



COMUNE DI PRATO

COMPLESSO SCOLASTICO DI PAPERINO
PRIMO LOTTO LAVORI – PROGETTO DEFINITIVO

R.U.P.

Ing. PAOLO BARTALINI

Progetto Architettonico

Arch. ANDREA CORSI

Collaboratore

Geom. ELISABETTA SANTI

Oggetto:

**RELAZIONE GEOLOGICA E SULLE CARATTERISTICHE
FISICO-MECCANICHE DEI TERRENI DI FONDAZIONE**

(ai sensi del D.M. 11/03/88: «Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni ...» e della DCR 12/2000 – Titolo VII)

GEODINAMICA

STUDIO GEOLOGICO ASSOCIATO

di Calò J.G., Checcucci R., Scotti A.

GEOLOGIA - GEOTECNICA - IDROGEOLOGIA

GEOLOGIA AMBIENTALE

Via Giolitti n°34, 50136 FIRENZE - tel. 055/6505157 fax. 055/6506433
e-mail: geodinamica@katamail.com

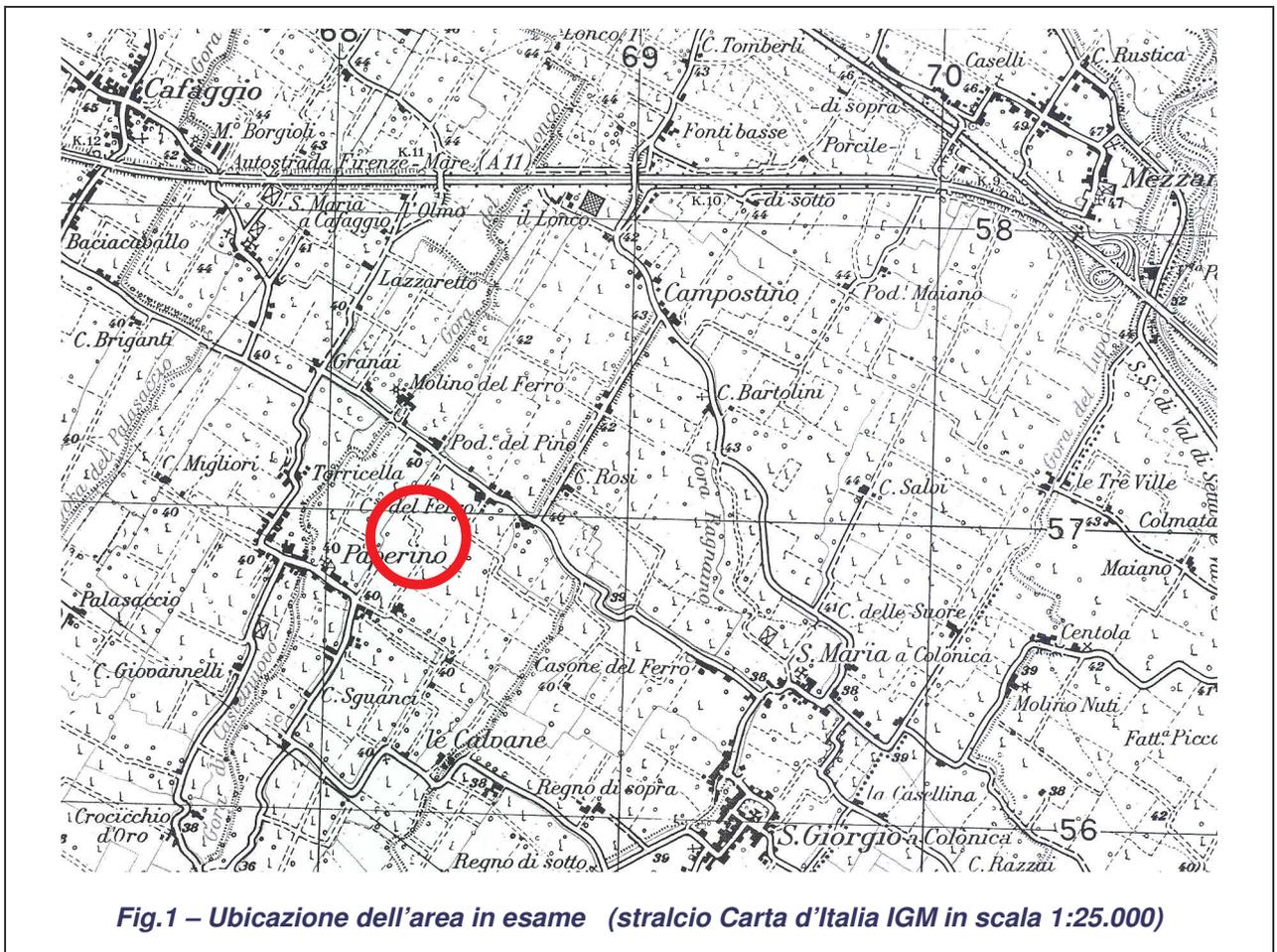
data:

dicembre 2006

1 - PREMESSA

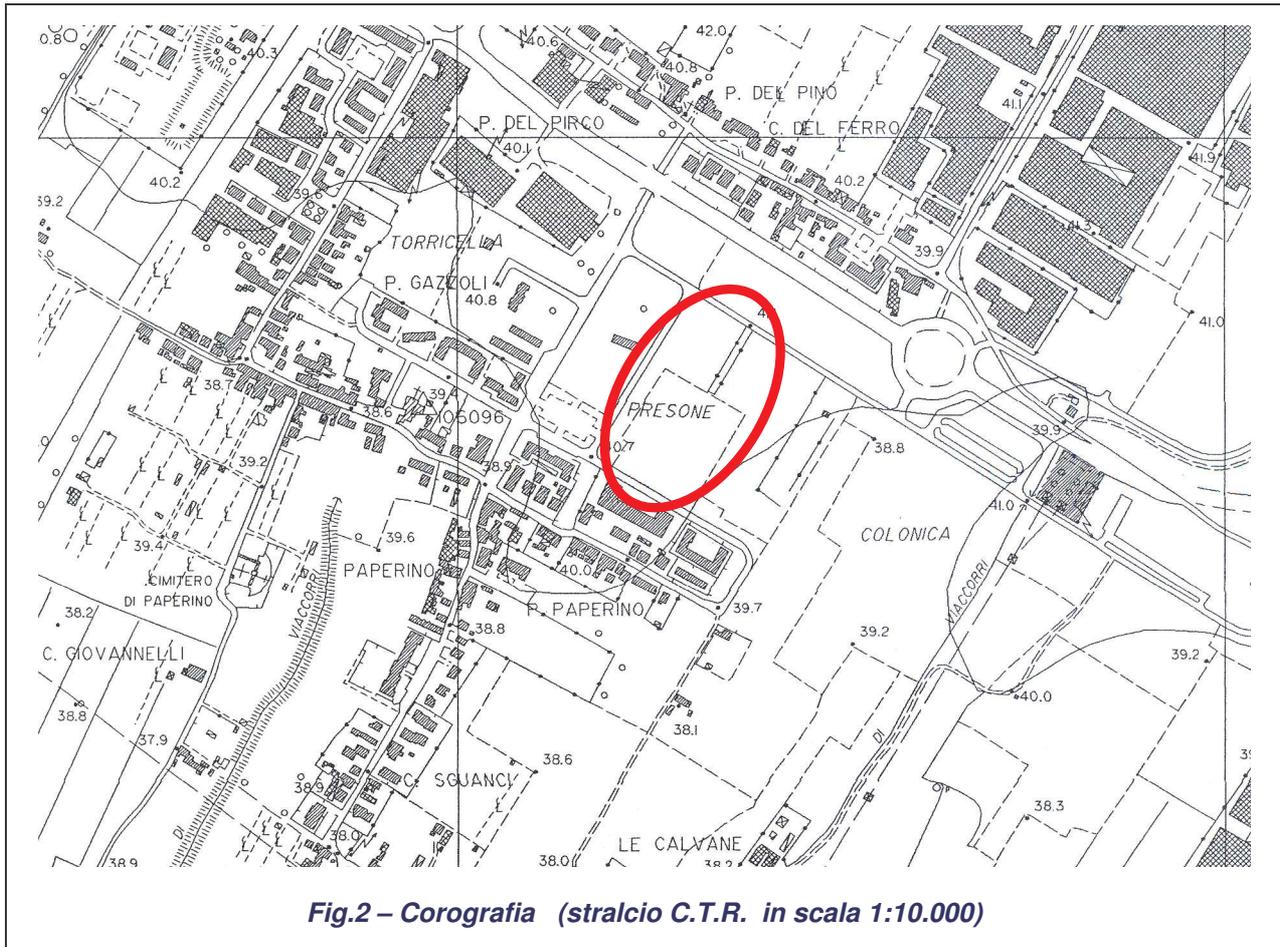
1.1 – Ubicazione e caratteristiche generali dell'intervento

Il presente lavoro – redatto su incarico del Comune di Prato, Area Opere Pubbliche e Ambiente - ha lo scopo di studiare le caratteristiche geologiche ed il comportamento geotecnico dei terreni costituenti un lotto su cui è prevista la realizzazione del nuovo Complesso Scolastico di Paperino, per il quale viene presentato il progetto definitivo inerente il Primo Lotto dei Lavori. Tale intervento verrà realizzato nel territorio comunale di Prato, in un'area ai margini dell'abitato di Paperino: la sua esatta ubicazione è visibile in Fig.1 (stralcio Carta d'Italia IGM in scala 1:25.000), in Fig.2 (stralcio C.T.R. in scala 1:10.000) ed in Fig.3 (stralcio C.T.R. Toscana in scala 1:2.000) allegate in Appendice I.



