COMUNE DI MOCONESI

CITTA' METROPOLITANA DI GENOVA

OGGETTO

RINNOVO AUTORIZZAZIONE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DELLA DISCARICA DI DETRITI ARDESIACI DENOMINATA "GALLERIA" IN LOCALITÀ CORNIA

COMMITTENTE

Spett.le Società ADI Ardesia Dondero Italia snc

STUDIO SISMO-STRATIGRAFICO

INDICE DEI CAPITOLI

1. *INTRODUZIONE*

2. *METODO NAKAMURA*

   2.1 ACQUISIZIONE DEL MICROTREMORE
   2.2 ELABORAZIONE DEL MICROTREMORE
   2.3 ANALISI ED INTERPRETAZIONE DELLE CURVE H/V
   2.4 DETERMINAZIONE DEL PROFILO DI VS
   2.5 DETERMINAZIONE DELLA CLASSE DI SOTTOSUOLO

APPENDICE

TAVOLA 1

1. INTRODUZIONE

Il report presenta i risultati delle indagini geofisiche (sismo-stratigrafiche) condotte per la determinazione della categoria di sottosuolo e della stratigrafia per la discarica per detriti ardesiaci denominata *"Galleria"*, sita in località *Cornia*, nel *Comune di Moconesi (Ge),* ai sensi delle *Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC08* (*Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008*).

Al fine della determinazione della classe di sito e della stratigrafia è stata condotta un'indagine geofisica consistente in quattro misure di rumore ambientale (microtremore), poi elaborate mediante la tecnica *Nakamura* (*Nakamura, 1989*).

Le misure sono state effettuate al fine di determinare la frequenza fondamentale (*f0*) dei siti di studio e per ottenere una stima della velocità di propagazione delle onde di taglio negli strati di terreno (*VS*). Il calcolo del profilo di *VS* è stato realizzato mediante un processo noto come "inversione numerica" o, più precisamente, mediante l'applicazione di un metodo numerico di tipo diretto (*forward modeling*).

L'ubicazione delle misure effettuate (indicate come *S1, S2, S3 ed S4*) è mostrata nell'allegata *Tavola 1*. Nei paragrafi seguenti sono presentate le metodologie impiegate ed i risultati ottenuti.

2. METODO NAKAMURA

Il metodo *Nakamura* (*Nakamura, 1989*) è una tra le tecniche più utilizzate per lo studio della risposta sismica di un sito. Tale metodo, ormai consolidato a livello scientifico (es. *SESAME Working Group, 2004*) ed in via di diffusione in ambito professionale, consente di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno (o frequenza di risonanza), *f0*, a partire da registrazioni di microtremore.

Quest'ultimo si assume sia principalmente costituito da onde sismiche superficiali, nella fattispecie onde di *Rayleigh*. Il contrasto d'impedenza sismica tra gli strati di terreno superficiali ed il substrato roccioso è la causa dell'amplificazione al sito.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il metodo *Nakamura* è quella per cui la componente verticale del moto sia esente da effetti di amplificazione. Verificata tale ipotesi, la funzione di amplificazione è determinabile come il rapporto tra le gli spettri di *Fourier* relativi alle componenti orizzontali (*H*) e verticale (*V*) di una stessa registrazione. Tale funzione è propriamente indicata come curva *H/V* (per questo spesso si parla di tecnica *HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio Technique*) ed esprime la variazione dell'amplificazione del terreno in funzione della frequenza.

La frequenza di risonanza corrisponde al primo picco di amplificazione individuabile sulla curva *H/V* e, nel caso di terreno a comportamento lineare, può essere messa in relazione allo spessore dei sedimenti, *h*, e alla velocità media di propagazione delle onde di taglio, *VS*, nei sedimenti stessi (es. *Kramer, 1996*):

$$f_0 = Vs/4H$$

Nei paragrafi successivi sono descritte le procedure di acquisizione ed elaborazione del microtremore nonché l'analisi dei risultati.

