

COMUNE DI BRICHERASIO

CITTA' METROPOLITANA DI TORINO

LAVORI DI ADEGUAMENTO SISMICO SCUOLA ELEMENTARE SITA IN VIA VITTORIO EMANUELE II

Codice generale	Codice dell' opera	Lotto	Livello di progettazione	Area di progettazione	Numero elaborato	Tipo documento	Versione
Abri	026	0	E	G	004	rel geo	0-19

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

Geom. Romina BRUNO FRANCO

I PROGETTISTI:

Dott. Ing. Valter Ripamonti (Capogruppo)



Dott. Ing. Ivan Barbero



Dott. Geol. Marco Barbero

Studio Tecnico Dott. Ing. Valter Ripamonti - Via Tessore n° 25 - 10064 Pinerolo - (TO)

Tel 0121/77445 - Fax 0121/375733 - E-Mail:segreteria@ripamontistudio.com - tecnico@ripamontistudio.com

PROGETTO ESECUTIVO

OGGETTO

RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA

VERS.	MODIFICHE	DATA	REDATTORE	SCALA
0	PRIMA CONSEGNA	Marzo 2019	MB	
1				
2				
3				
4				

INDICE

1. PREMESSA.....	1
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	1
3. LINEAMENTI GEOLOGICO-MORFOLOGICI.....	2
4. ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA	3
5. PERICOLOSITA' GEOLOGICA LOCALE	6
6. INDAGINI IN SITO	7
7. ANALISI SISMICA DELL'AREA OGGETTO D'INTERVENTO	9
8. PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA.....	11

ALLEGATI

- Allegato 1 - Localizzazione geografica dell'area oggetto d'indagine
- Allegato 2 - Inquadramento geologico
- Allegato 3 - Indagini geognostiche di riferimento
- Allegato 4 - Indagini geofisiche: relazione illustrativa

1. PREMESSA

La presente relazione geologica e geotecnica si riferisce al progetto esecutivo di LAVORI DI ADEGUAMENTO SISMICO SCUOLA ELEMENTARE SITA IN VIA VITTORIO EMANUELE II nel Comune di Bricherasio.

Più precisamente lo studio è stato condotto allo scopo di definire il modello geologico, geotecnico e sismico dell'area su cui insiste l'edificio scolastico sopra richiamato. A tale fine si è proceduto all'esame della documentazione bibliografica disponibile, con particolare riguardo ai dati relativi alle indagini geognostiche condotte nell'intorno significativo dell'area in esame.

A questo proposito si segnala che l'area considerata nel presente studio nel settembre 2013 è stata oggetto di una campagna di indagini geofisiche condotta a supporto della progettazione degli "INTERVENTI PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO DELLA SCUOLA MEDIA A. CAFFARO", nell'ambito quale sono stati realizzati una tomografia sismica in onde P, volta a ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'area, e un profilo sismico per onde superficiali (SWM – Surface Wave Method), finalizzato alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale tramite la definizione del parametro $V_{s,30}$. In riferimento a quest'ultimo aspetto si rammenta che il Comune di Bricherasio è stato riclassificato in Zona 3S ai sensi della vigente normativa sismica (D.G.R. 11/13058 del 19/1/2010).

Si precisa infine che il presente elaborato è comprensivo della Relazione geologica (§6.2.1 delle NTC18) e della Relazione geotecnica (§6.2.2 delle NTC18).

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area su cui insiste l'edificio scolastico oggetto d'intervento è situata ad una quota di circa 385 metri s.l.m.⁽¹⁾ nel settore centrale del capoluogo comunale di Bricherasio.

Per maggiori ragguagli in merito alla localizzazione geografica dell'area considerata nel presente studio si rimanda all'estratto della BDTRE Base Dati

¹ Piano quotato Carta Tecnica Regionale (CTR).

Territoriale di Riferimento degli Enti della Regione Piemonte in scala 1:10.000 (sezione n. 172160, allestimento cartografico 2018) riportato nell'Allegato 1.

3. LINEAMENTI GEOLOGICO-MORFOLOGICI

Dal punto di vista geologico regionale l'area oggetto d'indagine è localizzata nel settore di raccordo fra il margine occidentale della "pianura cuneese-torinese meridionale" e i primi rilievi della catena alpina, il cui basamento roccioso è costituito in questo settore da litotipi ascrivibili al "Massiccio Cristallino pretriassico del Dora-Maira", il più meridionale fra i Massicci Cristallini Interni di pertinenza pennidica di cui è costituito l'edificio alpino occidentale

L'espressione morfologica di questo raccordo è rappresentata da un sistema di terrazzi alluvionali presente in corrispondenza del lato sinistro dello sbocco vallivo del Torrente Pellice. In particolare si possono riconoscere due superfici terrazzate principali, rispettivamente rilevate di circa 30 - 40 metri e 10 - 15 metri rispetto alla pianura alluvionale recente ed attuale del Pellice.

Dal punto di vista morfologico l'area in esame si presenta debolmente inclinata verso NordEst ed è localizzata sulla superficie terrazzata intermedia poc'anzi richiamata; su questa superficie insiste buona parte del capoluogo comunale di Bricherasio.

Nella Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 (Foglio n. 67, Pinerolo) in corrispondenza dell'area oggetto d'indagine è indicata la presenza di depositi di origine alluvionale riferiti al "Diluviale recente ed alluviale" e, più precisamente, alle "Alluvioni terrazzate", definizioni ormai considerate desuete e poco precise. Al riguardo si sottolinea che, sulla base di quanto riportato nella "Carta geologica del Piemonte" (GeoPiemonte Map, a cura del CNR IGG, Arpa Piemonte - 2016), i depositi in esame possono essere riferiti al Pleistocene inferiore-medio, mentre quelli entro i quali è modellata la superficie terrazzata superiore sono ascrivibili al Pleistocene inferiore (si veda la tavola d'inquadramento geologico riportata nell'Allegato 2).

Dal punto di vista sedimentologico, alla luce del quadro geologico poc'anzi esposto, è ragionevole ritenere che i terreni presenti nell'area indagata siano dei depositi alluvionali grossolani "clast supported", essenzialmente costituiti da ghiaie eterometriche e ciottoli in matrice sabbioso-

limosa. I depositi poc'anzi descritti sono generalmente sormontati da un orizzonte metrico di sedimenti fini che, di norma, costituiscono il "top" di una sequenza deposizionale di ambiente fluviale.

E' ragionevole ipotizzare che il complesso alluvionale sopra descritto sia direttamente sovrapposto al substrato roccioso, visibile in affioramento in corrispondenza degli "inselberg" del Castello di Bricherasio e della cascina Molar. A questo riguardo si rammenta che la bassa Val Pellice è caratterizzata dall'affioramento di litotipi ascrivibili al "Massiccio Dora-Maira".

Infine, per quanto concerne gli aspetti pedologici, facendo riferimento al Foglio 172 della "Carta dei suoli" in scala 1:50.000 della Regione Piemonte (I.P.L.A., 2007), nell'area del capoluogo comunale di Bricherasio si possono riconoscere degli "alfisuoli dei terrazzi antichi non idromorfi" (unità A1).

4. ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA

Allo scopo di ricostruire l'assetto litostratigrafico generale dell'area oggetto del presente studio, si è proceduto alla raccolta dei dati geognostici relativi al settore su cui insiste il capoluogo comunale di Bricherasio⁽²⁾.

In particolare sono stati presi in esame i dati relativi a tre sondaggi a carotaggio continuo (S1 - S3), nonché a tre pozzetti esplorativi (PE1 - PE3). Questi ultimi sono stati eseguiti sotto la direzione dello scrivente e si riferiscono al cantiere ove è stato realizzato il centro polivalente comunale. Si segnala inoltre che il foro del sondaggio S1 è stato completato mediante la posa di un tubo in PVC (\varnothing 3") e successiva cementazione per l'effettuazione di una prova sismica di tipo "down-hole" i cui risultati sono commentati nel capitolo 7.

La localizzazione dei dati di riferimento è indicata nella tavola d'inquadramento geologico riportata nell'Allegato 2.

L'assetto litostratigrafico che emerge dai sondaggi di riferimento, che sono stati spinti a profondità comprese fra i 30,00 m (S1) e i 15,00 m (S3), è coerente con il quadro generale delineato nel precedente capitolo.

In particolare, le tre verticali d'indagine hanno evidenziato la presenza di un livello superficiale di terreno agrario che risulta essere sovrapposto a dei sedimenti di natura limoso-argillosa. Inferiormente a questi materiali, che

² Fonti: Studio Geologico elaborato a supporto del P.R.G.C., "Carta dei caratteri litotecnici" a cura del Dott. Geol. Eugenio ZANELLA (luglio 2015) e Archivio GEOALPI CONSULTING.

presentano uno spessore complessivo compreso fra i 2,00 m (S3) e i 2,90 m (S1), sono presenti dei depositi grossolani essenzialmente costituiti da ghiaie eterometriche con ciottoli in matrice fine di colore variabile dal bruno rossiccio al grigio verdognolo. I clasti, che nel complesso mostrano un discreto grado di alterazione, presentano dimensioni massime di ordine pluridecimetrico. Lungo la verticale d'indagine S1, intercalati ai depositi grossolani sopra descritti, sono stati riscontrati un livello di sedimenti limoso-sabbiosi (intervallo compreso fra -8,10 m e -9,20 m) e un livello più francamente limoso (intervallo compreso fra -20,80 m e -22,00 m). Al riguardo è ragionevole ritenere che questi sedimenti non rappresentino orizzonti continui, viceversa si può ipotizzare che essi costituiscano corpi lentiformi di modesta potenza e ridotta estensione laterale.

Nel corso delle operazioni di perforazione, lungo le verticali dei sondaggi di riferimento, sono state eseguite alcune prove SPT i cui risultati, riportati qui di seguito, mettono in evidenza che i depositi attraversati sono caratterizzati da un grado di addensamento piuttosto elevato⁽³⁾:

SONDAGGIO S1

- -1,50 m dal p.c. → $N_{SPT} = 6$ (limi argillosi);
- -3,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = 58$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -4,50 m dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -6,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = 69$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -7,50 m dal p.c. → $N_{SPT} = 55$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -9,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = 57$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -12,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -15,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -18,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche alterate);
- -21,00 m dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (limi argillosi).

SONDAGGIO S2

- -3,00 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche);
- -4,50 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche);
- -6,00 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche);
- -7,50 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche).

³ Si precisa che i valori indicati nelle colonne stratigrafiche riportate nell'Allegato 3 corrispondono ad un approfondimento di 15 cm. Per ottenere N_{SPT} occorre sommare gli ultimi due valori di ciascuna terna in quanto il primo valore può ritenersi disturbato per effetto del carotaggio.

SONDAGGIO S3

- -2,00 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche);
- -6,00 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche);
- -10,00 metri dal p.c. → $N_{SPT} = R$ (ghiaie eterometriche).

Per quanto riguarda i pozzetti esplorativi, che sono stati spinti ad una profondità massima di -3,60 m dal p.c., si precisa che i dati litostratigrafici ad essi relativi hanno evidenziato che nell'area dove è stato realizzato il centro polivalente comunale, posta circa 150 m a SudOvest rispetto al sito oggetto del presente studio, l'orizzonte superficiale costituito dal terreno agrario e dai sedimenti limosi presenta una potenza compresa fra 1,80 m (PE2) e 2,60 m (PE1), e risulta essere sovrapposto a dei depositi alluvionali grossolani "clast supported" ben addensati, costituiti da ghiaie eterometriche e ciottoli in matrice sabbioso-limosa intensamente alterata, come testimonia la colorazione bruno-ocracea.

Per maggiori ragguagli in merito ai dati geognostici di riferimento si rimanda al fascicolo riportato nell'Allegato 3.

Per quanto concerne l'assetto idrogeologico del settore di pianura oggetto d'indagine, si precisa che il materasso alluvionale costituito dai depositi sopra descritti ospita un acquifero di tipo freatico. Al riguardo, si segnala che l'alimentazione di questo acquifero avviene per infiltrazione diretta degli apporti meteorici e per dispersione in subalveo dai corsi d'acqua. Sulla base di tali considerazioni è ragionevole ritenere che nell'area considerata questo sistema acquifero sia caratterizzato da una direzione di deflusso subparallela alla direttrice SudOvest-NordEst.

In merito alla soggiacenza della falda si precisa che, al termine delle operazioni di perforazione dei sondaggi di riferimento, il livello stabilizzato della superficie libera della falda è risultato essere attestato ad una profondità compresa fra -9,20 m (S2) e -7,20 m (S3).

Per approfondire il quadro idrogeologico dell'area sono state prese in esame le misurazioni effettuate dal *Servizio Sismico* della Regione Piemonte nell'ambito della campagna piezometrica che si è protratta nel periodo compreso tra il dicembre 1986 e il novembre 1997. In particolare sono state prese in esame le misurazioni relative ad un pozzo ubicato circa 650 m a SudSudOvest rispetto al sito oggetto della presente indagine. La

localizzazione del punto di misura, identificato con la sigla P41, è indicata nell'Allegato 2.