1.2 – Quadro normativo

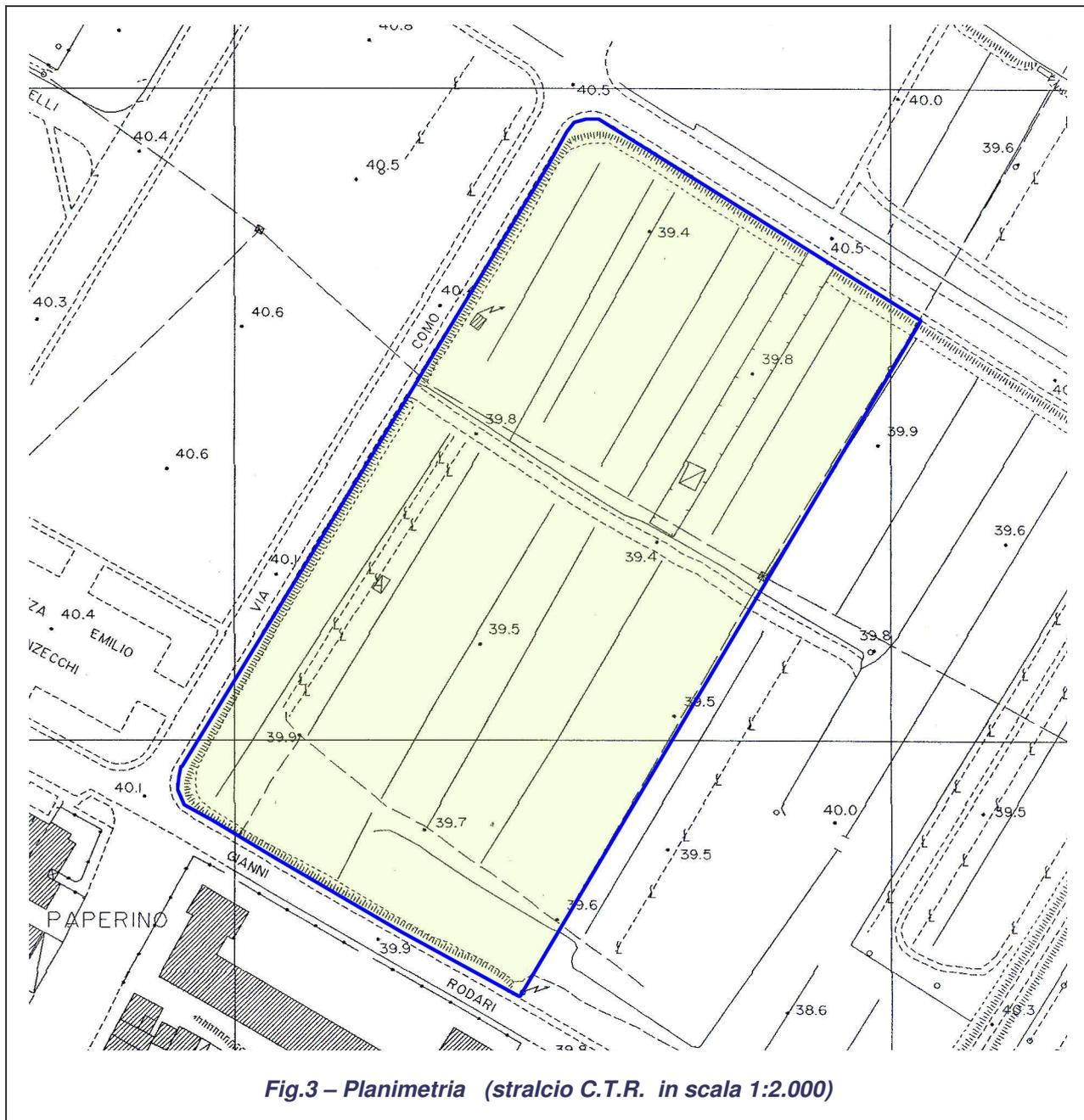
Lo studio è stato eseguito in ottemperanza al quadro normativo attualmente in vigore, con particolare attenzione a:



- D.M. 14.09.2005 (“Norme Tecniche per le Costruzioni”)
- Eurocodice 7 UNI ENV 1997 – 1 (“Progettazione geotecnica”)
- Eurocodice 8 UNI ENV 1997 – 1 (“Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – parte 5”)
- D.M. 11.03.1988 (“Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce ...”) e la relativa **Circ. Min. LL.PP. n.30483 del 24.09.88**
- L. n.64 del 02.02.74
- Ord.P.C.M. n°3274 del 20.03.03 e successive modifiche ed integrazioni

1.3 – Vincolistica: analisi della cartografia vigente

- ❖ **Vincolo idrogeologico** (ai sensi della L. n°3267 del 30.12.23, del R.D. 1126/1926, artt. 21 e 22, nonché del Regolamento Regionale n°48 del 08.08.03 “Regolamento di attuazione della LR 39/2000 Legge Forestale della Toscana”) - L’area non è vincolata.

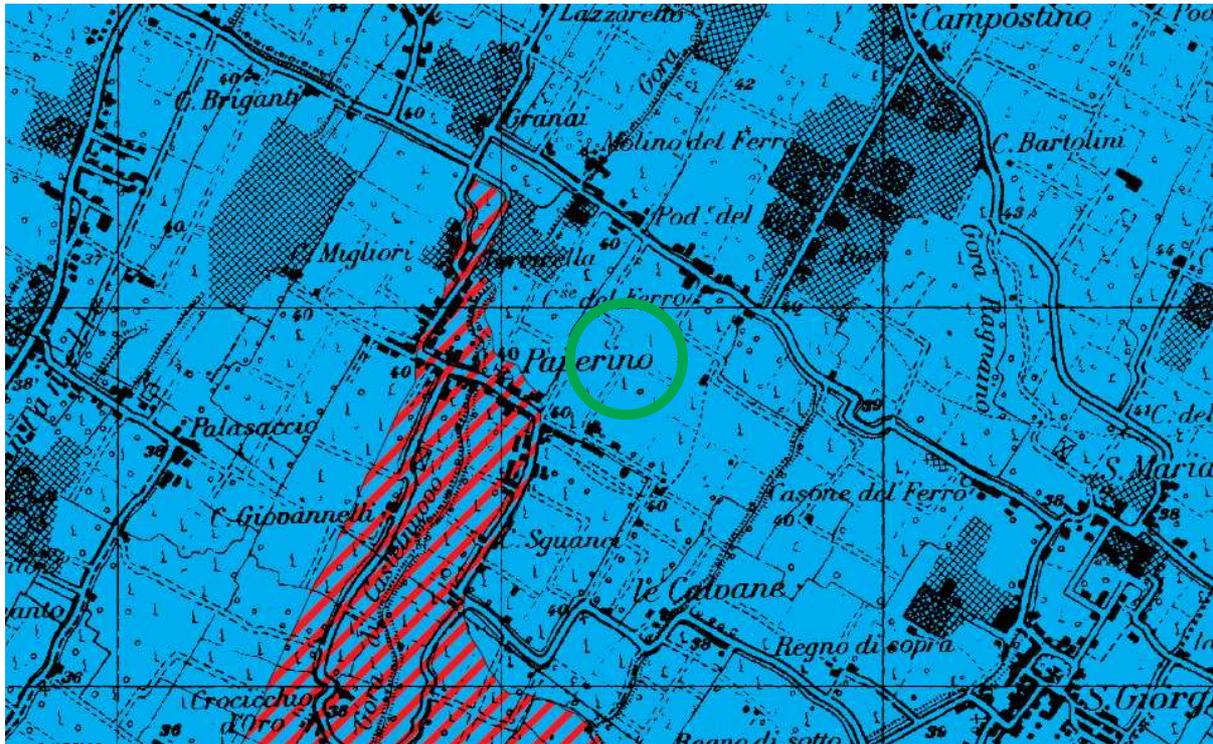


❖ **Rischio idraulico** (ai sensi della D.C.R. n°12 del 16.01.00 – art.65 e Titolo VII): l'abitato di Paperino è attraversato dalla Gora di Castelnuovo, censita nella suddetta delibera al n.PO1258, per il quale valgono gli ambiti A e B. Come si osserva dalla cartografia disponibile, il lotto in esame si trova a circa 250 mt. di distanza da tale corso d'acqua, per cui è all'esterno di tali ambiti, quindi non si applicano i vincoli e le prescrizioni collegate.

