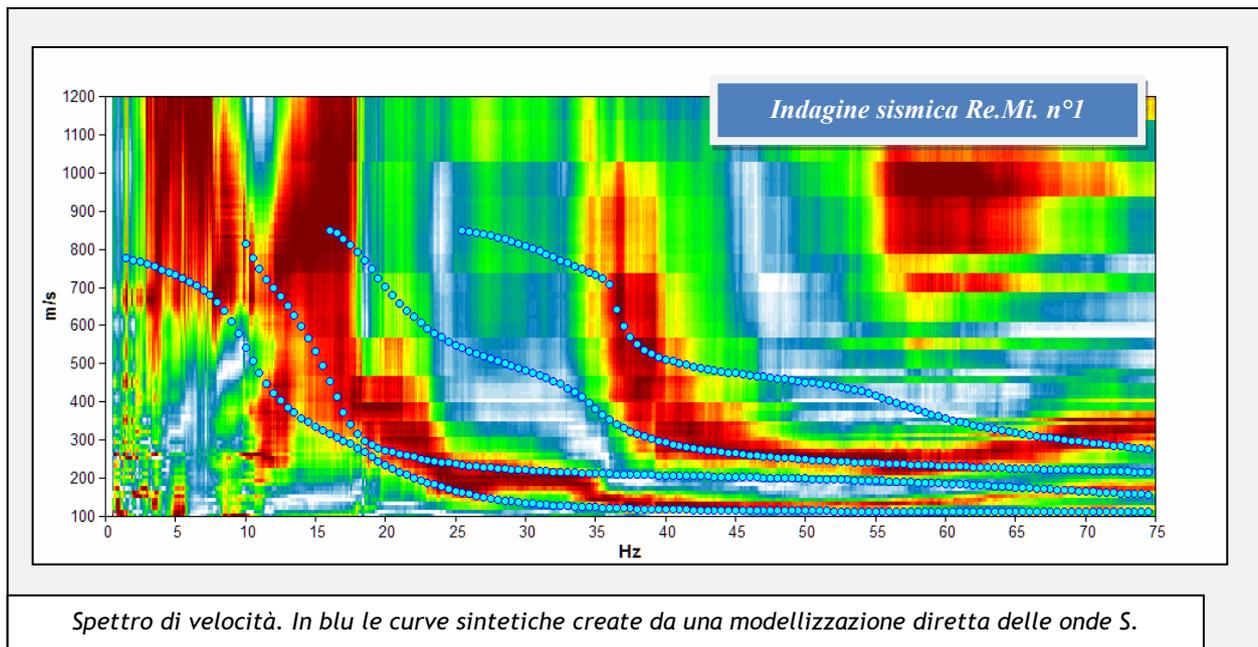
- ✓ sopra la linea tratteggiata color rosso osserviamo la presenza di una copertura moderatamente addensata ($V_p < 2000$ m/s);



- ✓ tra la linea tratteggiata rossa e la linea tratteggiata blu è presente un materiale con velocità comprese tra 2000 m/s e 4000 m/s correlabile ad una formazione rocciosa più o meno fratturata / alterata;
- ✓ sotto la linea tratteggiata blu si registrano velocità superiori ai 4000 m/s. Queste sono verosimilmente attribuibili alla presenza dell'ammasso roccioso compatto.

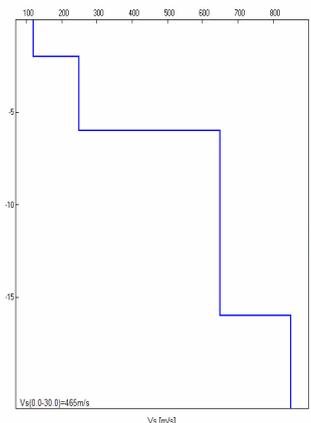
4.3 Indagine sismica passiva in array (Re.Mi.)

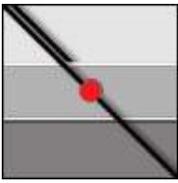
Indagine sismica passiva Re.Mi. n° 1



La ricostruzione sismo - stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di una copertura poco addensata fino a circa 2 m dal p.c. locale caratterizzata da una V_s di 120 m/s. Per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato: $V_s \approx 250$ m/s.