Da queste misure si evince che la superficie libera della falda freatica presenta un'escursione di poco superiore ai 2,00 m. Nel dettaglio, il livello di soggiacenza è risultato essere compreso fra -5,50 m e -8,00 m. Per maggiori ragguagli in merito alle misure piezometriche di riferimento si veda la tabella di seguito riportata.

Data	Pozzo P41
	(m da p.c.)
12/12/1986	-8,00
13/05/1987	-6,40
27/03/1991	-5,50
15/11/1991	-6,80
02/06/1992	-7,10
06/11/1992	-5,80
02/06/1993	-5,70
11/11/1993	-5,60
09/06/1994	-5,70
15/11/1995	-7,00
16/04/1996	-5,60
24/10/1996	-6,00
25/05/1997	-7,50
12/11/1997	-8,00

5. PERICOLOSITA' GEOLOGICA LOCALE

Per quanto concerne gli aspetti relativi alla pericolosità geologica locale, si segnala che, nel corso delle indagini di terreno⁽⁴⁾, in corrispondenza del settore su cui insiste l'edificio scolastico oggetto d'intervento, non è stata rilevata la presenza di evidenze morfologiche legate a processi di instabilità in atto che, alla luce del contesto territoriale considerato, possono essere unicamente riconducibili alla dinamica del reticolo idrografico superficiale. A tale riguardo si specifica che, nel settore del capoluogo di Bricherasio, il reticolo idrografico è individuato da una rete di canalizzazioni artificiali.

⁴ Sopralluoghi condotti in data 11 e 13 febbraio 2019.

Le osservazioni di terreno sono state confermate mediante l'analisi delle carte tematiche della Banca Dati Geologica della Regione Piemonte (Foglio n. 67 - Pinerolo: "Carta delle aree inondabili" e "Carta dei tributari minori e delle conoidi potenzialmente attive"), del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) predisposto dall'Autorità di Bacino del Fiume Po ("Atlante dei rischi idraulici e idrogeologici": Foglio 172, Sezione II - Pinerolo), nonché del Piano di Gestione dei Rischi di Alluvioni (PGRA) recentemente elaborato dalla medesima Autorità di Bacino sulla base di quanto previsto dalla Direttiva 2007/60 CE ("Carta della pericolosità da alluvione": Tavola 172 SE, aggiornamento 2015), dalle quali risulta che l'area oggetto d'indagine è posizionata esternamente ad aree interessate da dissesto.

Informazioni di maggiore dettaglio sono state ricavate dalla consultazione dello studio geologico elaborato a supporto del P.R.G.C.⁽⁵⁾ che, sebbene non sia ancora stato adottato, ha confermato che l'area in esame non mostra condizionamenti legati a potenziali processi d'instabilità. Alla luce del quadro appena illustrato, nella "Carta di sintesi" per il settore su cui insiste il sito oggetto d'indagine è stata proposta l'assegnazione alla classe I "edificabile senza condizionamenti e prescrizioni".

6. INDAGINI IN SITO

Come anticipato in premessa, l'area su cui sorge l'edificio scolastico oggetto d'intervento è stata interessata da una campagna di indagini geofisiche⁽⁶⁾, nell'ambito della quale sono stati realizzati una tomografia sismica in onde P, volta a ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'area, e un profilo sismico per onde superficiali (SWM – Surface Wave Method), finalizzato alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale tramite la definizione del parametro $V_{s,30}$. Al riguardo si segnala che le due indagini sono state eseguite lungo il medesimo profilo, la cui ubicazione è indicata nella planimetria riportata nell'Allegato 2 (traccia individuata con la sigla B1).

In sintesi la tomografia sismica in onde P ha fornito i seguenti risultati:

⁵ "Carta geomorfologica, dei dissesti e del reticolo idrografico minore" a cura del Dott. Geol. Eugenio ZANELLA (luglio 2013).

⁶ A cura della GAMUT S.r.l. di Torino, 16 settembre 2013.

- il gradiente verticale di velocità è legato all'aumento del grado di compattazione dei depositi con la profondità;
- la superficie di rifrazione riscontrata alla profondità di 6,00-7,00 m dal p.c. è riconducibile al tetto della zona satura. Per maggiori ragguagli in merito all'assetto idrogeologico locale dell'area si veda la seconda parte del presente capitolo.

Per quanto concerne il profilo sismico SWM, si segnala quanto segue:

- è stato rilevato uno strato superficiale di ridotto spessore riconducibile a materiali di riporto (V_s nell'ordine dei 180 m/s);
- a partire da -1,50 m dal p.c. la velocità aumenta gradualmente da valori di V_s nell'ordine dei 380 m/s fino a valori di circa 610 m/s alla profondità di -13,00 m;
- è stato definito un valore di $V_{s,30}$ pari a 560 m/s (per ulteriori precisazioni al riguardo si rimanda al capitolo 7).

Per maggiori ragguagli in merito alla metodologia d'indagine e ai risultati ottenuti si veda la relazione illustrativa riportata nell'Allegato 4.

Nel corso delle ricognizioni condotte nel febbraio 2019 è stato possibile procedere alla misurazione diretta della falda in corrispondenza dell'area d'intervento. A tale scopo è stato utilizzato il pozzetto presente sul lato sudoccidentale dell'intercapedine del piano interrato; in particolare la superficie libera della falda è risultata essere attestata ad una profondità di circa -4,20 m rispetto al piano del cortile della scuola⁽⁷⁾.

In ragione della prolungata assenza di precipitazioni meteoriche che ha caratterizzato il periodo compreso fra la fine del 2018 e l'inizio del 2019 è evidente che il livello della falda può essere soggetto ad innalzamento. Al riguardo occorre precisare che il pozzetto sopra richiamato è attrezzato con una pompa sommersa che si attiva in occasione della risalita della falda.

A tale proposito si sottolinea che, dalle informazioni fornite dal personale di servizio della scuola, è emerso che la falda può risalire sensibilmente rispetto al livello misurato nel corso del presente studio, tanto da interessare parte dei locali interrati della scuola, con particolare riguardo a quello della porzione più recente dell'edificio perché posto ad una quota inferiore di circa

⁷ 13 febbraio 2019.

1,30 m rispetto al piano interrato della porzione più vecchia del medesimo. Più precisamente, dalle informazioni raccolte, risulta che in passato nel locale poc'anzi richiamato è stato raggiunto un battente idrico di circa 1,00 m.

Si sottolinea infine che il fenomeno appena illustrato è in accordo con i valori di escursione della falda riscontrati nel pozzo P41 cui si è fatto riferimento nel capitolo 4 (a cui si rimanda).

7. ANALISI SISMICA DELL'AREA OGGETTO D'INTERVENTO

Secondo quanto prevede il Decreto 17/01/2018 del Ministero delle Infrastrutture (NTC18), le azioni sismiche di progetto attese al suolo si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di intervento. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche che sono sostanzialmente controllate dall'assetto litostratigrafico locale e riconducibili al profilo di velocità delle onde di taglio V_s nel sottosuolo.

In primo luogo, si deve procedere alla classificazione dei suoli di fondazione secondo i criteri definiti al punto 3.2.2 delle NTC18 che, a tal fine, individua come parametro di riferimento la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ (in m/s) e viene calcolato mediante l'espressione:

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

nella quale:

- h_i = spessore dello strato i -esimo (espresso in m);
- $V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio dell' i -esimo strato (espressa in m/s);
- 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.

Si precisa che per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$ ottenuto ponendo $H = 30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità. Al riguardo si sottolinea

che, dai dati bibliografici disponibili, emerge che il materasso alluvionale che caratterizza il settore su cui insiste l'area in esame presenta uno spessore superiore ai 30 m, pertanto la $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$.

Per quanto concerne l'area oggetto del presente studio, la classificazione dei suoli è stata effettuata a partire dai risultati del profilo sismico SWM cui si è fatto riferimento nel capitolo 6. In particolare, alla luce dei risultati dell'indagine geofisica condotta, dalla quale è stato ricavato un valore di $V_{S,30}$ pari a **560 m/s**, i depositi indagati sono stati assegnati alla categoria B dei suoli di fondazione di cui alla tabella 3.2.11 delle NTC18 (*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 fra 360 m/s e 800 m/s).

Si sottolinea che il quadro proposto è confermato dai risultati delle altre indagini geofisiche eseguite nell'area del capoluogo comunale di Bricherasio. A questo proposito si sottolinea che tali indagini sono state condotte entro lotti contraddistinti da un assetto geologico confrontabile, in termini di caratteristiche litostratigrafiche e di età dei depositi, a quello dell'area oggetto della presente relazione.

In particolare sono stati presi in esame i risultati della prova "down-hole" a cui si è fatto riferimento nel capitolo 4 (identificata nel presente studio con la sigla G1), quelli del profilo sismico a rifrazione in onde SH associato a tale prova (indagine G2), nonché quelli del profilo MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) eseguito, nell'ambito dello Studio di microzonazione sismica a supporto del P.R.G.C.⁽⁸⁾, nell'area degli impianti sportivi comunali (indagine G3). L'esatta localizzazione delle tre indagini di riferimento è indicata nella planimetria di inquadramento geologico riportata nell'Allegato 2.

In sintesi, questi sono i risultati delle indagini sopra richiamate: dalla prova "down-hole" G1 è stato ottenuto un valore di $V_{S,30}$ pari a **665 m/s**, la sezione sismica G2 ha fornito valori di $V_{S,30}$ compresi fra **620 m/s** e **645 m/s** e, infine, dal profilo MASW G3 è stato ricavato un valore di $V_{S,30}$ pari a **470 m/s**. Per maggiori ragguagli in merito alle indagini geofisiche prese in esame si rimanda al fascicolo riportato nell'Allegato 3.

⁸ A cura del Dott. Geol. Eugenio ZANELLA (maggio 2015).

Per quanto concerne le problematiche relative alla pericolosità sismica locale, si possono escludere eventuali fenomeni di liquefazione dinamica di sabbie sotto falda. In particolare, facendo riferimento a quanto indicato al punto 7.11.3.4.2 del D.M. 17/01/2018, la verifica a liquefazione dei terreni di fondazione può essere omessa in ragione delle caratteristiche granulometriche degli stessi. Al riguardo, alla luce del quadro litostratigrafico delineato nel presente studio, è ragionevole ritenere che i depositi presenti nell'area oggetto d'indagine siano caratterizzati da una distribuzione granulometrica esterna alle zone critiche indicate nelle Figure 7.11.1(a) e 7.11.1(b) di cui al punto 7.11.3.4.2 del succitato decreto.

In merito all'individuazione degli elementi topografici che concorrono nella valutazione dell'accelerazione di picco attesa al suolo durante un evento sismico, si rammenta che i coefficienti di amplificazione topografici sono maggiori all'unità per gli elementi topografici che possono essere considerati bidimensionali (creste/dorsali allungate) con sviluppo altimetrico superiore ai 30 m ed inclinazione superiore ai 15° sessagesimali.

8. PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA

La parametrizzazione dei depositi grossolani (essenzialmente ghiaie eterometriche alterate in matrice limosa) entro i quali è stato ricavato il piano di fondazione dell'edificio oggetto d'intervento è stata effettuata a partire dai risultati delle indagini geognostiche illustrate nel capitolo 4, con particolare riferimento agli esiti delle prove SPT eseguite lungo la verticale del sondaggio a carotaggio continuo S1.

Più precisamente, è stato utilizzato il valore inferiore dei risultati delle prove SPT eseguite entro i depositi grossolani sopra richiamati ($N_{SPT} = 55$), sulla base del quale si è proceduto alla determinazione dell'angolo di attrito interno di picco (ϕ_{picco}) mediante i seguenti metodi di correlazione: PECK-HANSON & THORNBURN, JAPANESE NATIONAL RAILWAY, SOWERS e ROAD BRIDGE SPECIFICATION.