❖ **Piano di Bacino del Fiume Arno, stralcio «Rischio Idraulico»** (approvato con D.P.C.M. n°226 del 05.11.99)

– Nella «Carta guida delle aree allagate» l'area in oggetto è ricompresa nelle «Aree interessate da inondazioni eccezionali»: ci si dovrà quindi attenere a quanto stabilito alla Norma 6 del citato DPCM (vedi Fig.4).

Nella «Carta degli interventi strutturali per la riduzione del rischio idraulico nel bacino dell'Arno», invece, l'area non è perimetrata.



**Carta guida delle aree allagate
redatta sulla base degli eventi alluvionali significativi
(1966 - 1999)**

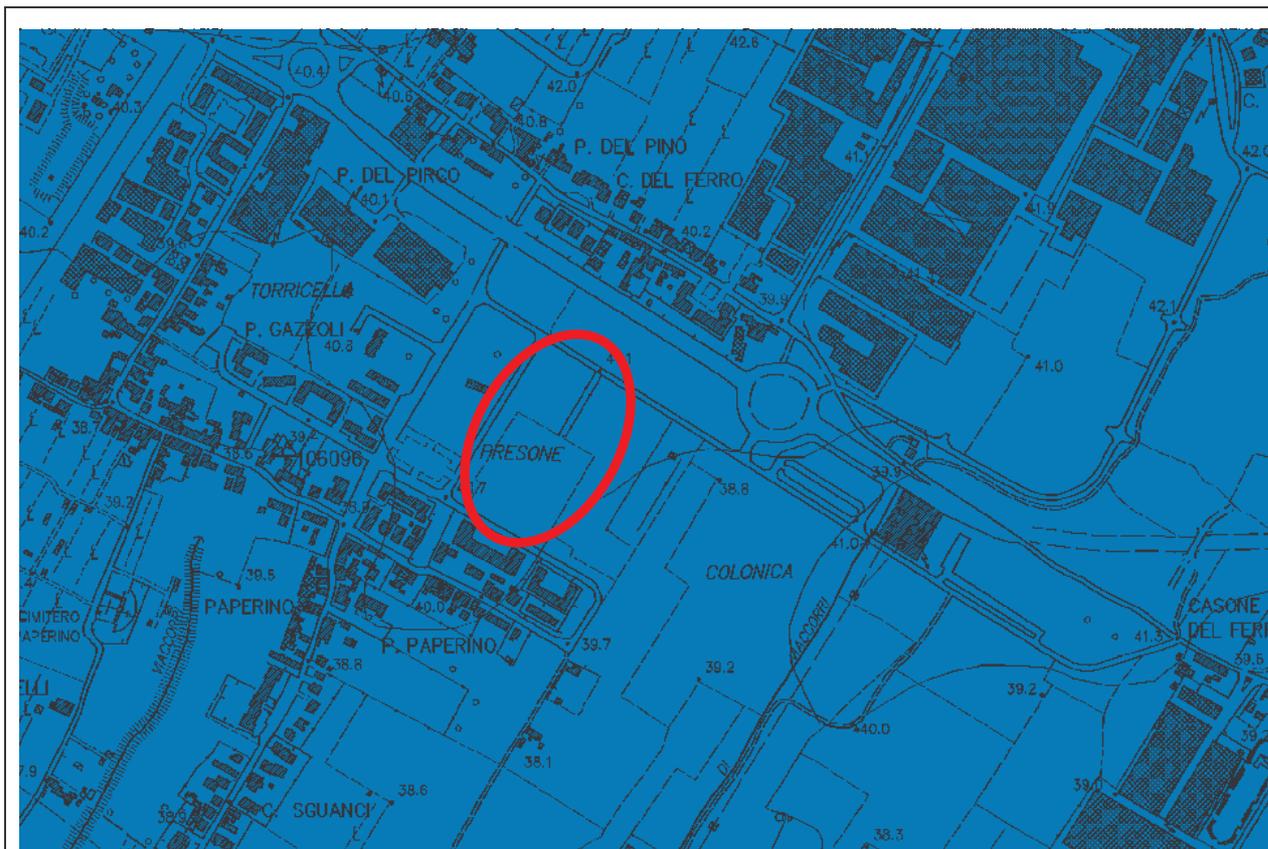
-  Aree interessate da inondazioni ricorrenti.
-  Aree interessate da inondazioni eccezionali.
-  Aree interessate da inondazioni durante gli eventi alluvionali degli anni 1991 - 1992 - 1993.

La presente cartografia alla scala 1:25.000 interessa gli stralci n:

8 9 10 11 14 15 16 18 19 20 21 23 24 25 26 27 28 29
30 31 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 46 47 48 49 50 51
52 53 54 55 56 57 58 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 71
72 73 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90
91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 108 109
110 111 112 113 114 115 119 120 121 122 123 124 127 128 129 132 133 136
137 138 139 140 141 142 145 146 147 148 149 152 153 154 155 158 159 160
162 163 166 167 170 171

Figura 4 (scala indicativa)

- ❖ **Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico P.A.I.** (approvato con **D.P.C.M. 06.06.05**) – Nella cartografia denominata “Perimetrazione delle aree con pericolosità idraulica – livell di dettaglio”, l'area rientra nella **classe P.I.2 - pericolosità moderata**, per la quale non sono previste salvaguardie particolari (vedi Fig.5 nella pagina sottostante).



Perimetrazione delle aree con pericolosità idraulica livello di sintesi

Scala 1:25.000



- P.I.4 Aree a pericolosità molto elevata
- P.I.3 Aree a pericolosità elevata
- P.I.2 Aree a pericolosità media
- P.I.1 Aree a pericolosità moderata
- R Aree di ristagno *

Ambito spaziale all'interno del quale la pericolosità è individuata su cartografia di dettaglio alla scala 1:10.000

* aree di ristagno individuate nella delibera del Comitato Istituzionale n. 139 del 29 novembre 1999 Allegato n. 1, esterne all'ambito spaziale in cui la pericolosità è individuata su cartografia di dettaglio alla scala 1:10.000

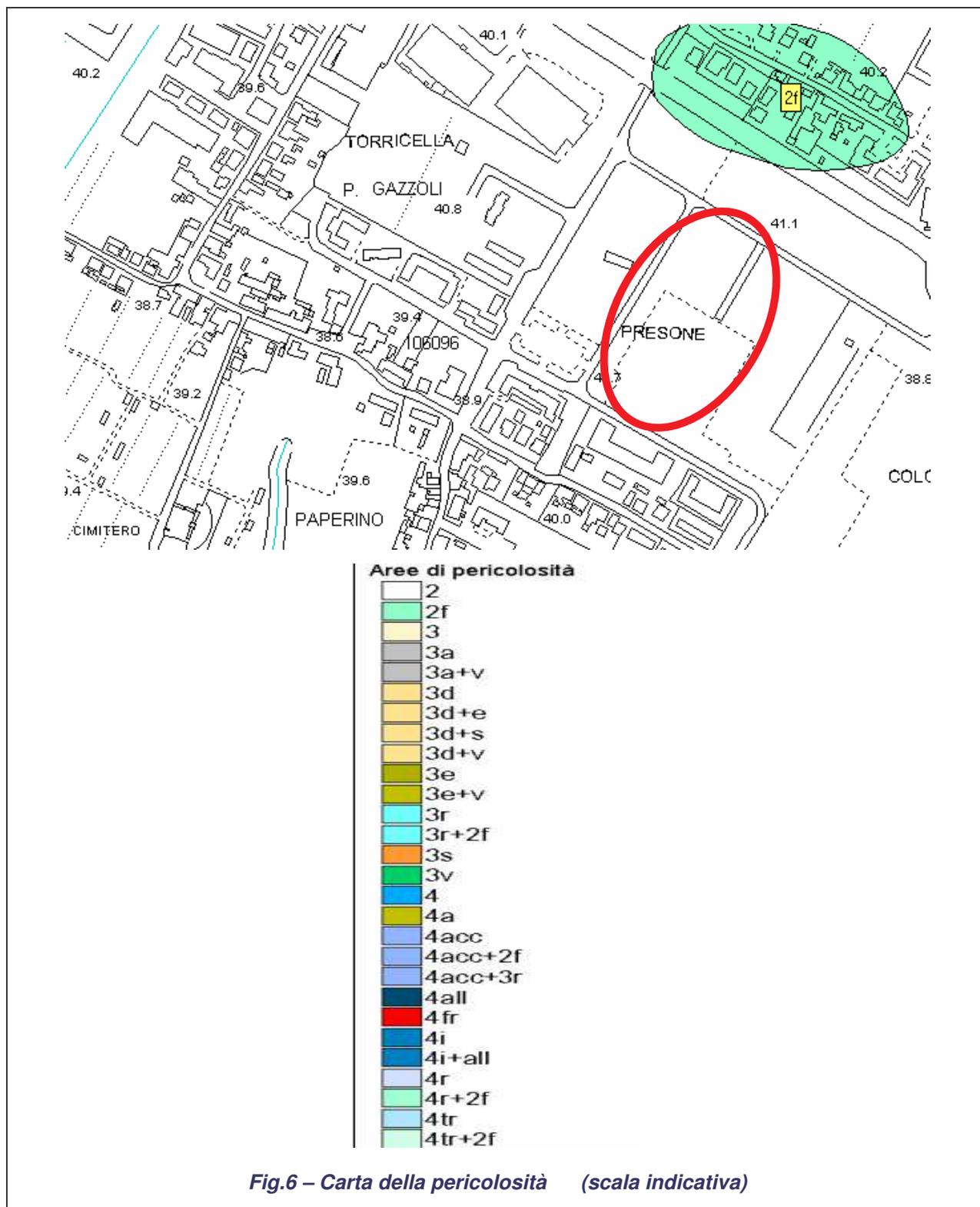
La presente cartografia alla scala 1:25.000 interessa gli stralci n:

2 7 8 9 10 11 14 15 16 17 18 19 20 21 23 24 25 26 27 28 29 30 31
 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58
 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 75 76 77 79 80 81 82 83
 84 85 86 87 89 90 91 92 93 94 95 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106
 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 118 119 120 121 122 123 124 126 127 128 129 130 131
 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 157 158 159
 160 162 163 164 166 167 168 170 171

Figura 5 (scala indicativa)

❖ **Classificazione nelle indagini geologico-tecniche di supporto allo S.U.** – Nelle indagini geologiche di supporto al Piano Strutturale adottato è presente una Carta della pericolosità geologica e idraulica, dove la classificazione del grado di pericolosità viene eseguita secondo le normative attualmente vigenti. Come si evince

dalla cartografia riportata in Fig.6, l'area viene classificata in **classe 2 (pericolosità bassa)**, pe la quale non sono previste prescrizioni particolari.



2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 – Note di Geologia Regionale

L'area oggetto del presente studio si trova al centro della pianura pratese, che rappresenta la zona centrale del più vasto bacino fluvio-lacustre di Firenze-Prato-Pistoia (o Medio Valdarno). Tale importante unità paleogeografica - di forma allungata con l'asse maggiore orientato NW-SE - è costituita da uno spessore variabile di depositi fluvio-lacustri non litificati, sedimentatisi entro una fossa tettonica, la cui formazione è conseguenza del regime tettonico distensivo instauratosi nel Pliocene medio - Pleistocene e responsabile del parziale smembramento dell'edificio strutturale costituitosi nel corso dell'orogenesi appenninica (Oligocene - Pliocene).

Questo bacino lacustre presenta la sua profondità massima nella zona tra Campi Bisenzio e Calenzano (500-550 m), minori profondità si sono riscontrate tra Prato e Pistoia (400-450 m); le profondità minime sono invece presenti nella zona di Firenze (50 m nel centro cittadino).

L'emissario di questo antico lago era probabilmente ubicato alla stretta della Gonfolina: i principali immissari erano costituiti da un paleo-Ema nella conca di Firenze, dall'Ombrone all'estremo opposto del bacino e dal Bisenzio nella sua parte centrale. Il progressivo abbassamento del fondo del lago veniva compensato dal forte trasporto solido dei corsi d'acqua, in considerazione del fatto che l'area appenninica di provenienza era in forte sollevamento e quindi in accentuata erosione. Il fondo del bacino risultò di forma asimmetrica, incernierato in corrispondenza del margine meridionale, con maggiore profondità verso il margine settentrionale a causa dell'azione della faglia normale che lo delimitava a NE.

Ulteriori faglie, trasversali rispetto al suo asse maggiore, interessarono il substrato pre-lacustre, causando il sollevamento (di circa 150-200 m) della conca di Firenze rispetto al resto del bacino che si estinse precocemente. In questa neo-pianura così prosciugata si instaurò un reticolo idrografico il cui corso principale sfociava nel lago residuo in corrispondenza delle Cascine, formando una pseudo-conoide che si allungò in direzione di Osmannoro e Campi Bisenzio.

Ciò causò un raccorciamento dell'area occupata dal lago, che veniva così ad essere delimitato a Sud-Est dall'allineamento Castello-Scandicci: nel restante bacino di Prato-Pistoia, invece, continuò senza soluzione di continuità la deposizione lacustre fino al totale colmamento.

Nella successiva fase alluvionale si instaurò un reticolo idrografico facente capo all'Arno che, con numerosi cicli di erosione e deposizione, rimaneggiò l'originaria superficie depositandovi una spessa coltre di sedimenti sciolti. Questi ultimi erano in genere a granulometria grossolana in prossimità dei corsi d'acqua o entro gli alvei, ed a granulometria decisamente più fine nelle zone più distali.

L'ultima fase evolutiva del bacino vide infine l'instaurarsi di estese zone palustri, specialmente ai margini della pianura neoformata ed in prossimità dei corsi d'acqua principali, alcune delle quali perdurarono fino in epoca storica. In tali ambienti, sedimentologicamente tranquilli, si depositarono potenti spessori di sedimenti fini con intercalazioni torbose.

2.2 – Sedimentologia del substrato

La zona in esame, come detto, ricade entro la pianura alluvionale fiorentina, costituita dai depositi lacustri villafranchiani di riempimento dell'antico bacino e dai soprastanti depositi fluviali: questo pacco di sedimenti ha giacitura sub-orizzontale e ricopre in discordanza le formazioni pre-lacustri affioranti nelle colline circostanti. In particolare, la deposizione lacustre occupa buona parte della storia deposizionale dell'area (Pliocene sup. - Pleistocene medio); la deposizione della componente fluviale macroclastica, invece, è riferibile all'ultimo periodo glaciale (Pleistocene sup.) ed a tempi storici. Come si nota dalla cartografia riportata in Fig.7, il lotto in esame si trova in un'area ove affiorano sedimenti alluvionali fini a prevalenza di limi e argille limose, frutto delle esondazione degli ultimi periodi storici e proto-storici, il cui spessore può variare da 8 a 20 metri.

2.3 - Analisi geomorfologica

La morfologia dell'area in esame è completamente pianeggiante, con il piano di campagna posto tra 39,5 e 40,0 mt. s.l.m. La zona si trova ai margini dell'abitato di Paperino, circondata dalla viabilità di penetrazione al centro abitato e al Macrolotto: buona parte del lotto risulta adibita a seminativo, mentre la fascia centrale è occupata da piccoli orti privati.

In considerazione di ciò l'area risulta priva di forme del terreno particolarmente significative; quelle poche che si potevano ritrovare sono state completamente alterate dall'estesa attività antropica (agricola ed edilizia).