2.1 ACQUISIZIONE DEL MICROTREMORE

L'acquisizione del rumore ambientale ha previsto l'installazione di cinque stazioni sismiche (attraverso sismometro/velocimetro) per ogni sito di misura; il sito è stato scelto sulla base della distribuzione omogenea sia areale che nelle diverse situazioni geologico stratigrafiche allo scopo di ottenere una casistica più completa possibile.

Le misure sono state effettuate con uno strumento denominato *Gemini 2* prodotto dalla ditta *Pasi* di *Torino*. Il *Gemini 2* è un acquisitore dati *HVSR* costituito da una terna di geofoni con frequenza di risonanza di *2Hz*, accoppiati sia meccanicamente che elettricamente e da un acquisitore di dati a *24bit* reali appositamente progettato.

Per il suo funzionamento in campagna il *Gemini 2* viene collegato ad un computer portatile tramite un'interfaccia *USB*. Come già detto i tre geofoni interni sono orientati secondo una terna di assi cartesiani, assumendo la convenzione descritta nelle linee guida del progetto *SESAME*: l'asse Z corrisponde al geofono verticale (direzione *Up-Down*), l'asse *X* e l'asse *Y* corrispondono rispettivamente al geofono orizzontale (direzione *East-West*) e al geofono orizzontale (direzione *North-South*).

La strumentazione adottata è elencata di seguito e mostrata nella pagina seguente in *Foto 1*:



Foto 1: Strumentazione utilizzata per la registrazione di microtremore. Sismometro tricomponente *Gemini 2* prodotto dalla ditta *Pasi* di *Torino* utilizzato per l'acquisizione delle vibrazioni ambientali per la prova *H/V*. Si nota il sismometro (colore arancione) ed il computer portatile. Il sismometro è accoppiato con il terreno a mezzo di piedini appuntiti infissi a terra.

Riguardo al sismometro, si precisa che, rispetto ad altri strumenti impiegati per applicazioni analoghe basati su geofoni con periodi propri di *4.5Hz*, il *Gemini 2* tricomponente impiega un geofono tri-assiale con periodo naturale di *0.5s (2Hz)* condizionato elettronicamente in modo da fornire una curva di risposta piatta per periodi fino a *5s (0.2Hz)*.

Nella pratica questo si traduce nella possibilità di interpretare la curva *H/V* fino a frequenze di *0.2Hz* (tipiche nel caso di substrati molto profondi o valli alluvionali), cosa che non sarebbe possibile nel caso di strumenti con frequenze naturali maggiori (es. *4.5Hz*).

Il *survey* ha previsto cinque punti di misura (cfr. *Tavola 1*) presso cui sono state effettuate registrazioni di durata pari a 20 minuti ciascuna.

2.2 ELABORAZIONE DEL MICROTREMORE

Come osservato precedentemente, il metodo *Nakamura* (*Nakamura, 1989*) consiste nel calcolo dei rapporti degli spettri di *Fourier* relativi alle componenti orizzontali (Nord-Sud e Est-Ovest) e verticale del segnale registrato (rapporti *H/V*). Per ogni sito di misura saranno quindi calcolati due rapporti spettrali: uno relativo alla componente Nord-Sud (NS) rispetto a quella verticale (*Z*) ed uno relativo alla componente Est-Ovest (EW) sempre rispetto alla verticale (*Z*).

Ai fini della determinazione dei rapporti *H/V* è stato impiegato il software di elaborazione *Geopsy V. 2.9.1* (*http://www.geopsy.org/*). Ciascun segnale registrato è stato suddiviso in finestre temporali della durata di 25s ciascuna.

Successivamente è stata effettuata un'analisi spettrale (calcolo dello spettro di *Fourier*) per ciascuna finestra e, al fine di eliminare eventuali *spike* (es. variazioni improvvise del segnale dovute a rumore antropico) e facilitare così l'interpretazione dei rapporti *H/V*, gli spettri di *Fourier* sono stati "lisciati" applicando una opportuna funzione di *smoothing* (funzione *Konno-Omachi* con costante di *smoothing* uguale a 40).