Ad una profondità di circa 6 m dal p.c. locale si riscontra un aumento delle velocità di propagazione delle onde di taglio ($V_s \approx 650$ m/s - vedi *modello sismo - stratigrafico interpretativo* riportato a seguire) probabilmente legato alla presenza di un ammasso roccioso fratturato / alterato mentre la roccia compatta che, dal punto di vista sismico, si comporta come un *bedrock geofisico* ($V_s \approx 850$ m/s) è posizionata a circa 16 m dal p.c. locale.

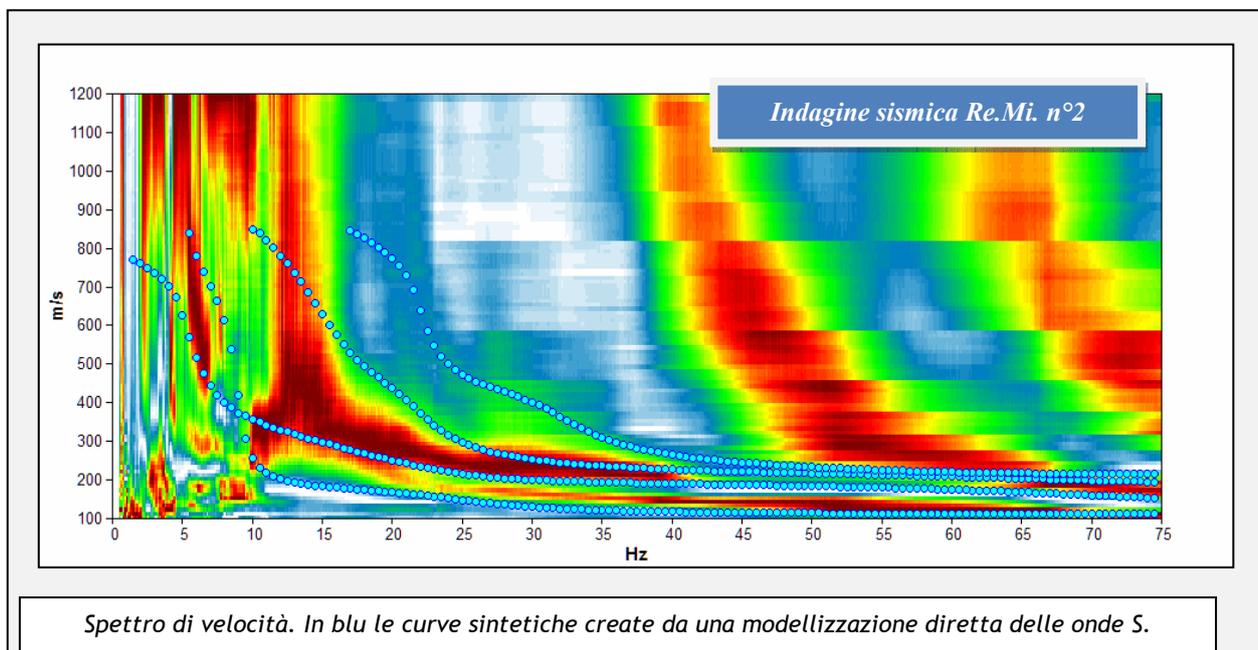




Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (*modello sismo - stratigrafico interpretativo*):

Indagine sismica Re.Mi. n° 1	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	120	2	0,0 - 2,0
II SISMOSTRATO	250	4	2,0 - ≈ 6
III SISMOSTRATO	650	10	≈ 6 - ≈ 16
IV SISMOSTRATO	850	Semisp.	≈ 16 - Semisp.

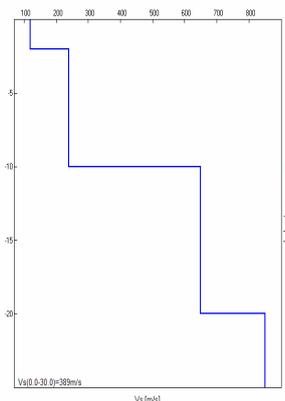
Indagine sismica passiva Re.Mi. n° 2

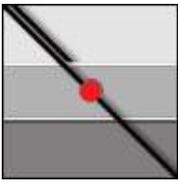


Come per la misura Re.Mi. n° 1, la ricostruzione sismo - stratigrafica di sito ha evidenziato la presenza di una copertura poco addensata fino a circa 2 m dal p.c. locale caratterizzata da una V_s di 120 m/s. Per valori di profondità maggiori il grado di rigidità diventa più elevato: $V_s \approx 240$ m/s.