2.4 – Cenni di idrografia

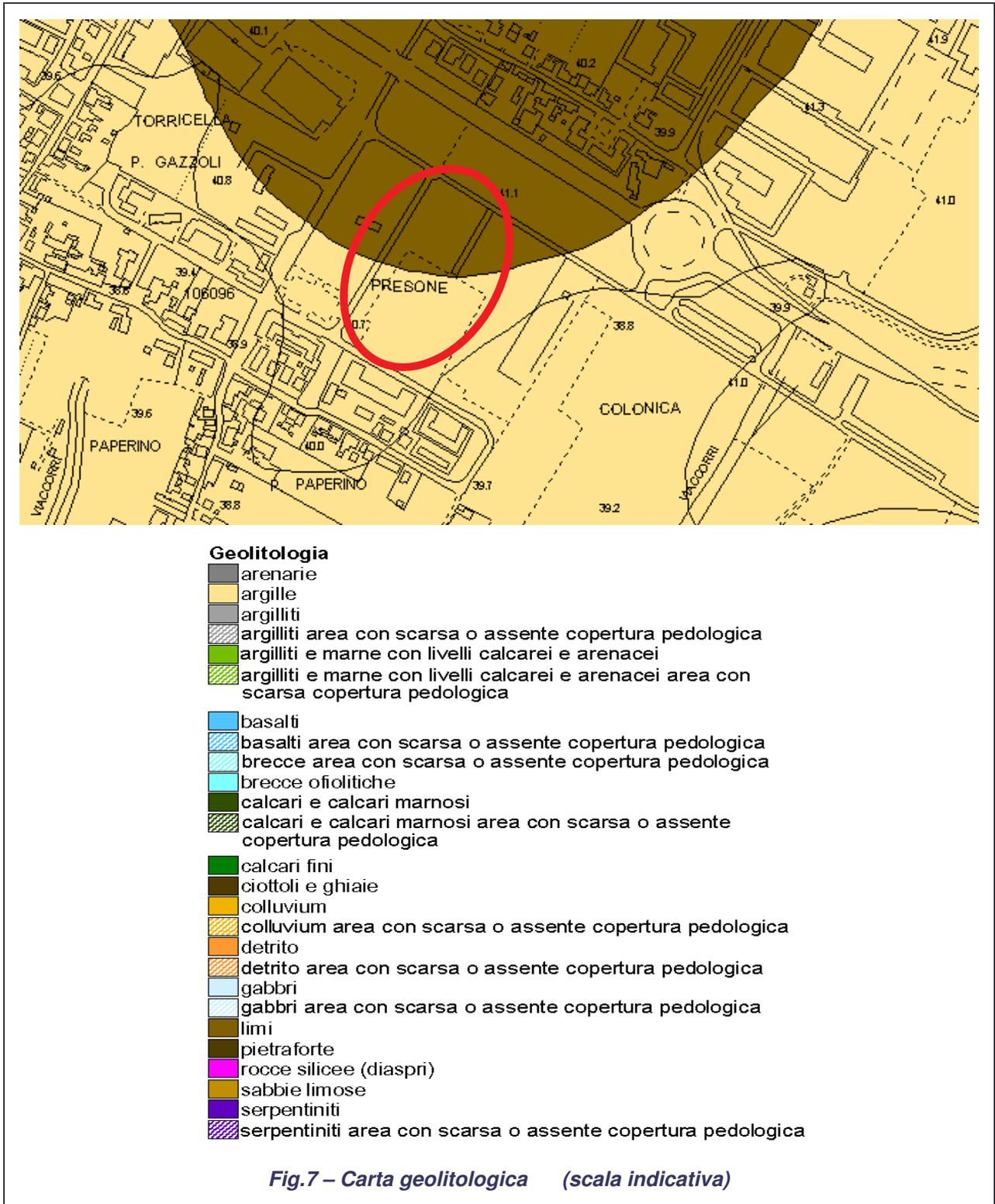
Il reticolo idrografico della zona è costituito da vari corsi d'acqua organizzati secondo la tipica gerarchizzazione idraulica delle pianure ad alto impatto antropico (*corsi di acque alte*, i *corsi di acque basse* e le *canalette agricole*). Nella zona in studio la rete idrica delle *acque basse* fa capo alla Gora di Castelnuovo: al suo interno recapitano invece le *canalette agricole* presenti nell'area: si tratta di tutte le piccole incisioni che solcano i campi e garantiscono il loro buon drenaggio.

2.5 – Permeabilità dei terreni ed idrogeologia

L'area in esame rientra nella zona di affioramento dei sedimenti alluvionali, fluvio-lacustri e lacustri recenti, sciolti, caratterizzati da permeabilità primaria per porosità variabile in dipendenza della granulometria e del grado di cementazione e/o addensamento della massa sedimentaria. In particolare i limi e limi argillosi lacustri e fluvio-lacustri sono caratterizzati da valori di permeabilità generalmente modesti, ridotti verso l'alto dall'intensa pedogenesi a pseudogley dei livelli più superficiali.

Il sottosuolo della pianura pratese è sede di un acquifero fra i più importanti del bacino dell' Arno: le ghiaie ed i ciottolami della conoide fluviale del Bisenzio raggiungono uno spessore massimo di 50 metri e forniscono ai

pozzi portate piuttosto alte. Anche al di sotto del corpo acquifero principale, fino alla profondità di oltre 300 m, sono presenti livelli di ghiaie con falde in pressione.



In generale, nel sottosuolo dell'area di Prato, è possibile riconoscere un sistema acquifero composto da una serie di livelli permeabili (ghiaie con matrice sabbiosa e/o limosa) intercalati da strati acquiclude o acquitardi (limi e argille), che comportano la presenza di più falde. La prima falda, libera, è contenuta nel corpo principale della conoide, e risulta costituita da ghiaie e ciottolami che a partire da profondità di 2 – 10 m dal piano di campagna arrivano fino a profondità di 60 m, profondità che diminuisce procedendo verso i margini della conoide.

I livelli limoso-argillosi all'interno di questa falda principale sono scarsi nella zona apicale e centrale della conoide, mentre aumentano verso le aree marginali, comunque non raggiungono mai per estensione e spessore una continuità tale da impedire la circolazione idrica fra i livelli più permeabili di ghiaie. Tale falda, pertanto, può essere considerata un acquifero monostrato. Questa può essere definita **freatica**, caratterizzata dal fatto che non satura il corpo acquifero e che la superficie freatica vi ricade all'interno. Essa è alimentata direttamente dalle precipitazioni meteoriche: le sue oscillazioni freaticometriche stagionali seguiranno quindi l'andamento stagionale.

Al di sotto del corpo acquifero principale sono presenti, soprattutto nella zona apicale e centrale, altri livelli permeabili inter-comunicanti ed ospitanti falde; in esse si evidenziano scambi idrici sia tra loro che con la falda libera sovrastante.

3 - CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

3.1 – Criteri d'indagine e descrizione della campagna geognostica

Il substrato dell'area interessata dall'ampliamento della scuola è stato indagato con una serie di indagini geognostiche sia in situ che in laboratorio, finalizzate alla caratterizzazione litologica, fisico-meccanica e idrogeologica dei vari livelli incontrati per uno spessore ritenuto significativo allo scopo. Per raggiungere tale obiettivo sono state eseguite le seguenti tipologie di indagini:

1. N°5 prove penetrometriche statiche, spinte alla profondità massima di 8,80 mt. rispetto al piano di campagna attuale, in corrispondenza della quale si è ottenuto il rifiuto all'infissione della punta. Per la loro esecuzione è stato utilizzato un penetrometro statico da 20 tonn montato su mezzo semovente, dotato di punta Begemann con *Friction Jacket*, che misura sia la resistenza alla punta (**R_p**) che quella per attrito laterale (**R_l**): dal rapporto tra queste due grandezze, è possibile risalire ad informazioni sulla natura e stato fisico dei terreni attraversati (BEGEMANN 1966, AGI 1977, SCHMERTMANN 1978).

2. N°1 sondaggio a carotaggio continuo (modalità di avanzamento a circolazione d'acqua) con prelievo di campioni indisturbati ed esecuzione di prove SPT nei livelli ritenuti significativi, spinti alla profondità di 24 metri dal piano di campagna.

Il fine principale di un sondaggio è quello di recuperare campioni continui di terreno per poter procedere alla ricostruzione geometrica della successione di terreni attraversata: nel corso della loro esecuzione i campioni estratti sono stati sistemati in apposite cassette catalogatrici. Sulla base dell'osservazione dei campioni "rimaneggiati" così ordinati sono state ricostruite le singole stratigrafie. Sulle carote estratte sono

state invece condotte prove speditive con *penetrometro pocket*: i valori così misurati hanno consentito di ottenere indicazioni sia sulla resistenza al taglio in condizioni non drenate (c_u) che sulla capacità portante dei terreni testati. A profondità compatibili con gli scopi dell'indagine sono stati inoltre prelevati campioni indisturbati che, immediatamente sigillati, sono stati recapitati in laboratorio per l'effettuazione delle previste analisi.