Infine, la funzione di amplificazione è stata determinata come la media dei rapporti *H/V* degli spettri di *Fourier* relativi a ciascuna finestra di segnale. La curva così calcolata risulta quindi una misura statistica effettuata su diverse porzioni di segnale di ampiezza costante.

2.3 ANALISI ED INTERPRETAZIONE DELLE CURVE H/V

Le curve *H/V* (determinate come la media delle curve *H/V* per le due componenti NS e EW) sono presentate per ogni acquisizione nelle figure sottostanti. La linea continua rappresenta la curva media mentre quelle tratteggiate delimitano la banda d'incertezza.

Laddove il rapporto *H/V* ha un picco si ha una variazione di litologia (più correttamente si tratta di una variazione delle proprietà meccaniche dei mezzi attraversati di solito associata ad una variazione litologica); nella maggior parte dei casi le due cose coincidono ma potrebbe, a rigore di logica, anche trattarsi di un puro addensamento del materiale che è tanto più marcata tanto più grande è il picco in questione.

Il passo ulteriore è mettere in rapporto la frequenza a cui avviene questo passaggio con la sua profondità (inversione), operazione questa usualmente eseguita o tramite punti di taratura noti nelle vicinanze del sito di indagine o tramite algoritmi di calcolo sviluppati utilizzando le *Vs* medie conosciute per i singoli livelli individuati.

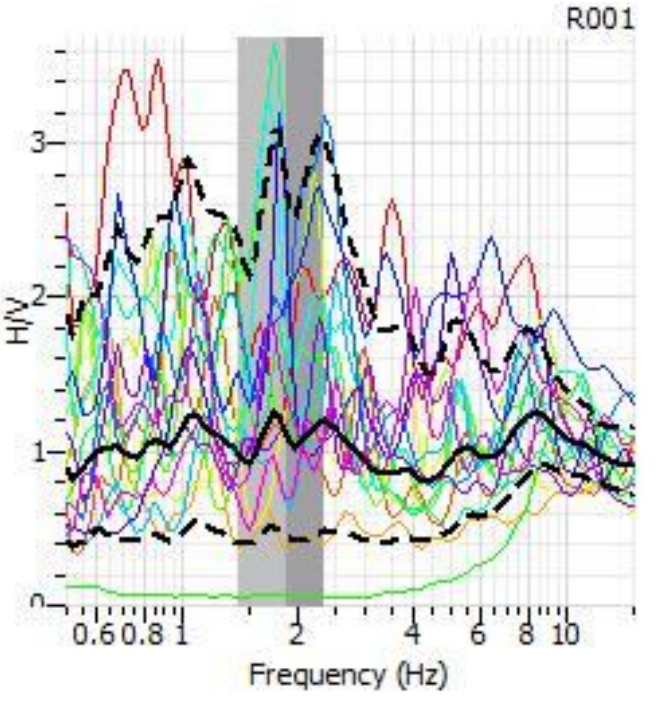


Figura 1: Curva H/V per il sito S1.

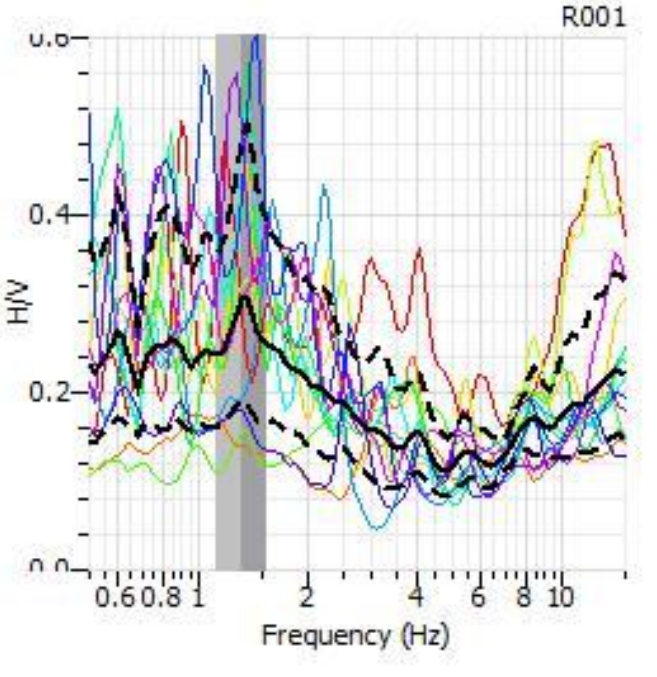


Figura 2: Curva H/V per il sito S2.