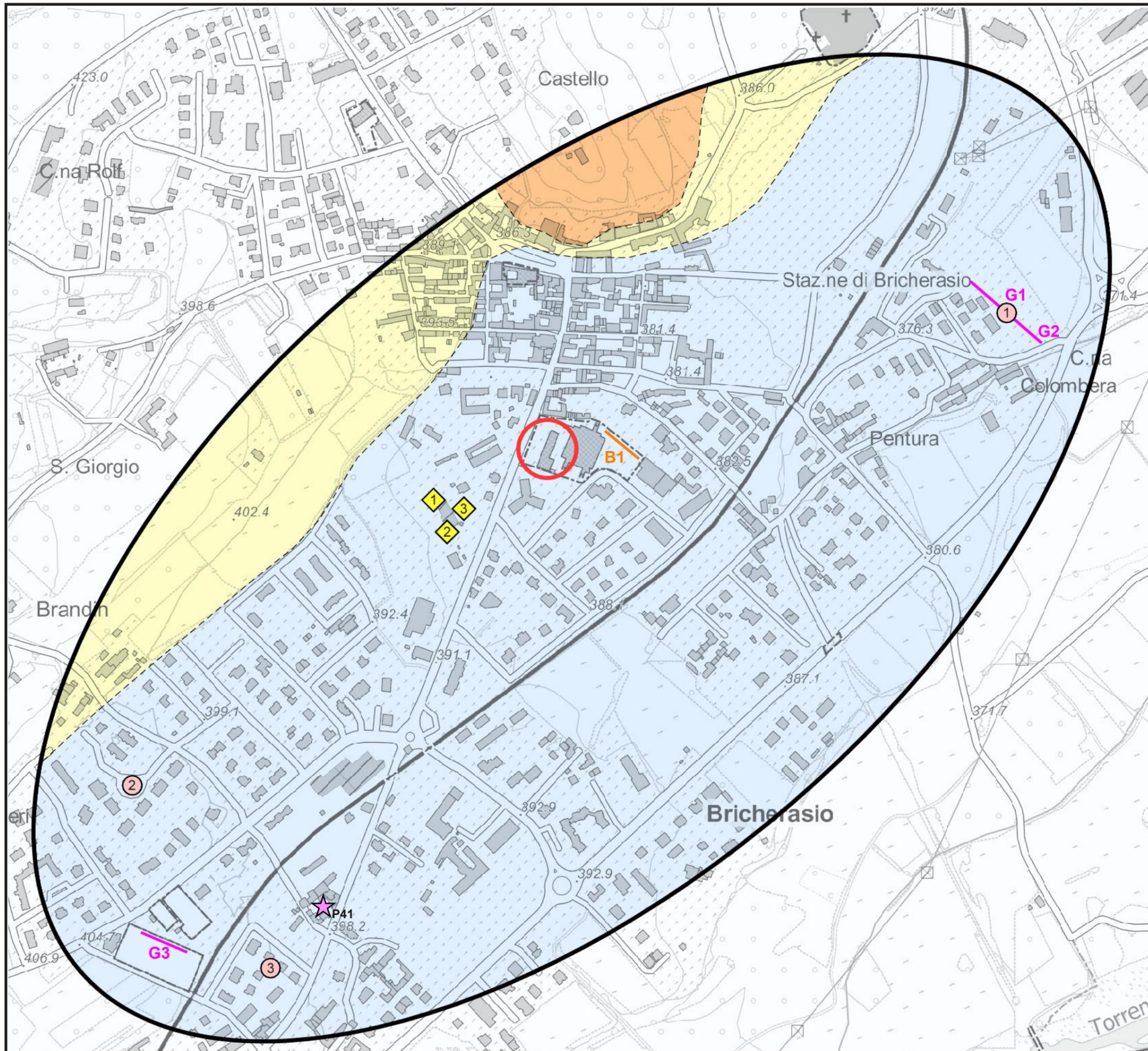
Secondo quanto proposto da BOLTON (1986), il valore medio dei risultati ricavati con i suddetti metodi di calcolo (pari a 43°) è stato quindi corretto in funzione del valore della densità relativa D_r (indicativamente pari a 90%), ottenendo l'angolo di attrito residuo in condizioni assialsimmetriche (ϕ'_{as}).

Si segnala infine che, visto il carattere eterogranulare incoerente dei depositi considerati, non si è tenuto conto del contributo alla resistenza al taglio fornito dalle forze di coesione, adottando un modello geotecnico controllato dalle tensioni efficaci. In sintesi i principali parametri geotecnici attribuiti ai terreni di fondazione, che devono essere riferiti ai depositi in condizioni indisturbate, sono i seguenti:

- γ_n (peso volumico) = 19,0 kN/m³ (\approx 1,90 t/m³);
- φ'_{as} (angolo di attrito interno) = 33°;
- c (coesione) = 0,0 kN/m².

ALLEGATI

- **Allegato 1 - Localizzazione geografica dell'area oggetto d'indagine**
- **Allegato 2 - Inquadramento geologico**
- **Allegato 3 - Indagini geognostiche di riferimento**
- **Allegato 4 - Indagini geofisiche: relazione illustrativa**



Allegato 2
Inquadramento geologico
Scala 1:5.000

LEGENDA

 Area oggetto d'indagine

DEPOSITI QUATERNARI

 Depositi alluvionali medio-antichi (Pleistocene inferiore-medio).

 Depositi alluvionali antichi (Pleistocene inferiore).

SUBSTRATO PREQUATERNARIO

 Micasisti e gneiss minuti del basamento polimetamorfo Dora-Maira ("inselberg" del Castello di Bricherasio).

SIMBOLI

 Tomografia sismica in onde P e profilo sismico per onde superficiali (SWM) a cura di GAMUT S.r.l. (16 settembre 2013).

 Sondaggi geognostici di riferimento.

 Pozzetti esplorativi di riferimento.

 Indagini geofisiche di riferimento (G1: prova "down-hole" in S1; G2: profilo sismico in onde S; G3: profilo MASW).

 Pozzo rete monitoraggio falda.

Allegato 3

Dati geognostici di riferimento

Sondaggi a carotaggio continuo (S1 - S3)
Pozzetti esplorativi (PE1 - PE3)
Indagini geofisiche (G1 – G3)

Sondaggio a carotaggio continuo S1 (1/2)

	Committente	Giorgia s.a.s.	SONDAGGIO	FOGLIO
	Cantiere	Area Tn del PRGC	S1	1/2
	Località	Bricherasio (TO)	Quota (p.c.)	
	Data Inizio	17/01/11		

Profondità	Potenza	Scala 1:100	Stratigrafia	Descrizione	Falda	Perforazione	Rivestimento	% Carotaggio	RQD	Piezometro	Inclinometro	Prove S.P.T.	Campioni
0.40	0.40			Terreno vegetale ed agrario limoso argilloso; colore bruno rossiccio.									
	1.70	1		Limo e limo argilloso; colore rossiccio.								1.50	
	2.10	2				131						2-3-3 p.a.	
	2.00	3		Ghiaia eterometrica, intensamente alterata ed argillificata, con frequenti ciottoli e piccoli trovanti (diam. max 18-20 cm), poco o nulla alterati, in matrice limosa e limoso argillosa; colore bruno rossiccio.								3.00	2.80
	4.10	4										20-27-31 p.a.	3.00
	4.00	5		Ghiaia eterometrica, estremamente alterata ed argillificata, con sporadici piccoli ciottoli (diam. max 10-12 cm) debolmente alterati; colore rossiccio.								4.50	
		6										38-R p.c.	
		7										6.00	
		8					127	90				11-38-31 p.c.	
	8.10	9		Limo sabbioso con sporadica ghiaia; colore bruno chiaro.								7.50	
	1.10	10										17-25-30 p.c.	
	9.20	11		Ghiaia eterometrica, alterata ed argillificata, con rari ciottoli di pietre verdi (diam. max 10-15 cm), poco o nulla alterati, in matrice sabbioso limosa, limosa e, a tratti, limoso argillosa; colore variabile da bruno grigio verdognolo a bruno rossiccio.	9.00							9.00	8.50
		12										20-27-30 p.c.	8.70
		13				101							
		14										12.00	
	11.60	15										28-R p.c.	
												15.00	
												35-R p.c.	

Sondaggio a carotaggio continuo S1 (2/2)

	Committente	Giorgia s.a.s.		SONDAGGIO	FOGLIO
	Cantiere	Area Tn del PRGC		S1	2/2
	Località	Bricherasio (TO)		Quota (p.c.)	
	Data Inizio	17/01/11	Data Fine		

Profondità'	Potenza	Scala 1:100	Stratigrafia	Descrizione	Falda	Perforazione	Rivestimento	% Carotaggio	RQD	Piezometro	Inclinometro	Prove S.P.T.	Campioni
												15.00	
				Ghiaia eterometrica, alterata ed argillificata, con rari ciottoli di pietre verdi (diam. max 10-15 cm), poco o nulla alterati, in matrice sabbioso limosa, limosa e, a tratti, limoso argillosa; colore variabile da bruno grigio verdognolo a bruno rossiccio.								35-R p.c.	
	11.60						127					18.00	
												20-32-R p.c.	
20.80				Limo e limo argilloso, plastico, con modesta presenza di ghiaia fine alterata; colore bruno chiaro.								21.00	
	1.20											28-35-R p.c.	
22.00				Ghiaia, alterata ed argillificata, con ciottoli di pietre verdi in matrice limosa, limoso sabbiosa e limoso argillosa, a tratti abbondante; colore da bruno chiaro a bruno rossiccio.		101		90					
	8.00												
30.00													

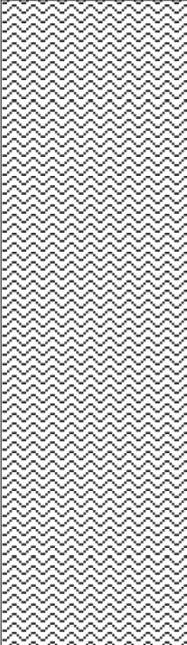
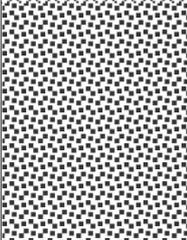
Installata tubazione in PVC diam. 3" per prova geofisica tipo Down Hole.

Sondaggio a carotaggio continuo S3

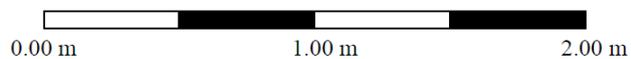
GENTECO S.p.A. di Dott. Geol. S. Brecko Via Saffi 9/bis 10138 Torino Tel./Fax 011 4471245	Committente: Fassetta – Callero - Pone	Redatto:	S 1
	Località: Bricherasio – Area "RMC"	Geom. Emanuela Davi	
	Cantiere: Bricherasio – Area "RMC"		
	Sondaggio: "S1" – 15.00 m	Verificato:	
	Data: Novembre 2003	Dott. Geol. Sergio Brecko	
	Livello acqua: 7.20 m		

PROFONDITA' STRATI(m)	SPESSORE (cm)	STRATIGRAFIA	DESCRIZIONE	RIVESTIMENTO	PERFORAZIONE	CAROTIERE	SPT	
1.00	100		Vegetale sabbioso brunoastro	diametro 152 mm	CAROTAGGIO CONTINUO	diametro 101 mm		
2.00	100		Sabbia limosa con ghiaia grossa e ciottoli (6 cm)					
	500		Ghiaia di diversa pezzatura con vari ciottoli anche alterati (5-8 cm), sabbia grig/astria					-2.00 17/32R
7.00	300		Ghiaia medio-grossa con ciottoli 5-8 cm, sabbia medio-grossa					-6.00 31/R
10.00	500		Ciottoli (anche alterati) 5-10 cm, ghiaia con sabbia con abbondante matrice sabbio-limosa brunoastro, ghiaietto					-10.00 22/35R
15.00								

Pozzetto esplorativo PE1

Profondità dal p.c.	Potenza del livello	Profondità della falda	Sezione stratigrafica	Descrizione litologica
0.00 m				
0.20 m	0.20 m			Terreno agrario limoso-argilloso di colore bruno
2.60 m	2.40 m			Limo sabbioso-argilloso di colore ocreo. Deposito mediamente addensato. Grado d'alterazione medio.
3.50 m	0,90 m			Ciottoli e ghiaie "clast supported" in matrice sabbioso-limosa, di colore bruno-ocreo. Deposito ben addensato. \varnothing_{med} clasti = 5 - 10 cm \varnothing_{max} clasti = 50 cm

Scala verticale 1:25



Osservazioni:

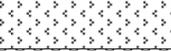
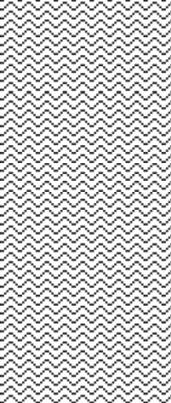
Falda: assente

Metodo di scavo: escavatore meccanico a benna rovescia

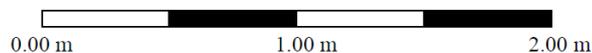
Data: 18 ottobre 2005

Terreni distinti a catasto: Foglio 32 - Particella n. 42

Pozzetto esplorativo PE2

Profondità dal p.c.	Potenza del livello	Profondità della falda	Sezione stratigrafica	Descrizione litologica
0.00 m				
0.20 m	0.20 m			Terreno agrario limoso-argilloso di colore bruno
1.80 m	1.60 m			Limo sabbioso-argilloso di colore ocraceo. Deposito mediamente addensato. Grado d'alterazione medio.
3.60 m	1,80 m			Ciottoli e ghiaie "clast supported" in matrice sabbioso-limosa, di colore bruno-ocraceo. Deposito ben addensato. \varnothing_{med} clasti = 10 - 15 cm \varnothing_{max} clasti = 50 cm Litologia prevalente dei clasti: gneiss, micascisti, pietre verdi, quarziti. Locali fenomeni di alterazione a carico dei clasti, con particolare riguardo a quelli di natura gneissica.