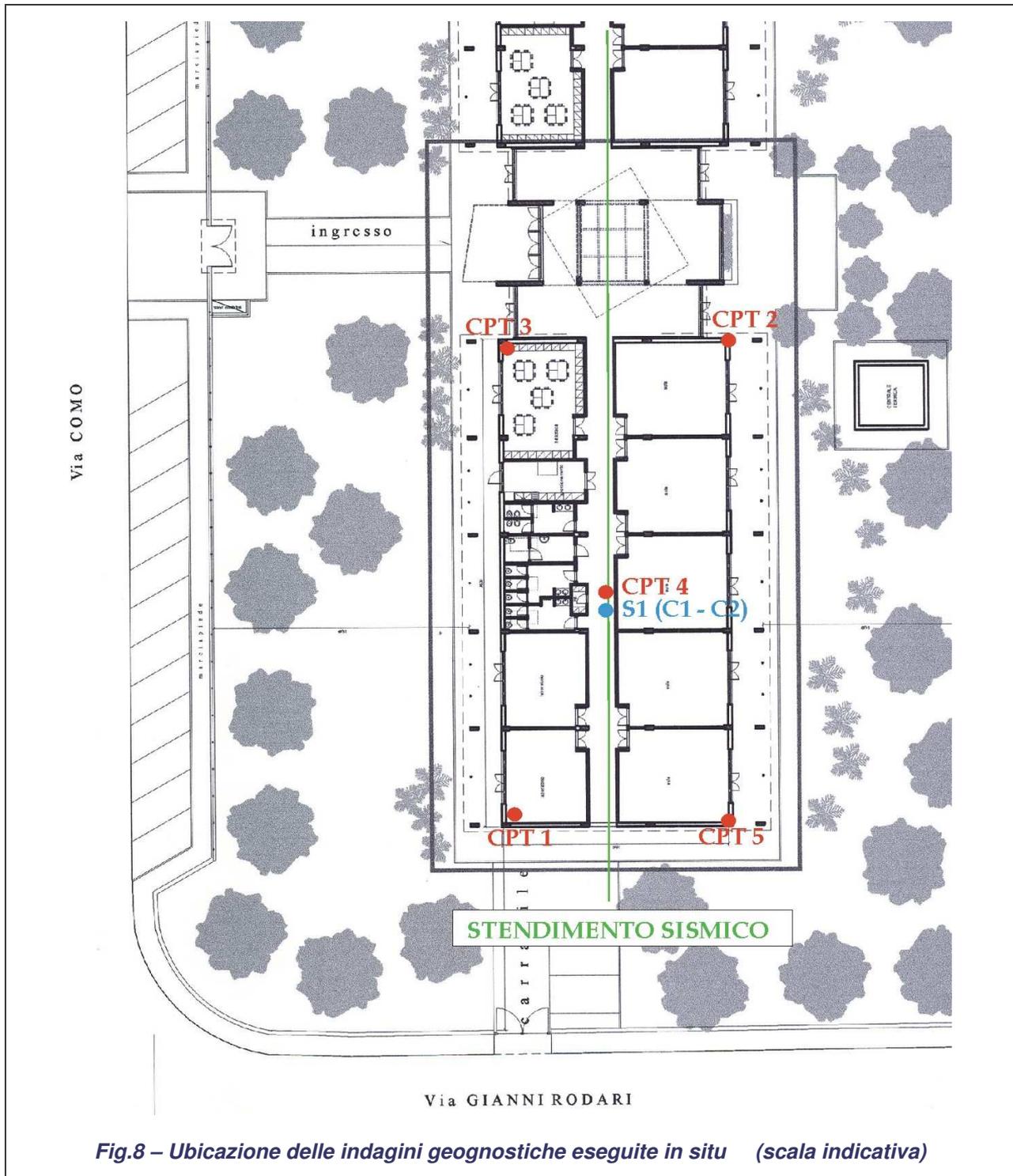
Infine, all'interno del sondaggio è stato installato un piezometro fenestrato a tubo aperto, in modo da consentire la misurazione della profondità del livello idrico.

3. I campioni prelevati sono stati sottoposti ad analisi di laboratorio per la determinazione delle proprietà indici, dei parametri meccanici e della compressibilità dei materiali:
 - *analisi granulometrica*, finalizzata alla determinazione della distribuzione percentuale in peso dei grani secondo le loro dimensioni: può essere eseguita per via umida tramite setacciatura (Boll. Uff. CNR n°23), o con il metodo del densimetro per le frazioni più fini (ASTM D 1140/71)
 - *determinazione dell'umidità naturale* (CNR – UNI 10008), ottenuta tramite essiccazione del campione a 110° fino al raggiungimento del peso costante: l'umidità è data dal rapporto percentuale tra perdita di peso ed il peso secco del materiale
 - *determinazione del peso di volume* (Boll. Uff. CNR n°40), ottenuto tramite essiccazione fino a peso costante ed impermeabilizzazione della superficie del provino per immersione rapida nella paraffina
 - *prova di Taglio Diretto, consolidata drenata* CD (ASTM D 3080/72), finalizzata alla determinazione dei parametri di resistenza c e ϕ in termini di tensioni efficaci.
 - *prova edometrica*, che simula in laboratorio il comportamento del terreno sottoposto ad incrementi di carico in condizioni di deformazioni laterali impedito (il campione viene contenuto in un anello metallico)
4. N°1 profilo sismico a rifrazione di lunghezza pari a 92 m con equidistanza dei sensori (24 *geofoni*) rispettivamente di 4 metri: il sismografo utilizzato per l'indagine è un GEODE 48 canali (2 moduli a 24 canali) con Controller Stratavizor NZC: per la realizzazione dell'indagine è stato proceduto allo stendimento del cavo sismico, secondo un andamento rettilineo, collegandolo, mediante connettori, ai 24 geofoni e all'unità di acquisizione completamente automatica e portatile (*sismografo*). L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche viene effettuata mediante una massa battente da 60 kg tramite cannone sismico: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro solidale con il punto di scoppio (*trigger*), il sistema di acquisizione dati.

La produzione di onde di taglio SH viene effettuata ponendo una trave di legno a diretto contatto con il terreno ed energizzando su entrambi i lati dopo averla adeguatamente caricata. Le registrazioni vengono effettuate alternativamente su entrambi i lati e sommate con polarità scambiata in modo da migliorare l'individuazione dell'onda di taglio polarizzata che viene generata. Al

fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione (*shoot points*) vengono disposti simmetricamente rispetto al profilo sismico sia alle sue terminazioni (*end*) che esternamente (*offset*) ed a distanze variabili entro il profilo stesso (punti di scoppio centrali). Per ulteriori dettagli sulle modalità esecutive dell'indagine, si veda la relazione della Ditta Esecutrice allegata in Appedndice II.

L'ubicazione delle indagini eseguite è riportata nella Fig.8 allegata, mentre i relativi certificati di prova e di analisi sono allegati in Appendice II.



3.2 – Modello geologico-stratigrafico di riferimento per la progettazione

Le indagini in sito hanno messo in evidenza una stratigrafia caratterizzata da buona continuità in senso laterale, costituita dalla seguente successione di livelli sedimentari, ritenuta *caratteristica del substrato* del lotto in esame.

- **Livello superficiale preconsolidato** – Limi sabbiosi e argilloso-sabbiosi color nocciola e beige caratterizzati da un elevato grado di consistenza indotto dal preconsolidamento per ritiro stagionale. Gli effetti di tale preconsolidazione si risentono a profondità variabili tra 120 cm (CPT 1) e 200 cm (CPT 4) dal piano di campagna.

Tali effetti rimaneggiano progressivamente il terreno deteriorandone alla lunga le caratteristiche geotecniche; a conferma di ciò si rileva che l'indagine sismica riconosce questo livello come terreno areato e rimaneggiato, caratterizzato da basse velocità sismiche.

- **Alluvioni recenti granulometricamente fini** – Al di sotto si incontrano limi argillosi, argille limoso-sabbiose ed argille sia color nocciola che grigio, frequentemente screziati, con livelli contenenti noduli carbonatici secondari e sporadici livelletti torbosi arealmente assai limitati. Tali

sedimenti si estendono a profondità variabili tra 580 cm (CPT 3) e 680 cm (CPT 1) dal piano di campagna, per uno spessore variabile tra 4,0 e 7,4 metri

- **Alluvioni recenti macroclastiche** – Tutte le prove penetrometriche hanno dato rifiuto all'infissione entro questo orizzonte, costituito da ghiaie e ghiaietto in matrice sabbioso-limosa talora assai abbondante (i clasti non sono a contatto tra loro): solo sporadicamente si incontrano livelli grano-sostenuti, con netta prevalenza dello scheletro rispetto alla matrice fine.

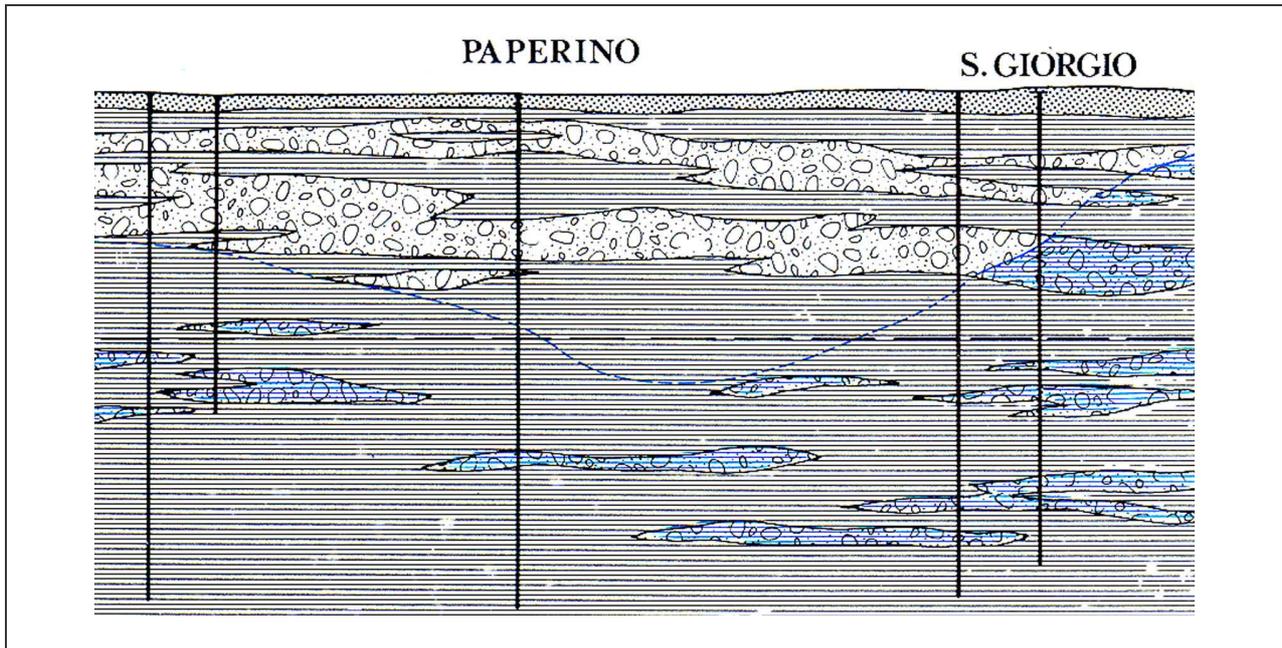
Tali livelli sono riferibili ai processi di sedimentazione maggiormente distale del sistema della conoide pratese: dal sondaggio eseguito si ricava che questo orizzonte si estende in profondità sino a 970 cm. dal piano di campagna,