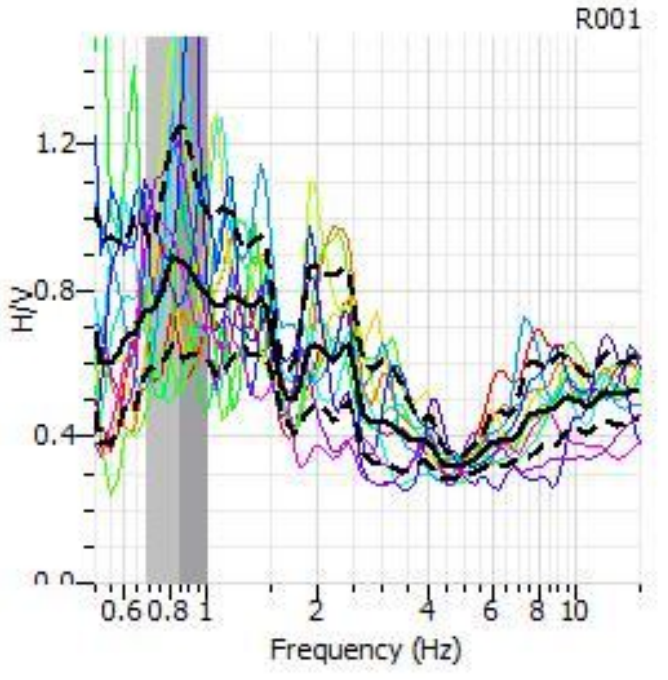


Figura 3: Curva H/V per il sito S3.

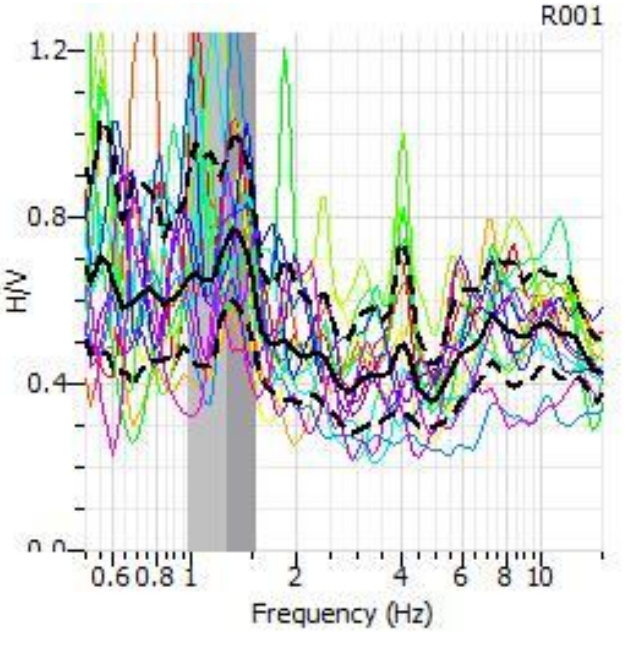


Figura 4: Curva H/V per il sito S4.

2.4 Determinazione del profilo di VS

Il dato acquisito così come descritto nel paragrafo precedente è stato utilizzato per la determinazione del profilo di velocità delle onde di taglio *VS* necessario per la valutazione della velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30m di profondità (*VS,30*).

A tal scopo, è stato impiegato il software *Dinver V. 1.4.1* del pacchetto *Geopsy*, software che sfrutta la tecnica denominata "*Conditional Neighbourhood Algorithm*" (*Sambridge, 1999; Wathlet, 2008*) per l'inversione della curva di dispersione e/o della curva di ellitticità delle onde di *Rayleigh* (approssimabile alla curva *H/V*).