Scala verticale 1:25



Osservazioni:

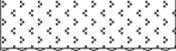
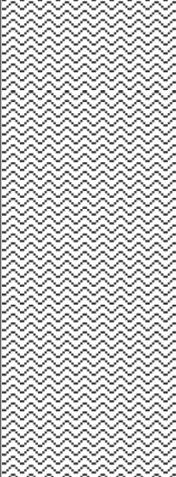
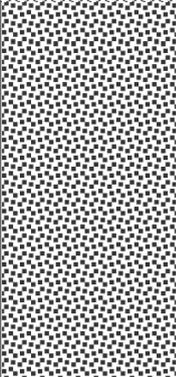
Falda: assente

Metodo di scavo: escavatore meccanico a benna rovescia

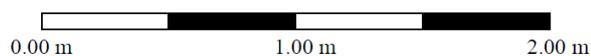
Data: 18 ottobre 2005

Terreni distinti a catasto: Foglio 32 - Particella n. 42

Pozzetto esplorativo PE3

Profondità dal p.c.	Potenza del livello	Profondità della falda	Sezione stratigrafica	Descrizione litologica
0.00 m				
0.20 m	0.20 m			Terreno agrario limoso-argilloso di colore bruno
2.10 m	1.90 m			Limo sabbioso-argilloso di colore ocraceo. Deposito mediamente addensato. Grado d'alterazione medio.
3.60 m	1,50 m			Ciottoli e ghiaie "clast supported" in matrice sabbioso-limosa, di colore bruno-ocraceo. Deposito ben addensato. \varnothing_{med} clasti = 10 cm \varnothing_{max} clasti = 50 cm Litologia prevalente dei clasti: gneiss, micascisti, pietre verdi, quarziti. Locali fenomeni di alterazione a carico dei clasti, con particolare riguardo a quelli di natura gneissica.

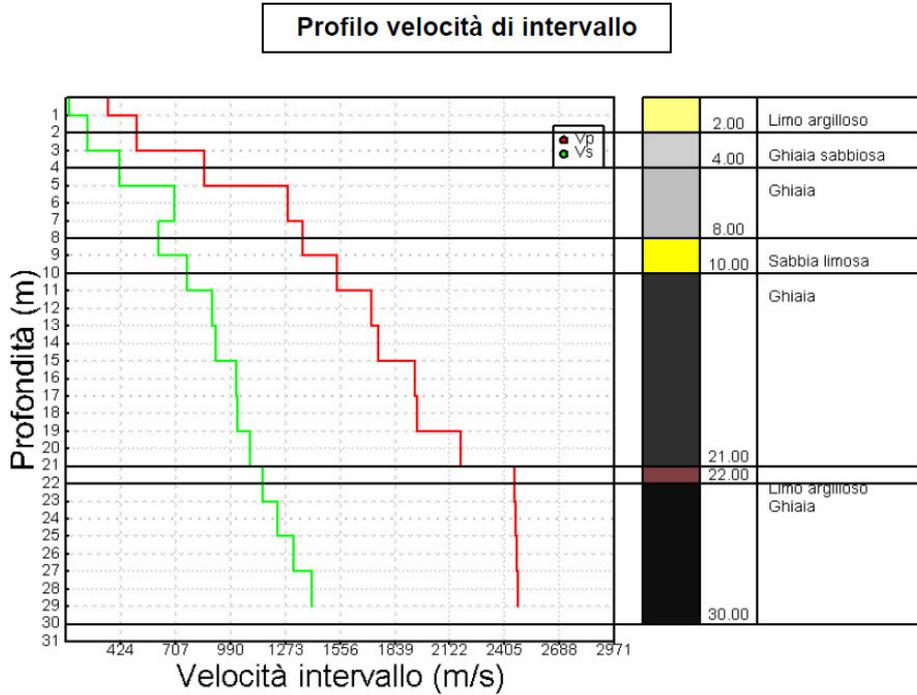
Scala verticale 1:25



Osservazioni:

Falda: assente
 Metodo di scavo: escavatore meccanico a benna rovescia
 Data: 18 ottobre 2005
 Terreni distinti a catasto: Foglio 32 - Particella n. 42

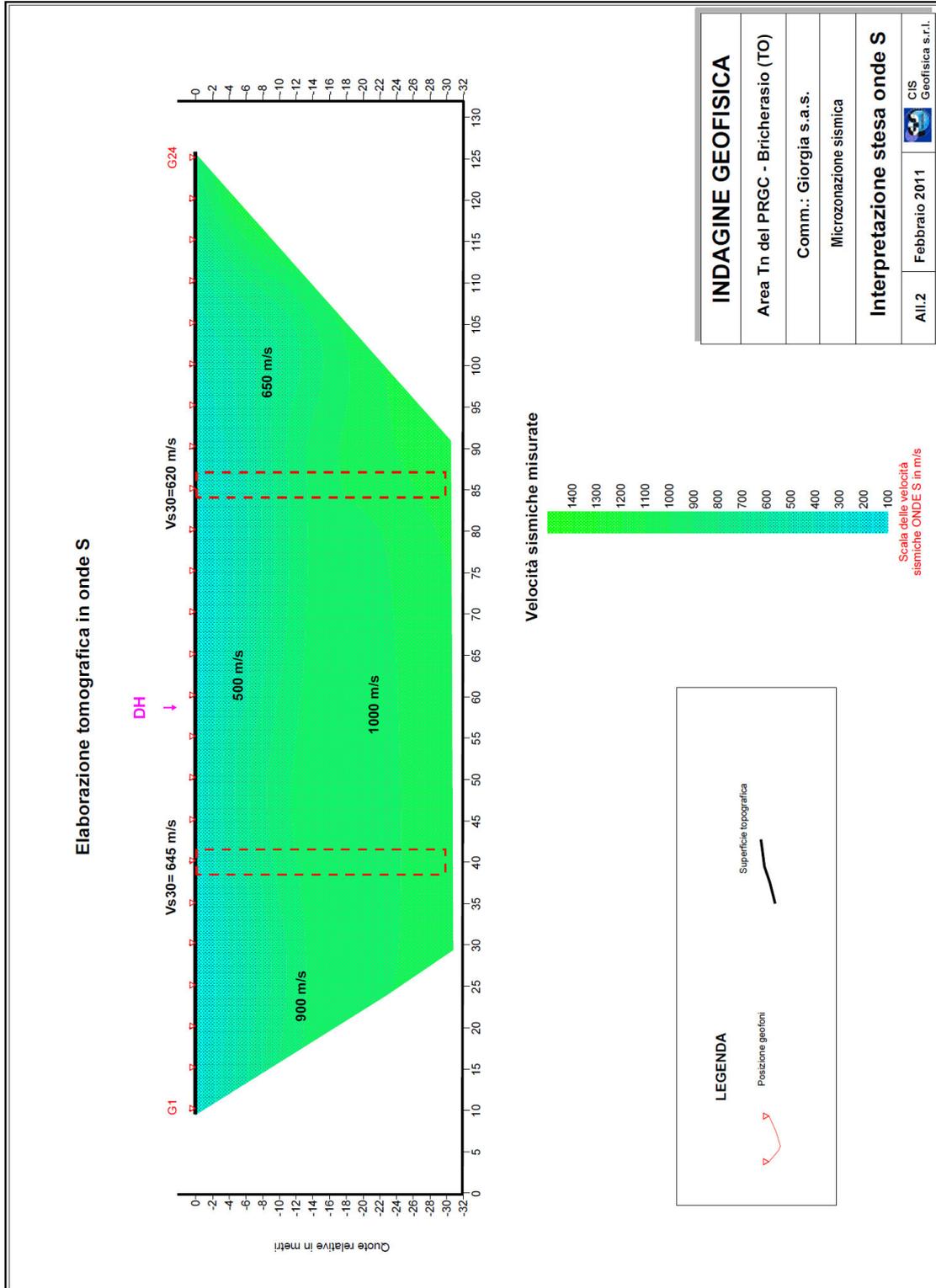
Indagine geofisica G1 (prova "down-hole" nel sondaggio S1)



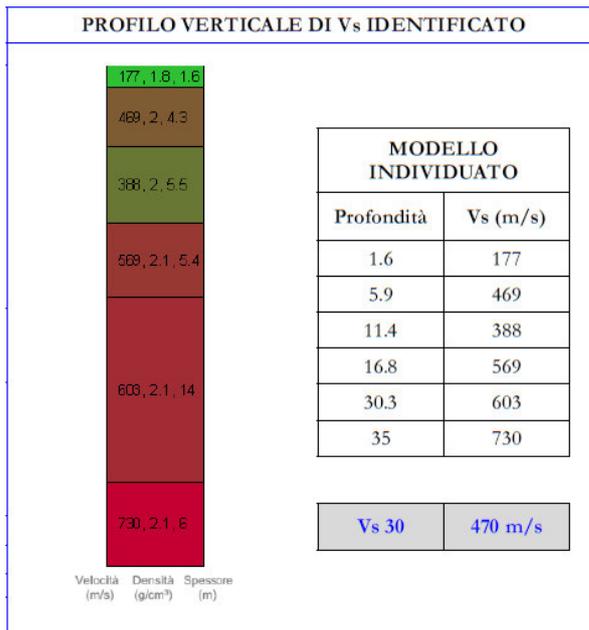
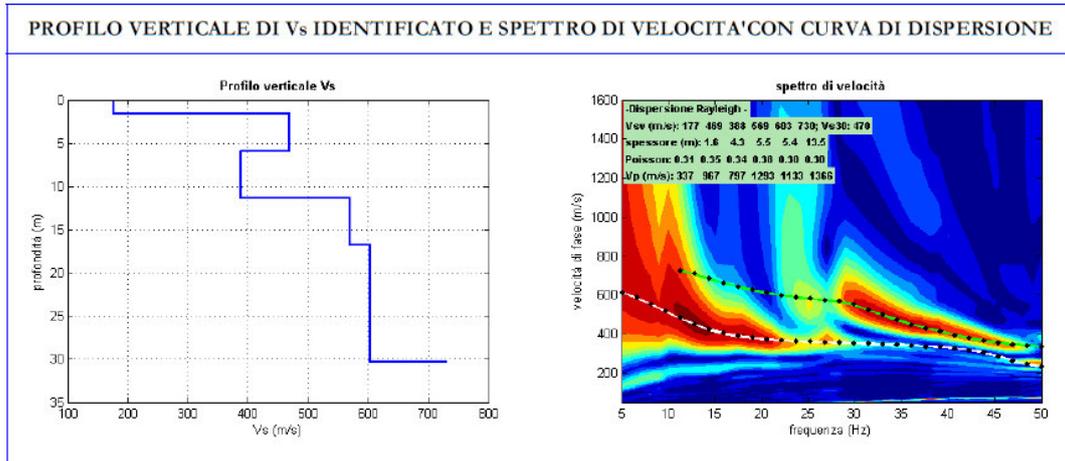
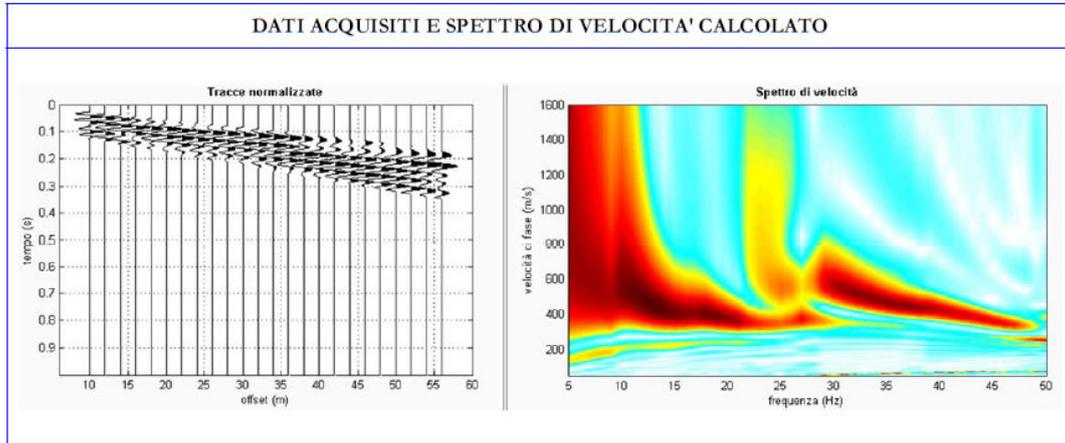
Vp medio (m/s)	Vs medio (m/s)	g medio (kN/mc)	ni medio	G medio (MPa)	Ed medio (MPa)	E medio (MPa)	Ev medio (MPa)
419.29	193.61	19.26	0.36	73.62	345.29	200.92	247.12
634.92	314.96	21.02	0.34	212.68	864.27	568.62	580.7
1156.07	580.55	22.29	0.33	766.07	3037.76	2039.87	2016.34
1449.28	684.93	23.17	0.36	1108.59	4963.37	3006.94	3485.26
1854.97	958.19	23.39	0.32	2189.87	8207.17	5772.66	5287.34
2439.02	1149.43	24.01	0.36	3234.75	14565.05	8780.75	10252.04
2826.86	1476.01	24.86	0.31	5523.39	20259.64	14499.92	12895.12

All'interno del foro di sondaggio le misure Down Hole hanno consentito di ottenere un parametro di Vs30 del valore di 665 m/sec.