- **Alluvioni recenti granulometricamente fini** – Al di sotto il sondaggio ha nuovamente evidenziato limi argillosi ed argille limoso-sabbiose color nocciola, frequentemente screziati: sulla base dei risultati del carotaggio eseguito, è noto che tali sedimenti si estendono a circa 13 metri di profondità rispetto al piano di campagna attuale.

- **Alluvioni recenti macroclastiche** – Ancora più in profondità inizia un secondo e più consistente livello costituito da ghiaie e ghiaietto in matrice sabbioso-limosa talora assai abbondante (i clasti sovente non sono a contatto tra loro): solo sporadicamente si incontrano livelli macroclastico grano-sostenuti. Il sondaggio si è

fermato a 24 metri di profondità senza rilevare la base stratigrafica di questo orizzonte ghiaioso: l'indagine sismica ha tuttavia messo in evidenza che tale base costituisce un piano blandamente inclinato che si trova a profondità variabili tra i 27 e i 32 metri dal piano di campagna.

Al di sotto si dovrebbero nuovamente incontrare i depositi argilloso-limosi compatti di sedimentazione fluvio-lacustre villafranchiana, come è riportato anche nella sezione stratigrafica schematica riportata di seguito (tratta da Landini et alii: "La falda idrica della conoide di Prato" – 1990)



3.2.1 – Situazione idrogeologica locale

Misurazioni freatiche eseguite all'interno dei fori d'indagine (sia penetrometrie che il sondaggio) hanno messo in evidenza la seguente situazione idrogeologica.

- ✓ Dai piezometri installati entro i fori penetrometrici è stato possibile rilevare un livello idrico variabile tra 7 e 8 mt. di profondità: questo è riferibile ad un livello idrico sospeso contenuto all'interno del primo orizzonte ghiaioso. Tale livello idrico risente grandemente dell'alimentazione superficiale, per cui la sua produttività e la sua presenza sono legate ai cicli stagionali.
- ✓ Il piezometro installato entro il foro di sondaggio ha messo in luce – invece – un livello idrico a circa 17 metri di profondità rispetto al piano di campagna attuale: tale livello corrisponde alla falda acquifera freatica principale della piana pratese, contenuta entro i livelli macroclastici puliti e maggiormente potenti afferenti alla conoide di Prato, caratterizzati da buoni valori dei parametri idrodinamici.

3.2.2 – Modello geologico

Sulla base degli elementi geologici, idrogeologici, di pericolosità e geognostici acquisiti è possibile ricostruire il seguente modello geologico del sottosuolo, da prendere come riferimento per la progettazione successiva.

MODELLO GEOLOGICO (art. 7.2.1 Norme Tecniche Costruzioni)	
Ambiente di sedimentazione	Fluviale (conoide distale)

Costituzione geologica	Limi argilloso-sabbiosi con ghiaie in profondità
Caratteri geomorfologici	Area pianeggiante a 39,5 mt. slm
Caratteri idrogeologici	1° falda a - 6 mt. - 2° falda a -17 mt
Pericolosità geologica	Pericolosità bassa

3.3 - Modello geotecnico del sottosuolo

3.3.1 – Caratterizzazione fisico-meccanica

Sulla base dei dati acquisiti, possiamo attribuire ai livelli stratigrafici riconosciuti le caratteristiche fisico-meccaniche (peso di volume, coesione, angolo d'attrito interno) caratterizzanti il comportamento fisico-meccanico.

CPT 1					
Profondità (da ... a..., cm)	R_{pm} (Kg/cmq)	γ (gr/cm ³)	c_u (Kg/cm ²)	ϕ	Denominazione
000 - 120	33	1.92	1.30	28	Limi argillosi preconsolidati
120 - 300	21	1.90	0.54	26	Limi argillosi-sabbiosi
300 - 420	27	1.83	0.54	35	Limi argillosi-sabbiosi
420 - 680	11	1.81	0.01	22	Argille limose con livelli torbosi
680 - 840	154	1.98	5.00	45	Ghiaietto in abbondante matrice
oltre 840	243	2.20	9.00	48	Ghiaie e sabbie

CPT 2					
Profondità (da ... a..., cm)	R_{pm} (Kg/cmq)	γ (gr/cm ³)	c_u (Kg/cm ²)	ϕ	Denominazione
000 - 140	46	1.97	1.90	30	Limi argillosi preconsolidati
140 - 280	18	1.85	0.40	24	Limi argillosi-sabbiosi
280 - 340	27	1.90	0.61	26	Limi argillosi-sabbiosi
340 - 580	12	1.83	0.01	22	Argille limose con livelli torbosi
580 - 620	66	1.99	1.70	30	Sabbie e sabbie limose
620 - 680	197	2.00	7.60	46	Ghiaietto in abbondante matrice
oltre 680	360	2.20	14	48	Ghiaie e sabbie

CPT 3					
Profondità (da ... a..., cm)	R_{pm} (Kg/cmq)	γ (gr/cm ³)	c_u (Kg/cm ²)	ϕ	Denominazione

000 – 160	38	1.92	1.57	28	<i>Limi argillosi preconsolidati</i>
160 – 240	16	1.85	0.34	24	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
240 – 340	23	1.90	0.47	26	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
340 – 580	13	1.83	0.01	22	<i>Argille limose con livelli torbosi</i>
580 – 640	93	1.93	3.00	42	<i>Ghiaietto in abbondante matrice</i>
oltre 640	310	2.20	12	48	<i>Ghiaie e sabbie</i>

CPT 4					
Profondità <i>(da ... a..., cm)</i>	R_{pm} <i>(Kg/cmq)</i>	γ <i>(gr/cm³)</i>	c_u <i>(Kg/cm²)</i>	φ	Denominazione
000 – 200	36	1.92	1.44	28	<i>Limi argillosi preconsolidati</i>
200 – 380	22	1.90	0.42	26	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
380 – 540	11	1.81	0.01	22	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
540 – 600	18	1.85	0.02	27	<i>Argille limose con livelli torbosi</i>
600 – 660	124	1.98	4.20	44	<i>Ghiaietto in abbondante matrice</i>
oltre 660	257	2.20	10	46	<i>Ghiaie e sabbie</i>

CPT 5					
Profondità <i>(da ... a..., cm)</i>	R_{pm} <i>(Kg/cmq)</i>	γ <i>(gr/cm³)</i>	c_u <i>(Kg/cm²)</i>	φ	Denominazione
000 – 140	39	1.92	1.63	28	<i>Limi argillosi preconsolidati</i>
140 – 280	22	1.90	0.58	26	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
280 – 400	30	1.91	0.68	27	<i>Limi argillosi-sabbiosi</i>
400 – 540	15	1.82	0.01	24	<i>Argille limose con livelli torbosi</i>
540 – 620	21	1.90	0.02	26	<i>Sabbie e sabbie limose</i>
620 – 680	226	2.10	8.0	45	<i>Ghiaietto in abbondante matrice</i>
oltre 680	350	2.20	14	48	<i>Ghiaie e sabbie</i>

Per l'attribuzione di tali parametri sono stati seguiti i seguenti criteri discriminanti, che hanno contribuito a costruire il modello geotecnico di riferimento del substrato di fondazione:

- ❖ i sedimenti alluvionali recenti granulometricamente fini sono stati considerati a comportamento eminentemente coesivo ($c \neq 0$; $\phi = 0$), come hanno dimostrato le analisi di laboratorio