Più precisamente, tale algoritmo di calcolo sfrutta un metodo finalizzato alla ricerca (all'interno di uno spazio campionario) dei modelli parametrici del terreno a cui corrisponde una minimizzazione degli scarti (*misfit*) tra curva di ellitticità sperimentale e curva numerica.

Il metodo consiste nel confrontare la curva di ellitticità sperimentale (assunta equivalente alla curva *H/V*) con quella numerica calcolata per diversi modelli del terreno (definiti da strati di dato spessore, velocità delle onde sismiche e densità). Il confronto viene effettuato per un prefissato numero di iterazioni, alle quali corrispondono variazioni casuali (entro un range prefissato) dei valori dei parametri del modello numerico, fino a raggiungere un accordo ottimale (minimizzazione degli scarti) tra la curva di ellitticità sperimentale e quella numerica. In genere, quando lo scarto tra le curve è inferiore al 10% l'accordo può considerarsi soddisfacente ed il problema risolto.

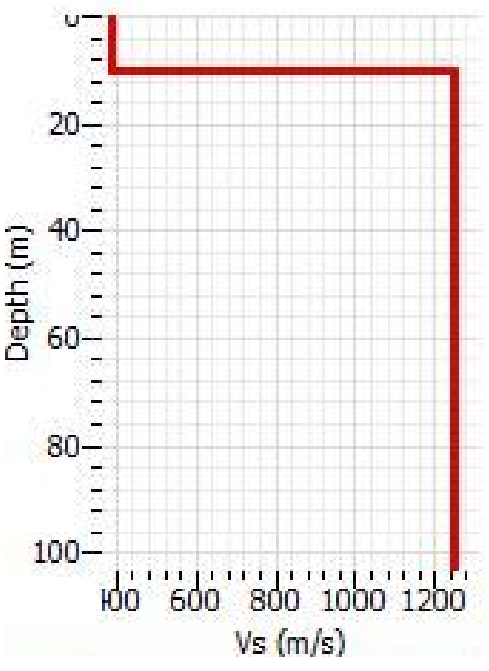


Figura 5: Profilo di velocità (VS) per il sito S1.

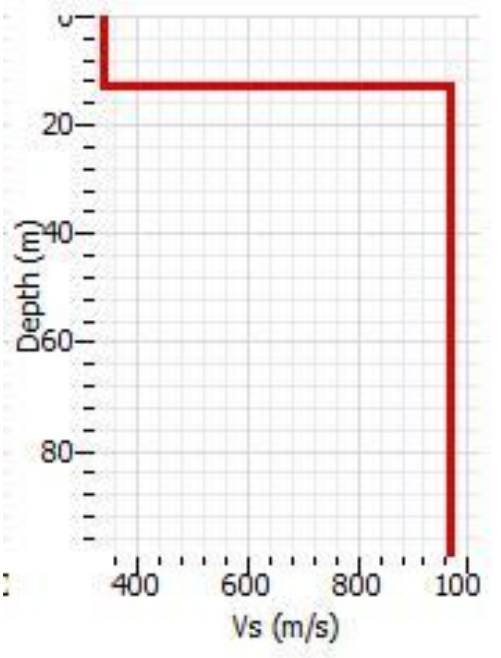


Figura 6: Profilo di velocità (VS) per il sito S2.

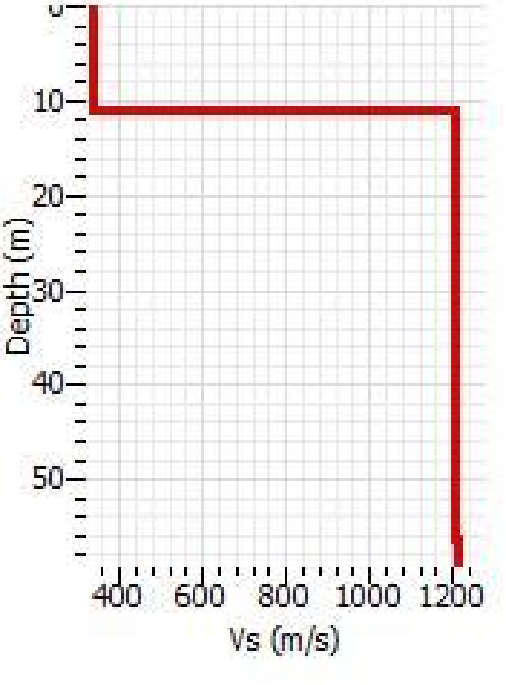


Figura 7: Profilo di velocità (VS) per il sito S3.