Indagine geofisica G2 (profilo sismico in onde S)



Indagine geofisica G3 (profilo sismico MASW)



Regione Piemonte
Provincia di Torino
Comune di Bricherasio

Dott. Geol. Eugenio Zanella.

Indagini e studi di microzonazione sismica con grado di approfondimento corrispondente al livello 1 degli ICMS

INDAGINE GEOFISICA MASW
(multichannel analysis of surface waves)

MASW2
Loc. Campo Sportivo

	Tavola M-02
	Data: 22/04/2015 Operatore: geol. M. Lavezzo

Allegato 4

Indagini geofisiche: relazione illustrativa



CARATTERIZZAZIONE SISMICA DI SITO

COMUNE DI BRICHERASIO (TO)

SCUOLA MEDIA "A. CAFFARO"

Via Vittorio Emanuele 81

RELAZIONE TECNICA

Committente: Comune di Bricherasio

Relazione n.:	RS13035
Data stesura:	18/09/2013
Revisione n.:	0
Elaborazioni:	ing. Stefano Stocco
Stesura:	ing. Stefano Stocco

GAMUT S.r.l. CF e IVA: 10087030010
REA: TO1104410 - Capitale Sociale: € 10000 i.v.
Sede legale: corso Re Umberto 56, 10128 Torino
Sede operativa: via Maiole 15, 10040 Leini
www.gamutgeophysics.com - info@gamutgeophysics.com
tel: +39 011 9987452 - fax: +39 011 7432123

INDICE

INDICE.....	2
1 RIASSUNTO.....	3
2 PREMESSA	3
3 OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE	4
4 STRUMENTAZIONE	6
5 INFORMAZIONI A PRIORI.....	8
6 ELABORAZIONE DATI	8
6.1 Tomografia sismica in onde P.....	9
6.2 Prova per onde superficiali.....	11
7 INTERPRETAZIONE GEOFISICA.....	20
8 PARAMETRO VS30.....	21
8.1 Stima del Parametro VS30.....	21
9 TOMOGRAFIA SISMICA – Nota tecnica.....	22
9.1 Introduzione teorica.....	22
9.2 Modalità di acquisizione.....	23
9.3 Elaborazione dei dati tomografici	23
10 PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica.....	24
10.1 Introduzione teorica	24
10.2 Modalità di acquisizione	26
10.3 Elaborazione dati di onde superficiali	27
11 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE.....	28

1 RIASSUNTO

In data 16 settembre 2013 si è eseguita un'indagine geofisica in comune di Bricherasio (TO), finalizzata alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale tramite il calcolo del parametro V_{S30} , ai sensi del D.M. 14/01/2008. A tale scopo sono stati acquisiti due profili sismici coincidenti, uno per onde superficiali (SWM) e uno di tomografia sismica in onde di compressione (P).

L'elaborazione con metodo probabilistico della curva di dispersione ottenuta con la prova per onde superficiali ha fornito un fuso di possibili soluzioni da cui è stata calcolata la distribuzione del parametro V_{S30} ,

L'interpretazione del set di possibili soluzioni, congiuntamente all'analisi di informazioni a priori disponibili, ha permesso l'estrazione di un singolo profilo di velocità delle onde di taglio (S), ritenuto il più rappresentativo, da cui è stato calcolato il parametro V_{S30} .

La tomografia sismica integrativa ha consentito di migliorare la qualità dell'elaborazione del profilo di V_S , fornendo maggiore solidità interpretativa e ottenendo informazioni di carattere stratigrafico lungo lo stendimento.

Il valore del parametro **V_{S30}** calcolato riferito al piano di imposta delle fondazioni (-3 m da piano campagna) è **560 m/s**.

2 PREMESSA

La presente relazione tecnica descrive le modalità operative adottate in fase di acquisizione, le procedure di elaborazione dei dati e l'interpretazione geofisica della caratterizzazione sismica di sito eseguita in Via Vittorio Emanuele n. 81, Bricherasio (TO).

L'indagine è stata eseguita in data 16 settembre 2013.

3 OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE

Gli scopi dell'indagine sono i seguenti:

- Fornire informazioni indirette sulla velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio, secondo un profilo verticale relativo ai primi 30 m di profondità, misurati dal piano di imposta delle fondazioni (-3 m da piano campagna rispetto a dove è stata eseguita la prova). L'indagine è finalizzata alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale, tramite il calcolo del parametro V_{s30} , ai sensi del D.M. 14/01/2008 (capitolo 8).
- Ricostruire la topografia del substrato roccioso, individuare possibili variazioni laterali.

Per soddisfare queste esigenze sono state condotte le seguenti indagini:

- Una prova per onde superficiali (SWM).
- Una tomografia sismica per onde di compressione P, coincidente con il profilo SWM.

Le tabelle seguenti riportano sinteticamente i parametri di acquisizione delle indagini eseguite.

Si rimanda ai capitoli 9 e 10 per gli approfondimenti sulle metodologie utilizzate.

Tabella 1. Schema riassuntivo dell'indagine tomografica.

Identificativo linea	P
Lunghezza stendimento (m)	61.25
Direzione stendimento	NO - SE
Canali (numero)	48
Spaziatura geofoni (m)	1.25
Tempo di campionamento (μ s)	125
Finestra di acquisizione (s)	0.5
Sorgenti (numero)	9

Tabella 2. Schema riassuntivo dell'indagine SWM.

Identificativo linea	SW
Lunghezza stendimento (m)	58.75
Direzione stendimento	NO - SE
Canali (numero)	48
Spaziatura geofoni (m)	1.25
Tempo di campionamento (μ s)	250
Finestra di acquisizione (s)	2

In Figura 1 si mostra l'ubicazione planimetrica dell'indagine eseguita. La figura seguente mostra un'immagine fotografica dello stendimento.



Figura 1 – Ubicazione planimetrica da immagine aerea. In rosso lo stendimento sismico (fuori scala).



Figura 2 – Foto dello stendimento - Ubicazione - Vista da fine linea.

4 STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è la seguente (Figura 3 e Figura 4):

- sismografo Geometrics GEODE costituito da due moduli a 24 canali controllati tramite laptop, per un totale di 48 canali disponibili; l'intervallo di campionamento è selezionabile tra 20 μ s e 16 ms; la durata dell'acquisizione è funzione della frequenza di campionamento con il limite

di 64000 campioni per canale; la dinamica del convertitore analogico/digitale è di 24 bit;

- geofoni verticali SENSOR SM-6/U-B con frequenza propria di 4.5 Hz;
- sorgente impulsiva: mazza da 5 kg su piastra metallica di ripartizione, dotata di trigger elettrico per contatto;

I dati sono stati elaborati e interpretati con:

- software non commerciale GIADA sviluppato in esclusiva da Gamut srl;
- RAYFRACT 3.06 – Intelligent Resources Inc.



Figura 3 – Sismografi Geometrics Geode.



Figura 4 – Geofono verticale SENSOR SM-6/U-B.

5 INFORMAZIONI A PRIORI

Sono disponibili le seguenti informazioni a priori:

- presenza di depositi alluvionali sabbiosi ghiaiosi antichi;
- materiale superficiale di riporto o limoso-argilloso di potenza limitata (0.5 - 1 m).

6 ELABORAZIONE DATI

Nel seguito vengono descritte le modalità di elaborazione e di interpretazione dei dati acquisiti, corredate da alcune valutazioni critiche sulla qualità dei dati e sull'affidabilità dei risultati ottenibili.

6.1 Tomografia sismica in onde P

La prima fase prevede il picking dei tempi di primo arrivo su ogni sismogramma acquisito.

A titolo di esempio, Figura 5 riporta il picking dell'energizzazione (shot) n. 15 della tomografia.

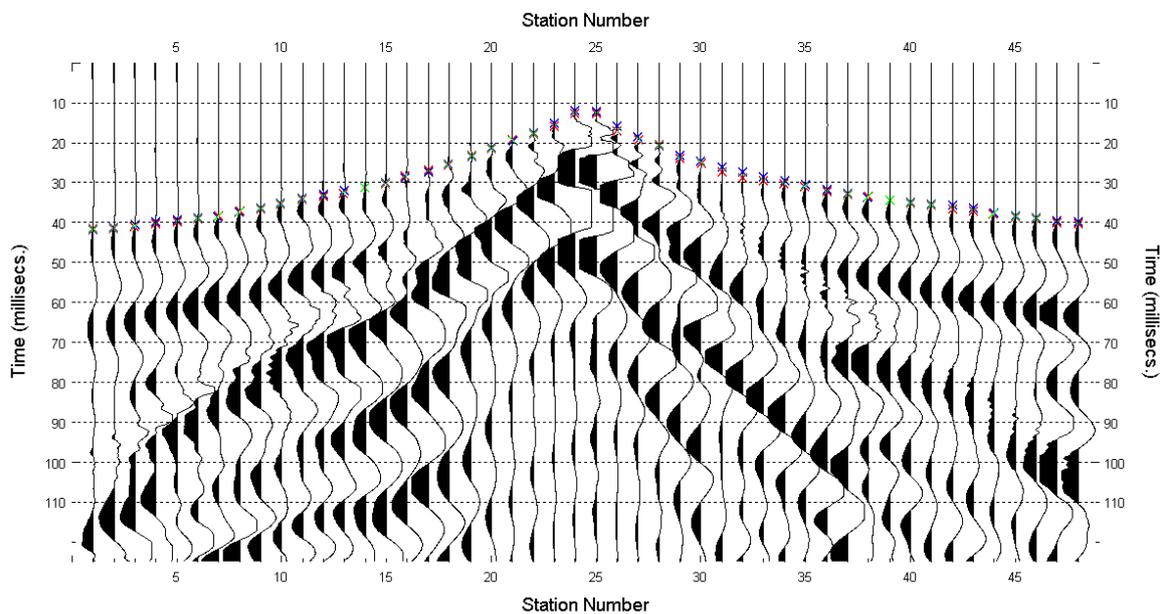


Figura 5 – Esempio di picking manuale dei primi arrivi delle onde P (shot n. 15).

Definita la topografia della superficie, la seconda fase dell'elaborazione prevede l'inversione di tutti i tempi di primo arrivo. Si producono le sezioni di velocità di propagazione delle onde P (Figura 6) e le relative mappe di copertura dei raggi sismici (Figura 7).

Sulle figure sono tracciate le intersezioni tra le tomografie. La numerazione degli shot in superficie coincide con la numerazione dei file registrati in campagna.

Si è scelto di adottare una scala verticale di quota relativa, ponendo lo zero alla quota del piano campagna nel punto in cui si è eseguita la prova.

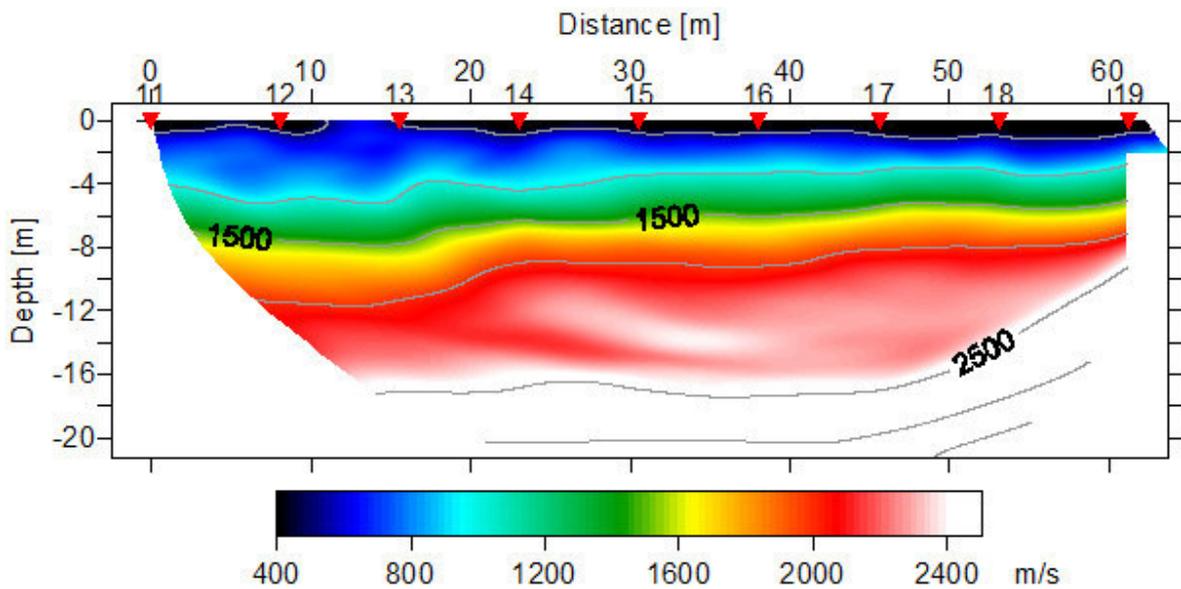


Figura 6 – Sezione tomografica di velocità delle onde P nel sottosuolo.