Ad una profondità di circa 10 m dal p.c. locale si riscontra un aumento delle velocità di propagazione delle onde di taglio ($V_s \approx 650$ m/s - vedi *modello sismo - stratigrafico interpretativo* riportato a seguire) probabilmente legato alla presenza di un ammasso roccioso fratturato / alterato mentre la roccia compatta che, dal punto di vista sismico, si comporta come un *bedrock geofisico* ($V_s \approx 850$ m/s) è posizionata a circa 20 m dal p.c. locale.

Il rilievo nello specifico ha fornito i seguenti dati sismici (*modello sismo - stratigrafico interpretativo*):





Indagine sismica Re.Mi. n° 2	Velocità onde di taglio [m/s]	Spessori [m]	Profondità [m]
I SISMOSTRATO	120	2	0,0 - 2,0
II SISMOSTRATO	240	8	2,0 - ≈ 10
III SISMOSTRATO	650	10	≈ 10 - ≈ 20
IV SISMOSTRATO	850	Semisp.	≈ 20 - Semisp.

4.4 Indagine sismica passiva a stazione singola (H.V.S.R.)

Nel caso specifico del sito in esame si è cercato di correlare i valori di picco, dello spettro di risposta HVSR, con le frequenze fondamentali di risonanza di sito.

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 sono potute ricavare le frequenze relative ad ogni discontinuità sismica.

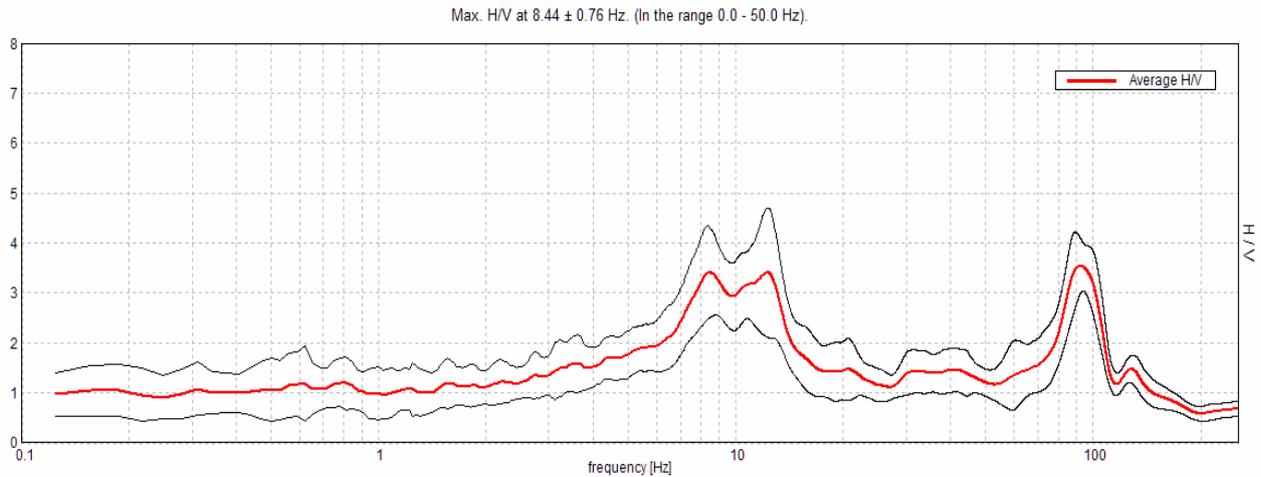
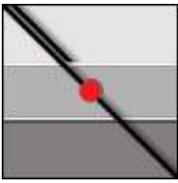
La frequenza caratteristica di risonanza di sito, generata dalla discontinuità sismica a più elevato rapporto spettrale ($H/V \approx 3 - 4$) e misurata da p.c. locale, è di circa 8,4 Hz,

Frequenza fondamentale di risonanza
8,44 ± 0,76 Hz

Si ritiene importante, vista l'ampiezza dei picchi spettrali registrati, considerare la finestra frequenziale di circa 6 - 15 Hz come *range* di possibili valori di vibrazione del terreno in caso di evento sismico di magnitudo rilevante poiché d'interesse ingegneristico - strutturale.

E' ormai consolidata, sia a livello accademico sia professionale, l'ipotesi che le strutture subiscono le sollecitazioni sismiche maggiori quando c'è coincidenza tra la frequenza di vibrazione naturale del terreno investito da un'onda sismica e quella naturale dell'edificio.