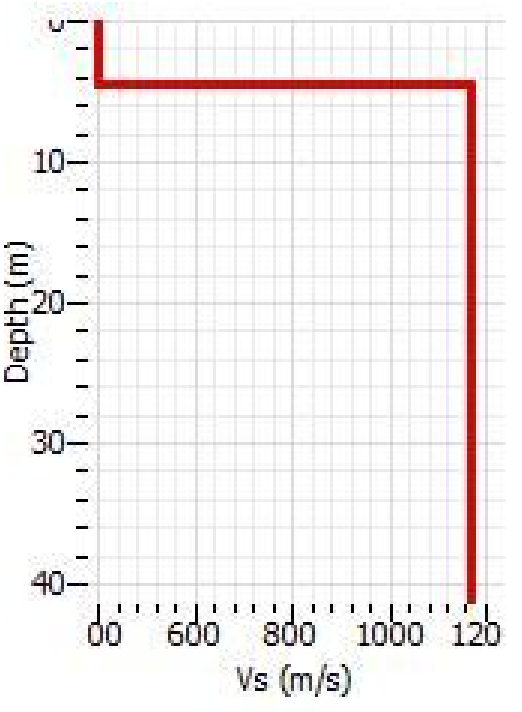


Figura 8: Profilo di velocità (VS) per il sito S4.

Tabella 1: Valori numerici del profilo di VS per il sito S1.

Profondità (m)	***V*S (m/s)**
0.0	315
10.2	1250

Tabella 2: Valori numerici del profilo di VS per il sito S2.

Profondità (m)	***V*S (m/s)**
0.0	385
12.8	970

Tabella 3: Valori numerici del profilo di VS per il sito S3.

Profondità (m)	***V*S (m/s)**
0.0	320
11	1220

Tabella 4: Valori numerici del profilo di VS per il sito S4.

Profondità (m)	***V*S (m/s)**
0.0	360
4.4	1170

Dai profili di velocità in Figure 5, 6, 7 e 8 e dalle Tabelle 1, 2, 3 e 4 è evidente il netto incremento della velocità delle onde sismiche a partire da una profondità variabili di circa 4.4m fino a 12.8m, profondità alle quali corrisponderebbe l'interfaccia tra la coltre detritica ardesiaca/coltre naturale ed il sottostante substrato roccioso.

2.5 Determinazione della classe di sottosuolo

Le *NTC08* prevedono che la classe di sottosuolo sia determinata nota la velocità media di propagazione delle onde di taglio nei primi 30m di profondità (*VS,30*):

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove *hi* e *VS,*i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato di terreno compreso nei primi 30m di profondità a partire dal piano di fondazione.

Nel caso in questione, in base a quanto ottenuto dalle indagini geofisiche, considerato che lo spessore dei terreni non risulta superiore a 20m, si afferma che i siti *S1, S2, S3* ed *S4* sono compatibili con quanto previsto dalle *NTC08* per la categoria di suolo ***E*** mentre i siti ove è ubicata la bastionatura in blocchi (poiché il loro piano di fondazione è direttamente attestato entro l'ammasso roccioso), sono compatibili con quanto previsto dalle *NTC08* per la categoria di suolo ***A*** (cfr. *Appendice*).