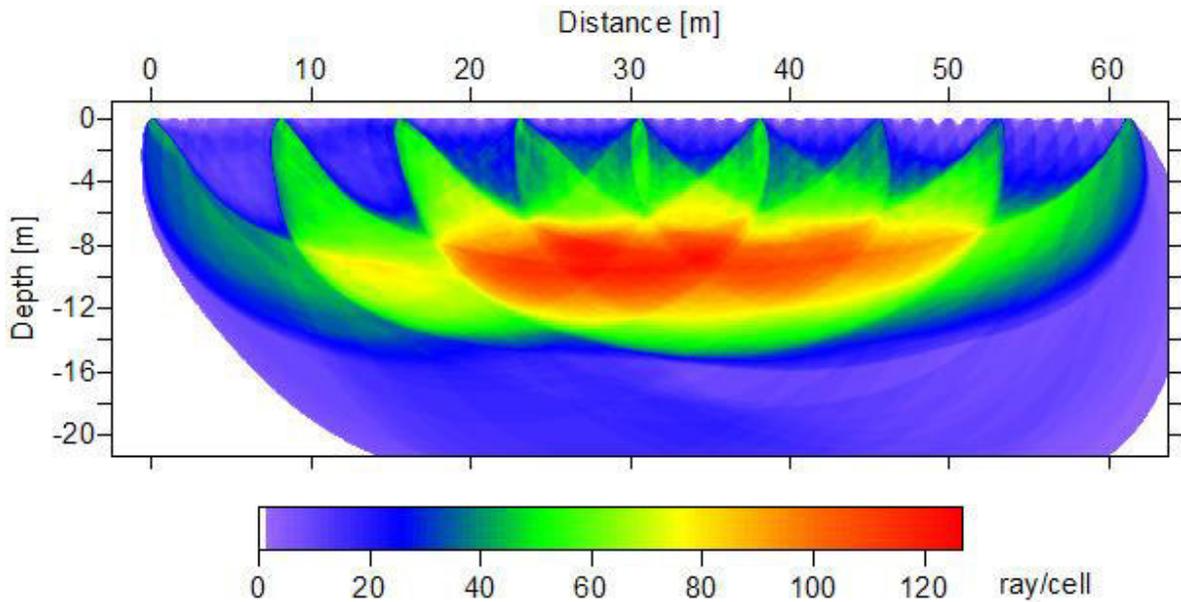
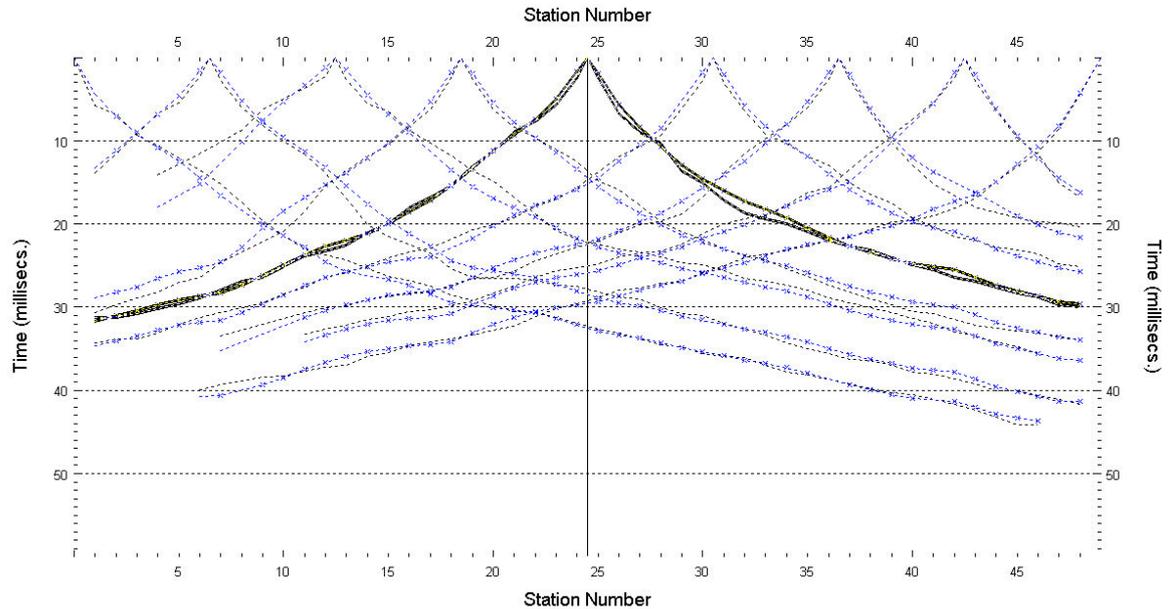


Figura 7 – Copertura dei raggi sismici della sezione tomografica di Figura 6.

La qualità del picking e dell'inversione è valutata mediante il confronto, per ogni shot, tra le dromocrone sperimentali e quelle calcolate.

A titolo di esempio, la Figura 8 riporta le dromocrone della tomografia con la traccia n. 15 in evidenza.



**Figura 8 – Dromocrone della tomografia,
(in evidenza lo shot n. 15)**

6.2 Prova per onde superficiali

Il dataset acquisito è composto da 20 sismogrammi, di cui 10 relativi all'energizzazione sul lato nord-ovest dello stendimento e 10 sul lato sud-est. Ciascuna registrazione contiene 48 tracce con spaziatura di 1.25 m.

La Figura 9 riporta lo stacking del sismogramma relativo all'energizzazione dall'estremo nord-ovest.

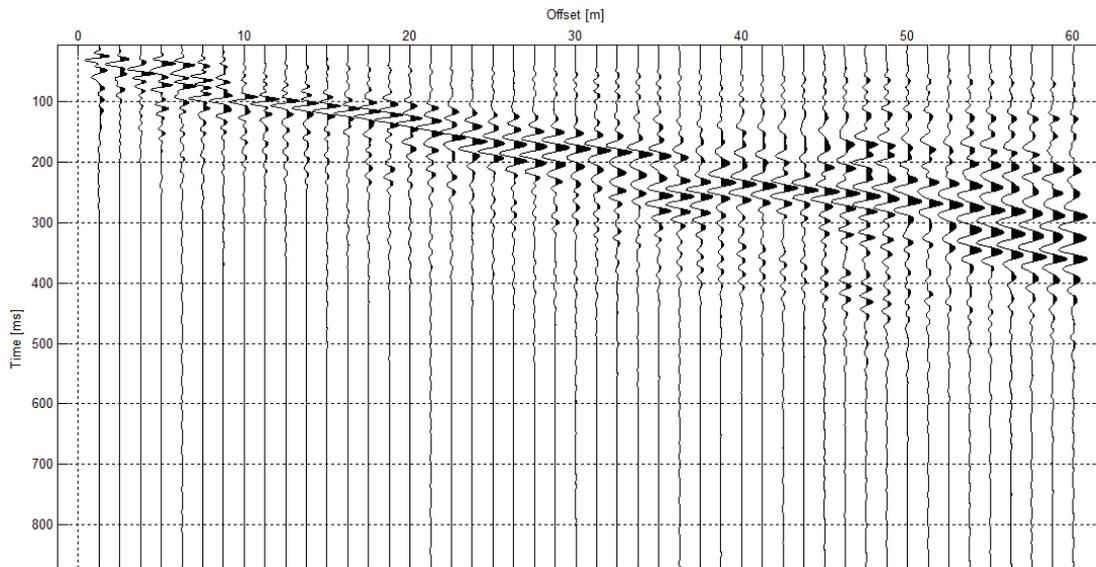


Figura 9 –Selezione del sismogramma della prova SW – Energizzazione lato nord-ovest.

Il dato è trasformato in dominio f-k (Figura 10) e sono estratte e pulite le curve di dispersione (Figura 11).

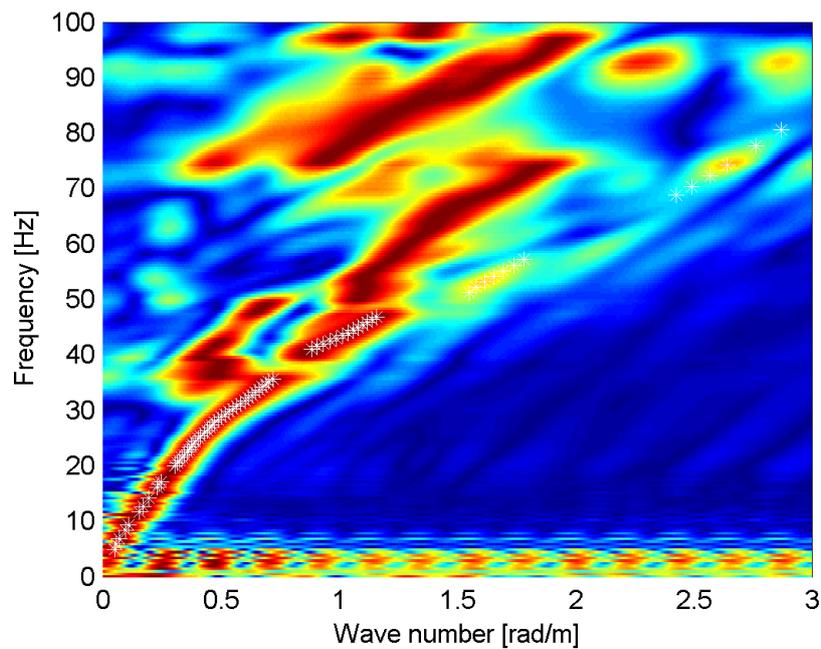


Figura 10 – Spettro f-k del sismogramma di Figura 9.

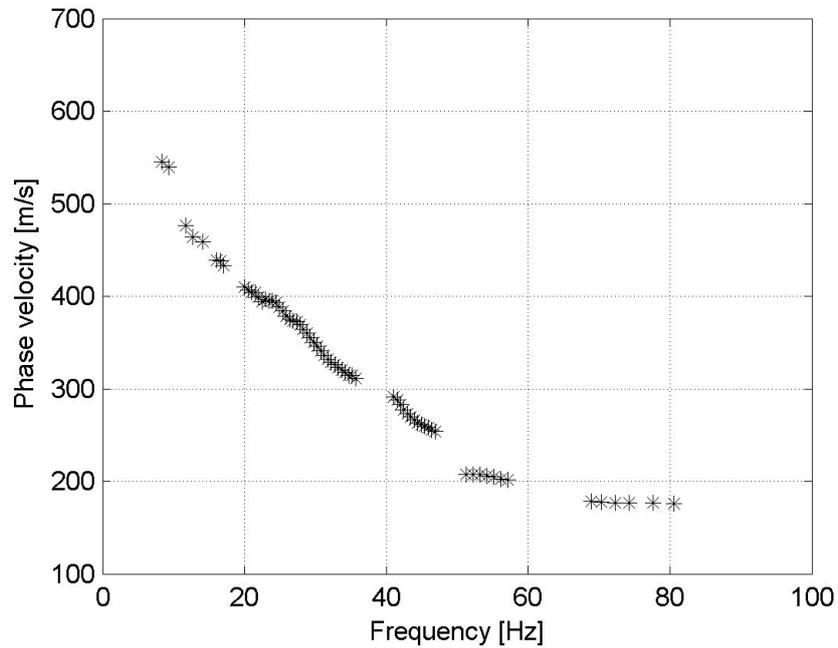


Figura 11 – Curva di dispersione estratta dallo spettro di Figura 10.

Il modo fondamentale delle curve di dispersione può essere mostrato in funzione della lunghezza d'onda λ diviso 2.5 (Figura 12) che dà un'idea qualitativa della profondità indagata e permette una valutazione preliminare sull'affidabilità dei risultati in funzione della profondità. La scala colori rappresenta la velocità di propagazione delle onde S per ogni lunghezza d'onda.