Si dovrà quindi porre estrema attenzione nell'edificare strutture aventi lo stesso periodo di vibrazione naturale del terreno poiché il rapporto H/V calcolato è tale da ipotizzare un fattore di amplificazione del moto sismico in superficie.

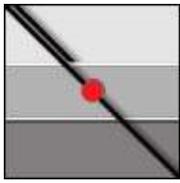


Rapporto spettrale H/V misurato. In rosso è indicato l'HV medio mentre in nero l'intervallo di confidenza al 95%.

4.5 Categoria di sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 14 gennaio 2008

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi o in rapporto ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di Categorie di Sottosuolo di riferimento. Per definire tali categorie, il D.M. 14/01/08 prevede, in questo caso, il calcolo del parametro $V_{s,30}$, ovvero della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_s entro 30 m di profondità dal piano di posa delle fondazioni.

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, 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 , 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 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
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 (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).



E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).
---	---

Esistono poi due categorie speciali di sottosuolo, che sono quelle denominate dalle sigle S1 e S2, per le quali le NTC08 richiedono che l'azione sismica sia definita tramite il ricorso a studi speciali. Per queste categorie di sottosuolo non è quindi possibile utilizzare l'approccio semplificato basato sul coefficiente di amplificazione stratigrafica.

S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < cu,30 < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione , di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

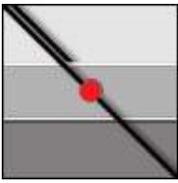
Dalle indagini sismiche effettuate è possibile calcolare la velocità media di propagazione delle onde di taglio fino a 30 m dal piano di posa delle fondazioni come espressamente richiesto dalla normativa vigente (*Norme Tecniche sulle Costruzioni - D.M. 14/01/2008*). A seguire si riportano i valori di $V_{s,30}$ ipotizzando varie profondità delle fondazioni:

Profondità piano di posa delle fondazioni	$V_{s,30}$ da Re.Mi. n° 1	$V_{s,30}$ da Re.Mi. n° 2
2 m dal p.c.	$V_s (2 - 32) \approx 598$ m/s	$V_s (2 - 32) \approx 477$ m/s
4 m dal p.c.	$V_s (4 - 34) \approx 673$ m/s	$V_s (4 - 34) \approx 528$ m/s
6 m dal p.c.	$V_s (6 - 36) \approx 771$ m/s	$V_s (6 - 36) \approx 590$ m/s
8 m dal p.c.	$V_s (8 - 38) \approx 786$ m/s	$V_s (8 - 38) \approx 668$ m/s

Dalla ricostruzione del quadro geofisico emerso dal presente studio e dalle indicazioni normative si dovrebbe prevedere l'inserimento del sito d'indagine nella **Categoria S2** (Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti) in quanto il sito d'indagine non rientra:

- nella Categoria A poiché il valore $V_{s,30}$ è inferiore a 800 m/s;
- nelle Categorie B, C e D poiché lo spessore del materiale sopra il *bedrock geofisico* è minore di 30 m;
- nella Categoria E poiché il materiale sopra il *bedrock geofisico* è caratterizzato da una V_s equivalente che non rientra tra quelle delle Categorie C o D.

Alla luce dei risultati ottenuti dal rilievo sismico HVSR che, di fatto, misura le frequenze di vibrazione di sito oltre alle velocità di propagazione delle onde di taglio tramite inversione vincolata, si consiglia di effettuare uno studio approfondito di **risposta sismica locale** (RSL) o, in alternativa, di assegnare in via cautelativa la **Categoria di Sottosuolo D** in quanto presenta i coefficienti di sicurezza più elevati per le procedure semplificate.



5. ANALISI GEOELETRICA E RESISTIVITA' DEL SOTTOSUOLO

L'ubicazione delle tomografie elettriche è riportata in *Fig. 2 - Ubicazione prove in situ* riportata a pag. 5 mentre nelle Tav. n°3, n°4 e n°5, riportate in allegato, viene mostrato l'andamento della resistività nel sottosuolo attraverso una scala cromatica di colori che parte dal blu e incrementa verso il viola. Lo spessore delle unità geoelettriche possono essere stimate attraverso la scala metrica posta sulle ordinate del grafico.

Le sezioni sono state acquisite nell'area in prossimità dei punti critici di progetto in funzione della morfologia del terreno e degli spazi disponibili.

La stabilità delle misure e quindi la loro qualità si presenta elevata avendo potuto mantenere scarti decisamente inferiori a 2%.