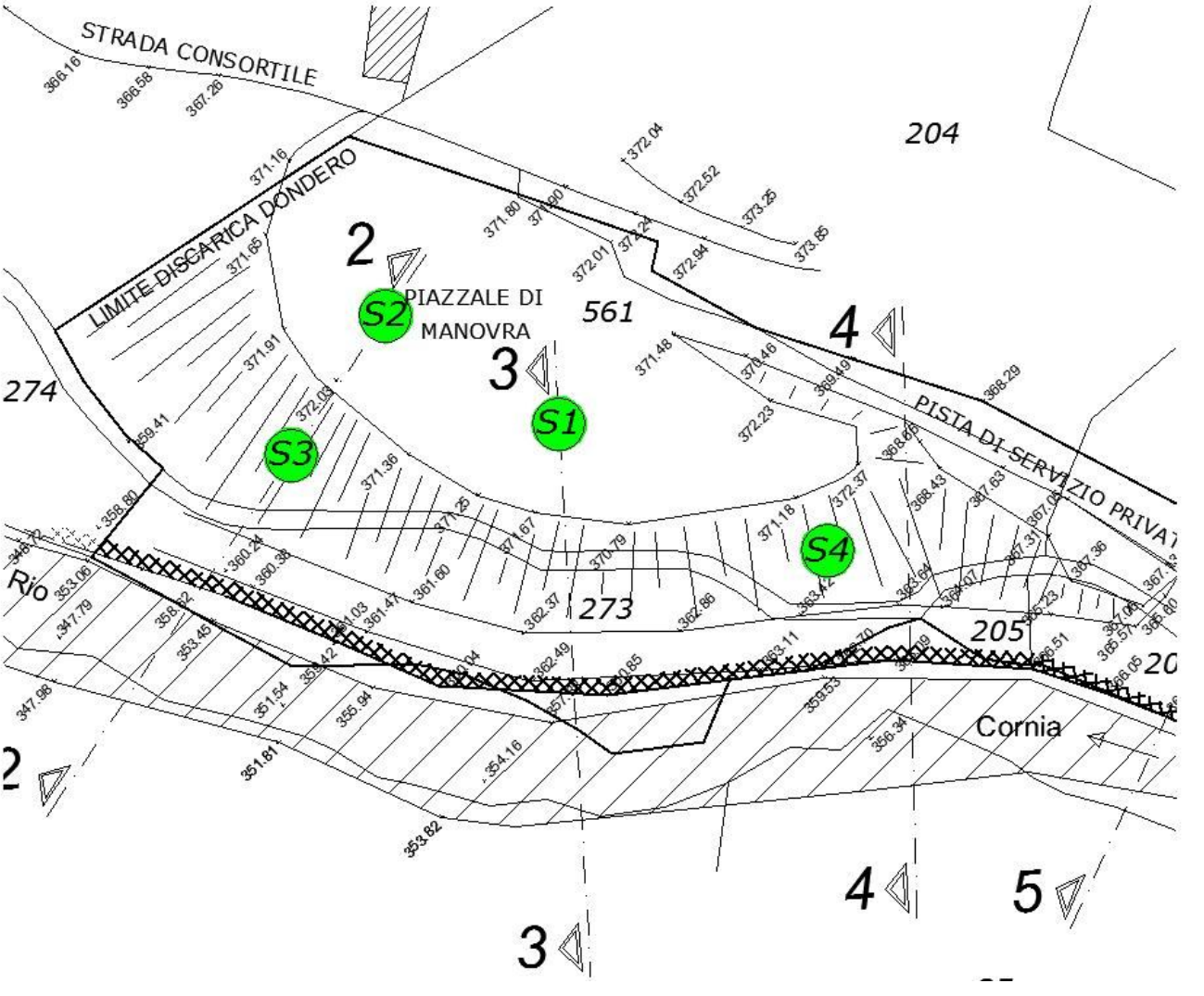
APPENDICE

La tabella di seguito riporta le categorie di sottosuolo definite dalle *Norme Tecniche per le Costruzioni* (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2008). I parametri *N.S.P.T.,30* e *cu,30* ivi citati indicano rispettivamente il numero di colpi *S.P.T.* (*Standard Penetration Test*) e la resistenza non drenata nei primi 30m di profondità.

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 $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ 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 $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di 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 $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ 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).

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ 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.

TAVOLA 1: UBICAZIONE SITI DI INDAGINE



Cicagna, 21 settembre 2016

dott. geol. Andrea Ghilino