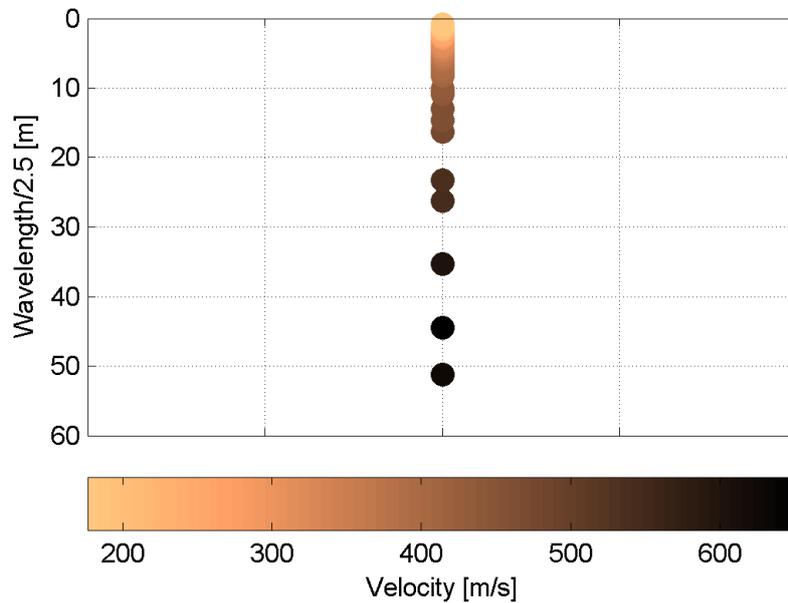


Figura 12 – Modo fondamentale delle curve di dispersione espresso in funzione di $\lambda/2.5$.

Si definisce un intervallo di variabilità dei parametri di modello (spessore degli strati, velocità delle onde di taglio, densità, coefficiente di Poisson), compatibile con la geologia del sito e si producono alcune migliaia di modelli di Vs compatibili con l'intervallo di variabilità dei parametri (Tabella 3)

Tabella 3. Intervallo di variabilità dei parametri di modello.

Numero di profili generati	10000
Numero di strati	4
Densità associata ad ogni strato (kg/dm^3)	1.7 - 1.8 - 1.9 - 2.0
Coefficiente di Poisson	0.3 - 0.3 - 0.45 - 0.45
Vs minima (m/s)	180 - 250 - 400 - 550
Vs massima (m/s)	200 - 400 - 550 - 650
Spessore minimo (m)	1 - 1.5 - 4 - semispazio
Spessore massimo (m)	2 - 3 - 9 - semispazio

Il problema diretto viene risolto per tutti i modelli estratti. Tramite un test statistico, si individuano i soli modelli in cui si minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali e il set di dati calcolati (Figura 13 e Figura 14).

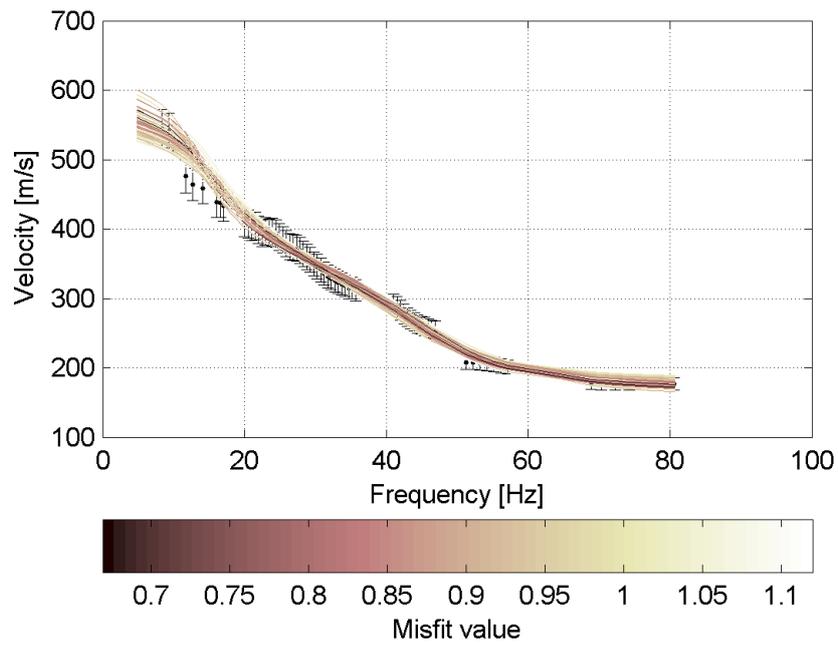


Figura 13 – Curve di dispersione delle possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente.

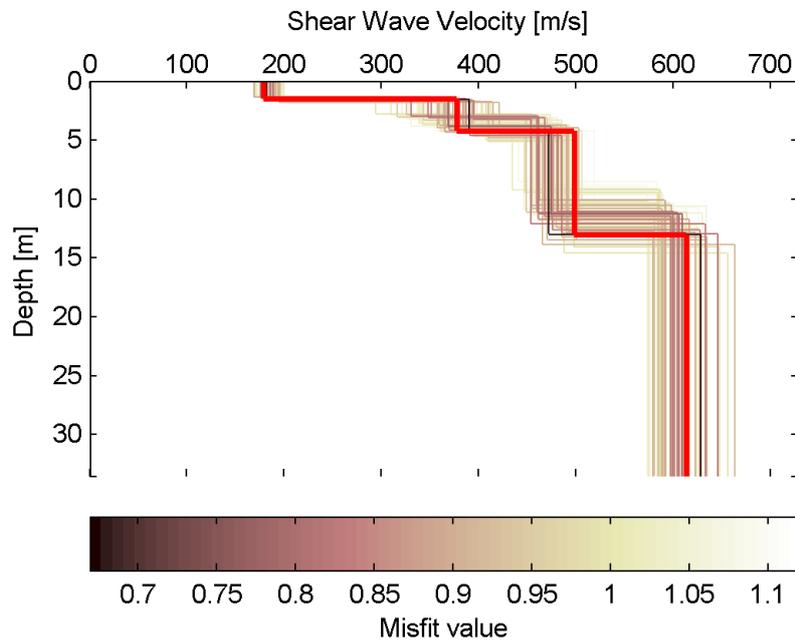


Figura 14 – Set di modelli delle possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente. In evidenza il profilo definitivo.

Per ognuno di questi modelli si calcola il valore di V_{S30} dal piano di imposta delle fondazioni, secondo la formulazione proposta nel D.M. 14/01/2008. Dalla distribuzione di tutti i valori di V_{S30} stimati (Figura 15) è possibile ricavare valore medio (553 m/s) e relativa deviazione standard (9 m/s).

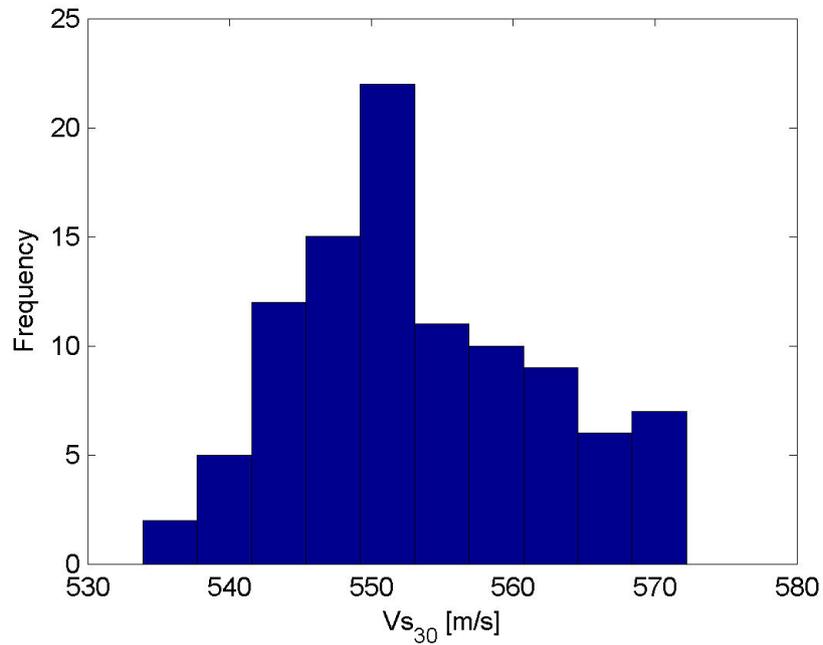


Figura 15 – Curva di distribuzione dei valori di V_{s30} stimati dal piano di imposta delle fondazioni.

Il profilo che meglio approssima la curva sperimentale è illustrato in Figura 16. La profondità di indagine è qualitativa ed è riferita alla quota media del piano campagna.

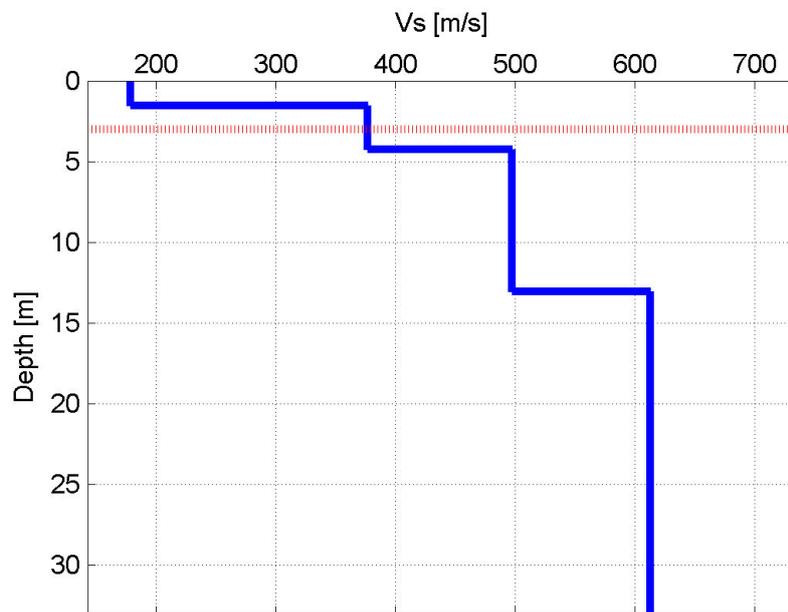


Figura 16 – Profilo stratigrafico di Vs (profondità da piano campagna) con indicazione del piano di imposta delle fondazioni.

In Figura 17 le curve di dispersione relative al profilo scelto di Figura 16 sono sovrapposte agli spettri f-k, mentre in Figura 18 sono sovrapposte alle curve di dispersione sperimentali.

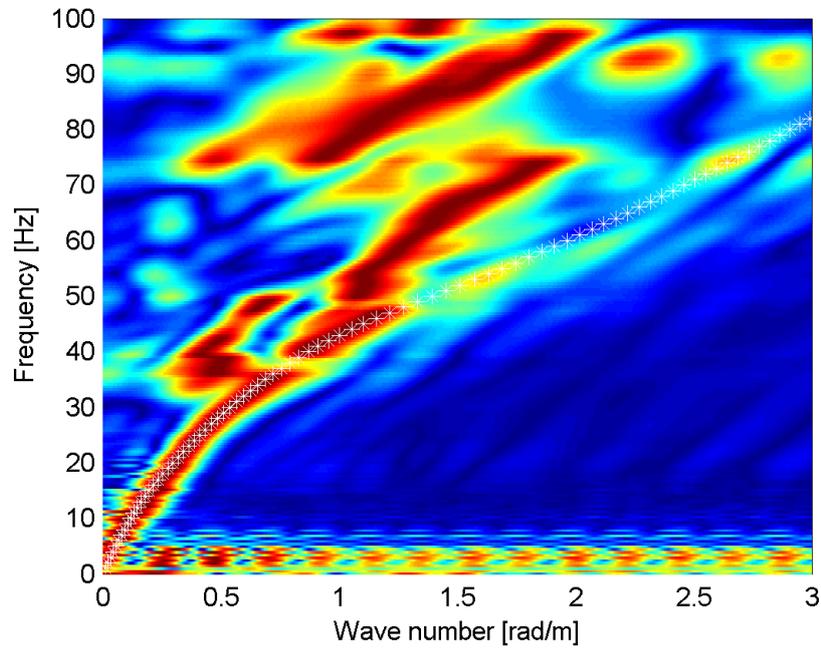


Figura 17 – Spettri f-k normalizzati e fitting delle curve di dispersione.

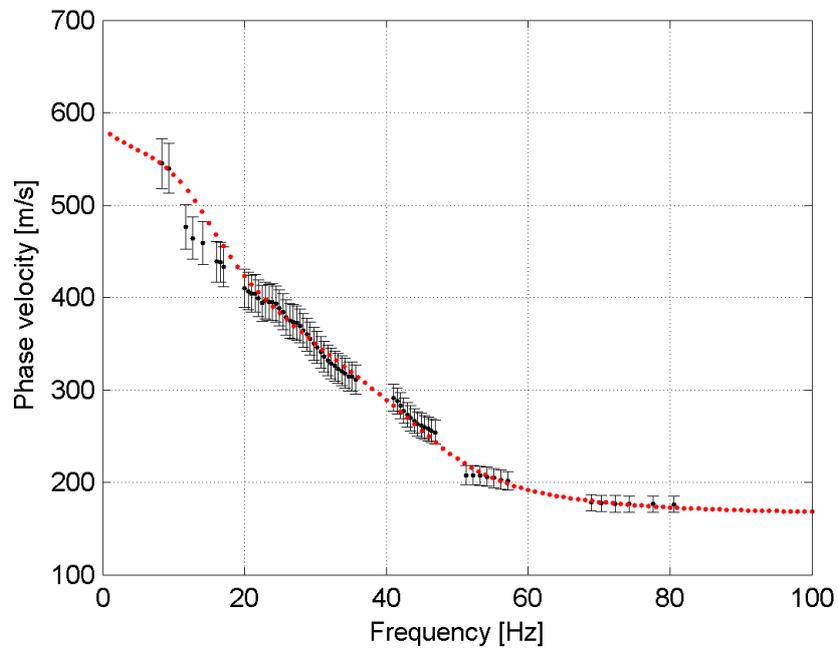


Figura 18 – Curve di dispersione da modello (punti rossi) e curve di dispersione sperimentali con relativa incertezza (barre nere).