Il modello elettrico ottimizzato, che restituisce la resistività reale del terreno, presenta un *range* di valori compresi tra pochi ohm * m ed oltre 2000 ohm * m.

Mediamente il primo sottosuolo è decisamente poco resistivo (max 30 - 50 ohm * m) rappresentato dai colori nero - blu e verde chiaro mentre al di sotto di tale livello la resistività aumenta e questo dato potrebbe essere legato alla presenza della formazione rocciosa più resistiva (color giallo - rosso e viola).

La finalità delle indagini elettriche è l'individuazione di anomalie resistive rappresentate da isolati e improvvisi aumenti o diminuzioni di resistività che nel primo caso denota la probabile presenza di cavità vuote mentre nel secondo caso cavità riempite da materiale conduttivo.

Risultano particolarmente interessanti le concentrazioni di elevata resistività al 15 m e al 75 m della linea geoelettrica n° 1 che potrebbero essere correlate a cavità di natura carsica. Altrettanto rilevate, per la sua forma circolare, l'anomalia presente a 60 m nella sezione n° 3.

Tali osservazioni sono graficamente visibile nell'*interpretazione del modello di resistività* presente in ogni allegato (Tav. n°3, n°4 e n°5). Si evidenziano inoltre locali diminuzione di resistività associabili a forti conduttori anche a elevate profondità probabilmente associati a circolazioni idriche o fratture riempite di argilla / limo.

Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione utilizzata e di problematiche incontrate durante la fase di acquisizione..

ALLEGATI

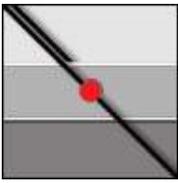
Tav. n° 1: Sezione sismica con inversione tomografica n° 1

Tav. n° 2: Sezione sismica con inversione tomografica n° 2

Tav. n° 3: Sezioni geoelettriche 2D - Sezione tomografica n° 1

Tav. n° 4: Sezioni geoelettriche 2D - Sezione tomografica n° 2

Tav. n° 5: Sezioni geoelettriche 2D - Sezione tomografica n° 3



BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- ✓ Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, p. 665 - 666.
- ✓ Arai H. e Tokimatsu K., 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, p. 53 - 63.
- ✓ Carrera E., Rapolla A., Roberti N., 2004. Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici, *Liguori Editore*.
- ✓ Castellaro S., Mulargia F. Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, *Geologia Tecnica Regionale*, vol. 3.
- ✓ D'Amico V., Picozzi M., Albarello D., Naso G. e Tropenscovino S., 2004. Quick estimates of soft sediments thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy, *J. Eartq. Eng.*, 8, p. 895 - 908.
- ✓ Dal Moro G., 2008b, Rapporto sulla campagna Vs30 in Friuli Venezia Giulia, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Università di Trieste.
- ✓ Dal Moro G & Pipan M., 2007, Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curve and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *J. Appl. Geophysics*, 61, 56-81.
- ✓ Gallipoli R., La Penna V., Lorenzo P. et al., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy, *European J. Environm. and Eng. Geophys.*, 4, p. 117 - 128.
- ✓ Ibs-von Seht M. e Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. America*, 89, p. 250 - 290.
- ✓ Ivanov, J., Miller, R.D., Xia, J., Steeples, D., and Parck, C.B., 2006, Joint Analysis of Refractions with Surface Waves. An Inverse Refraction-Traveltime Solution: *Geophysics*, 71, R131-R138.
- ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2001. A critical review of 10 Years of microtremor HVSR technique, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, P. 255 - 266.
- ✓ Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2006. Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Conf. Eartq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3-8 Sept. no 270.
- ✓ Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., 2007. Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica", *Il geologo - Ordine dei Geologi Regione Emilia Romagna*.
- ✓ Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, p. 25 - 30.
- ✓ Patella D., 1986. Low-pass filtering for noisy Schlumberger sounding curves. *Part 1: Theory. Geoph. Prosp.*, v.34
- ✓ Roth M. & Holliger K- 1999. Inversion of Sourcegenerated noise in high-resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18, 1402-1406.
- ✓ SESAME Project: "Site Effects Assessment Using Ambient Excitations", 2005.
- ✓ State Public Works Service, 1969. Standard graphs for resistivity prospecting. *E.A.E.G., Netherlands*.
- ✓ Zohdy A.A.R., 1968. The affect of current leakage and electrode spacing errors on resistivity measurements. *U.S. Geol. Surv. Res.*, p. D258-D264.