I parametri del modello di Figura 16 sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Profilo Vs - Parametri del modello di Figura 16.

Strato (numero)	Velocità (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)
1	179	1.5	0 - 1.5
2	377	2.7	1.5 - 4.2
3	497	8.8	4.2 - 13.0
4	613		da 13.0

Il valore di V_{s30} del modello finale, calcolato alla quota del piano di imposta delle fondazioni (-3 m da piano campagna) è **560** m/s.

7 INTERPRETAZIONE GEOFISICA

L'analisi della tomografia sismica a rifrazione in onde P e della relativa mappa di copertura dei raggi sismici (Figura 6 e Figura 7) permette le seguenti considerazioni:

- Vi è sostanzialmente un gradiente verticale di velocità, tipico di terreni il cui grado di compattazione aumenta con la profondità.
- Si nota una superficie di rifrazione, probabilmente il tetto della zona satura, alla profondità di 6-7 m.

Il profilo di Vs (Figura 16 e Tabella 4) mostra:

- Uno strato superficiale di ridotto spessore riconducibile a materiale di riporto con basse velocità di propagazione delle onde S ($V_s \approx 180$ m/s).
- Un aumento graduale della velocità con la profondità, da valori di circa 380 m/s alla profondità di 1.5 m a valori di circa 610 m/s alla profondità di 13 m.

I risultati sono in accordo con le informazioni a priori disponibili, indicanti depositi alluvionali sabbiosi e ghiaiosi antichi.

8 PARAMETRO VS30

Il D.M. 14/01/2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) disciplina la progettazione e la costruzione di nuovi edifici soggetti ad azioni sismiche, oltre alla valutazione della sicurezza e degli interventi di adeguamento su edifici esistenti soggetti al medesimo tipo di azioni.

La definizione dell'azione sismica a cui gli edifici sono soggetti è legata alla determinazione di alcuni fattori importanti per l'edificio stesso, tra i quali la classificazione del suolo di fondazione su cui l'edificio verrà costruito.

V_{S30} è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}}$$

h_i = spessore (in m);

V_i = velocità delle onde di taglio dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori;

N = numero di strati.

8.1 Stima del Parametro VS30

E' stato dimostrato (Comina et al., 2010) che, data un'adeguata profondità di investigazione, la non unicità della soluzione non costituisce un problema per la stima della V_{S30} . e che il metodo delle onde superficiali fornisce risultati comparabili a quelli ottenuti con metodi invasivi quali down-hole test (DH) o seismic dilatometer test (SDMT).

Per questo motivo, la metodologia proposta non fornisce un unico profilo di V_s , ma un set di possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente.

Per ogni modello si calcola il valore di V_{S30} secondo la formulazione proposta nel D.M. 14/01/2008 e dalla distribuzione dei valori di V_{S30} stimati è possibile ricavare un valore modale che rappresenta il parametro V_{S30} del sito.

9 TOMOGRAFIA SISMICA – Nota tecnica

9.1 Introduzione teorica

La tomografia sismica per onde P è una tecnica che sfrutta la velocità di propagazione delle onde sismiche di compressione, al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali che sono attraversati dal fronte d'onda. Tale metodo di indagine, rispetto ai metodi classici quali la sismica a rifrazione, non schematizza il terreno sottostante a strati con caratteristiche omogenee, ma permette di determinare la velocità di propagazione in funzione della profondità, evidenziando eventuali discontinuità laterali e interfacce non piane tra gli strati a diverse caratteristiche.

L'acquisizione dei dati avviene posizionando uno stendimento di geofoni a spaziatura preferibilmente costante sulla direzione lungo la quale si intende ottenere una sezione con l'andamento delle velocità ed energizzando in un numero generalmente dispari di punti (uno al centro dello stendimento e gli altri distribuiti simmetricamente). Ogni singola acquisizione è sommata alle successive al fine di aumentare il rapporto segnale/rumore.

9.2 Modalità di acquisizione

L'energizzazione in più punti prestabiliti lungo la linea è stata eseguita con mazza da 4 kg su piastra metallica di ripartizione, impiegando un trigger elettrico. In ogni punto di energizzazione i colpi sono ripetuti e il segnale sommato (operazione di stacking) fino a quando l'operatore al sismografo non ritenga che il rapporto segnale/rumore sia accettabile.

9.3 Elaborazione dei dati tomografici

L'elaborazione dei dati prevede l'esecuzione del picking manuale dei primi arrivi delle onde P, il cui risultato è generalmente visualizzato sotto forma di dromocrone (grafici rappresentanti i tempi di primo arrivo in funzione della distanza dalla sorgente).

I tempi di primo arrivo, espressi in millisecondi, insieme alle coordinate spaziali di ogni geofono, sono poi forniti in input al programma di inversione, il quale effettua una prima interpretazione attraverso il metodo classico della sismica a rifrazione e crea un modello di primo tentativo per poter inizializzare il processo di inversione. Il programma procede suddividendo la sezione in celle alle quali assegna un certo valore di velocità delle onde di compressione, dedotto dal modello di primo tentativo creatosi in precedenza. Successivamente viene simulata l'energizzazione in ogni punto di scoppio.

Si suppone che la traiettoria dei raggi sismici dal punto di scoppio al singolo geofono sia curvilinea e che la velocità di propagazione lungo tale traiettoria sia differente a seconda della velocità che è stata assegnata dal programma ad ogni singola cella attraversata dal percorso sismico. Ne risulta che per ogni punto di energizzazione:

$$T_i = \int_S^R \frac{1}{V} ds$$

dove:

T_i = tempo di primo arrivo al geofono i -esimo;

S = punto di energizzazione;

R = ricevitore;

V = velocità di propagazione delle onde di compressione;

ds = tratto infinitesimo di percorso.

I tempi di primo arrivo ricavati dalla simulazione vengono poi confrontati con i tempi di primo arrivo sperimentali e, in base agli scarti, vengono corrette le velocità relative alle celle attraversate dai percorsi sismici. Il processo di inversione è iterativo e si ottiene il risultato finale quando il valore degli scarti è inferiore ad un valore soglia deciso dall'operatore oppure dopo un particolare numero di iterazioni anch'esso deciso dall'operatore.

Il risultato consiste in una sezione verticale con andamento delle velocità delle onde P nel sottosuolo e una sezione con i valori di "copertura" che riporta per ogni cella della sezione stessa il numero di raggi sismici che la attraversano nell'ultima iterazione. La sezione con i valori di copertura è utile alla definizione di affidabilità delle velocità ottenute, poiché alti valori di copertura sottintendono una maggiore accuratezza.

10 PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica

10.1 Introduzione teorica

Il metodo delle onde superficiali attive (anche detto S.W.M. – Surface Wave Method) è un metodo di caratterizzazione sismica basato sull'analisi della dispersione geometrica delle onde superficiali. La procedura consiste nella valutazione delle caratteristiche dispersive del sito a partire dall'acquisizione e il trattamento dei dati sismici e nella loro successiva analisi per determinare le proprietà meccaniche del sottosuolo. La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh in un semispazio elastico, omogeneo e isotropo, è indipendente dalla

frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi a una profondità circa pari a una lunghezza d'onda. La profondità raggiunta dalla perturbazione dipende, quindi, dalla lunghezza d'onda e, in mezzi omogenei, a diverse lunghezze d'onda corrisponde un'unica velocità di fase (V_R). In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito, cioè, da strati aventi proprietà meccaniche differenti, il comportamento delle onde superficiali diventa dispersivo: a frequenze diverse corrispondono differenti velocità di fase. Lunghezze d'onda diverse interessano, infatti, strati diversi ai quali sono associate proprietà meccaniche specifiche: ogni lunghezza d'onda (e quindi ogni frequenza) si propaga a una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche degli strati interessati dalla propagazione.

Nel caso di un mezzo eterogeneo, quindi, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma diverse velocità di fase in corrispondenza delle diverse frequenze: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo, è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse velocità di propagazione, a ognuna delle quali corrisponde un modo di vibrazione del sito. Differenti modi di vibrazione possono manifestarsi simultaneamente.

Da un punto di vista teorico, per quanto riguarda il modo fondamentale, alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante e la velocità di fase tende asintoticamente alla velocità di propagazione delle onde di taglio dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; infatti, è funzione delle caratteristiche di

rigidezza del mezzo e può essere utilizzata per un processo inverso avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidezza stesse.

10.2 Modalità di acquisizione

La fase di acquisizione prevede l'utilizzo di una sorgente, impulsiva o controllata, tramite la quale viene creata una perturbazione che si propaga lungo la superficie libera e viene rilevata da uno o più ricevitori posti lungo dispositivi lineari sul piano campagna. La sorgente è posta a un estremo dello stendimento di misura e di norma si effettuano energizzazioni ai due lati opposti dello stendimento per avere ridondanza di informazione e gestire eventuali disomogeneità del sottosuolo. L'obiettivo è indagare la propagazione delle onde superficiali in una banda di frequenza più ampia possibile, poiché ciò consente di ottenere informazioni sulle proprietà degli strati profondi, che influenzano le componenti a bassa frequenza, e di risolvere con adeguata risoluzione gli strati più superficiali, che influenzano in maniera significativa soprattutto le componenti ad alta frequenza. Questo implica la scelta di corretti parametri di acquisizione (nello spazio e nel tempo) atti a permettere un'adeguata risoluzione spettrale nella fase di elaborazione.

Il campionamento temporale deve garantire che tutto il treno d'onda relativo alla propagazione delle onde superficiali sia registrato, quindi la durata dell'acquisizione (T) deve essere maggiore o uguale al tempo necessario per l'armonica più lenta a raggiungere il sensore più lontano. L'intervallo di campionamento (dt) deve garantire la stima delle armoniche di interesse in base alle regole del campionamento (frequenza di campionamento almeno doppia (meglio pari a cinque volte) della frequenza più alta da registrare).

Il campionamento spaziale deve consentire di stimare in modo affidabile le lunghezze d'onda di interesse. In particolare la lunghezza dello stendimento di misura (L) non deve essere inferiore alla metà della massima lunghezza d'onda e la distanza intergeofonica (dI) deve essere metà della minima lunghezza d'onda.

Inoltre, poiché dal punto di vista fisico le onde di superficie sono sensibili alle proprietà del mezzo in cui si propagano, fino ad una profondità pari a circa 0.4 volte la lunghezza d'onda massima, la lunghezza L deve essere definita anche in funzione della profondità d'indagine desiderata.

10.3 Elaborazione dati di onde superficiali

Obiettivo dell'elaborazione è la stima della curva di dispersione caratteristica del sito, che esprime la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

La procedura può essere sintetizzata nei seguenti punti:

- I dati di campagna vengono trasformati tramite una doppia trasformata di Fourier in dominio f - k (frequenza-numero d'onda). I massimi di energia sono associabili alle onde di Rayleigh (Tselentis and Delis, 1998) e vengono riconosciuti gli eventi coerenti in ampi intervalli di frequenza, discriminando gli eventi associabili ai diversi modi di propagazione.
- Le curve di dispersione sperimentali sono ricavate con un algoritmo di ricerca dei massimi spettrali. Per ogni frequenza f , il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k , da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso la relazione:

$$v_{\text{RF}} = \frac{\omega}{k}$$

- Il modello di sottosuolo viene schematizzato come un mezzo elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati.
- Si definisce uno spazio dei parametri di modello (spessore degli strati, velocità delle onde di taglio, densità, coefficiente di Poisson), compatibile con la geologia del sito.

- Tramite un algoritmo di inversione probabilistica, si producono alcune migliaia di profili di Vs (modelli) compatibili con il range di variabilità dei parametri.
- Il problema diretto viene risolto per tutti i modelli estratti e si individuano i soli modelli in cui si minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata). La procedura è condotta con tecniche di ricerca globale della soluzione (Wathelet et al, 2004; Socco and Boiero, 2008).

11 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- Ryden, N. and Park, C.B., 2006. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra. *Geophysics* 71, R49-R58.
- Socco, L.V., Strobbia, C., 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics* 2, 165-185.
- Socco, L.V., and D. Boiero, 2008, Improved Monte Carlo inversion of surface wave data: *Geophysical Prospecting*, 56, 357-371.
- Tselentis, G.A., and G. Delis, 1998, Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data: *Annali di Geofisica*, 41, 1-15.
- Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger, 2004, Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements: *Near Surface Geophysics*, 2, 211-221.