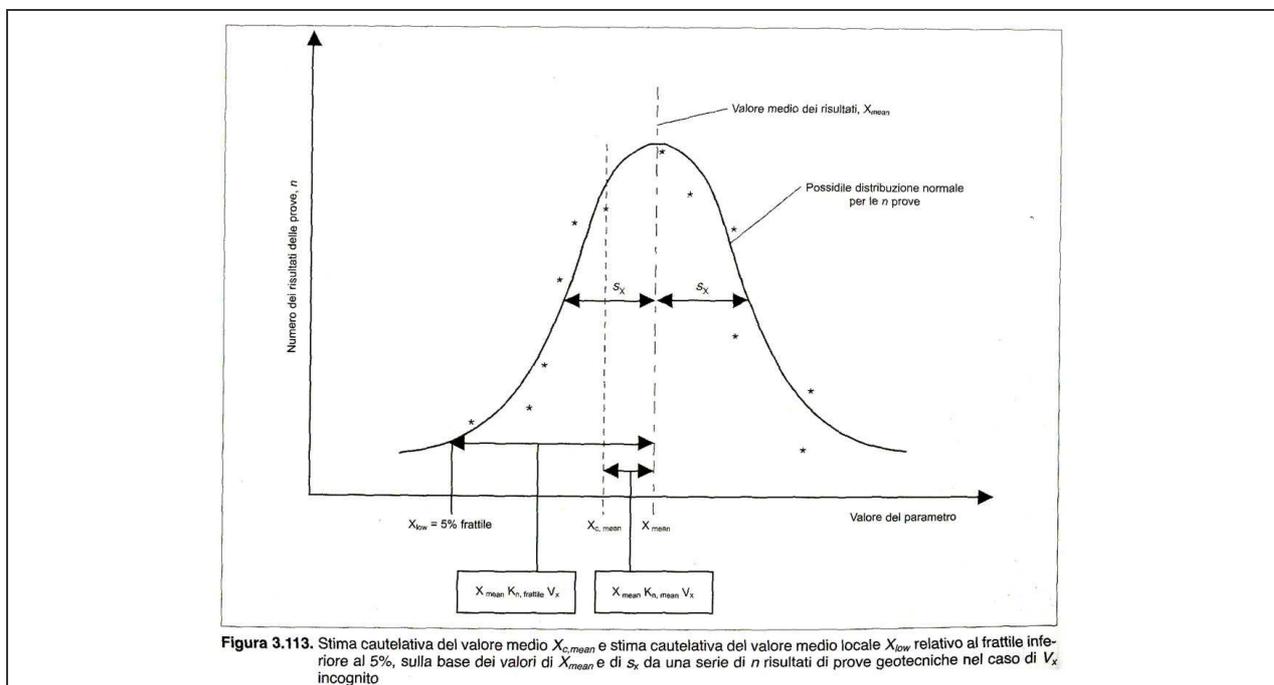
- ❖ le ghiaie in matrice sabbiosa della conoide di Prato – invece - sono state considerate a comportamento non coesivo ($c = 0$), indipendentemente dalla percentuale e dal tipo granulometrico di matrice fine presente.

3.3.2 – Parametri di progetto

Sulla base della stratigrafia ricostruita grazie alla campagna geognostica eseguita, è possibile suddividere i terreni costituenti il substrato del lotto con criterio geotecnico nelle seguenti unità a comportamento omogeneo, alle quali vengono attribuiti per ogni parametro geotecnico un **valore caratteristico (V_k)** in relazione ai risultati ottenuti da prove di laboratorio e in situ.

Tali valori caratteristici dei parametri dovranno essere in grado di rappresentare adeguatamente e con ragionevole cautela il comportamento meccanico del terreno per quanto concerne lo stato limite da analizzare. Sulla base di quanto stabilito dal Testo Unico, viene definito valore caratteristico “*quel valore che ha il 5% di probabilità di essere superato verso il basso (frattile 5%)*”, come si vede nel diagramma sottostante: tale definizione implica quindi già un fattore di sicurezza, in quanto risulta assai inferiore ai valori medi utilizzati con le metodologie di calcolo precedenti.

Alla luce di ciò, in questa analisi viene trascurato il primo livello limoso preconsolidato, in quanto gli elevati parametri geotecnica che lo caratterizzano sono causati dalla ciclicità del ritiro stagionale, quindi possono stagionalmente variare. Ipotizzeremo quindi che le future fondazioni poggino comunque sui sedimenti con caratteristiche naturali non alterate dalla preconsolidazione per ritiro.



Unità A (limi argillosi e argilloso-sabbiosi mediamente consistenti)

		Unità di misura	Valore medio	Valore caratteristico
spessore		mt	4.40	-
γ	peso dell'unità di volume	gr/cmc	1.88	1.83
c_u	coesione non drenata	Kg/cmq	0.51	0.33
c	coesione	Kg/cmq	0.114	-
ϕ	angolo di attrito interno	-	26	21
w_n	umidità naturale	%	23.12	-
C_v	Coefficiente di compressibilità	cmq/sec	0.005	-
V_p	Velocità onde compressione	m/sec	574	-

Unità B (limi argillosi e argilloso-sabbiosi scarsamente consistenti)

		Unità di misura	Valore Medio	Valore caratteristico
spessore		mt	2.40	-
γ	peso dell'unità di volume	gr/cmc	1.84	1.78
c_u	coesione non drenata	Kg/cmq	0.04	0.01
c	coesione	Kg/cmq	0.067	-
ϕ	angolo di attrito interno	-	23	20
w_n	umidità naturale	%	18.4	-
C_v	Coefficiente di compressibilità	cmq/sec	0.009	-
V_p	Velocità onde compressione	m/sec	574	-

Unità C (ghiaie e ghiaietto in matrice limoso-sabbiosa)

		Unità di misura	Valore medio	Valore caratteristico
spessore		mt	3.60	-
γ	peso dell'unità di volume	gr/cmc	2.09	1.90
c_u	coesione non drenata	Kg/cmq	8.05	1.04
ϕ	angolo di attrito interno	-	44	36
V_p	Velocità onde compressione	m/sec	919	-

Unità D (limi argillosi e argilloso-sabbiosi)

		Unità di misura	Valore	Valore
--	--	-----------------	--------	--------

			medio	caratteristico
<i>Spessore</i>		<i>mt</i>	3.30	-
c_u	<i>coesione non drenata</i>	<i>Kg/cmq</i>	0.40	0.075
V_p	<i>Velocità onde compressione</i>	<i>m/sec</i>	919	-

Unità E (ghiaie in matrice limoso-sabbiosa)

		Unità di misura	Valore medio	Valore caratteristico
<i>spessore</i>		<i>mt</i>	15.50	
γ	<i>peso dell'unità di volume</i>	<i>gr/cmc</i>	1.98	-
ϕ	<i>angolo di attrito interno</i>	-	40	-
V_p	<i>Velocità onde compressione</i>	<i>m/sec</i>	919	-

Sulla scorta di quanto riportato in precedenza, ai fini dello studio geotecnico da eseguire, viene quindi ricostruito il seguente schema geotecnico, di riferimento per i calcoli successivi

MODELLO GEOTECNICO (art. 7.2.2 Norme Tecniche Costruzioni)	
<i>Stato del piano di campagna</i>	<i>Orizzontale</i>
<i>Profondità falda</i>	<i>- 6 mt. dal p.c.</i>
<i>Volume significativo (Eurocodice 7)</i>	<i>(1 ÷ 3)*B</i>
<i>Terreno di fondazione</i>	<i>Unità A</i>
<i>Comportamento geotecnico</i>	<i>coesivo</i>

4 – CLASSIFICAZIONE SISMICA

4.1 - Generalità

Il *rischio sismico* è il risultato dell'interazione tra il fenomeno naturale e le principali caratteristiche della comunità esposta. Si definisce come l'insieme dei possibili effetti che un terremoto di riferimento può produrre in un determinato intervallo di tempo, in una determinata area, in relazione alla sua probabilità di accadimento ed al relativo grado di intensità (severità del terremoto). La determinazione del rischio è legata a tre fattori principali:

- **Pericolosità** - Esprime la probabilità che, in un certo intervallo di tempo, un'area sia interessata da terremoti che possono produrre danni. Dipende dal tipo di terremoto, dalla distanza tra l'epicentro e la località interessata

nonché dalle condizioni geomorfologiche. La pericolosità è indipendente e prescinde da ciò che l'uomo ha costruito.

- **Esposizione** - È una misura dell'importanza dell'oggetto esposto al rischio in relazione alle principali caratteristiche dell'ambiente costruito. Consiste nell'individuazione, sia come numero che come valore, degli elementi componenti il territorio o la città, il cui stato, comportamento e sviluppo può venire alterato dall'evento sismico (il sistema insediativo, la popolazione, le attività economiche, i monumenti, i servizi sociali).
- **Vulnerabilità** - Consiste nella valutazione della possibilità che persone, edifici o attività subiscano danni o modificazioni al verificarsi dell'evento sismico. Misura da una parte la perdita o la riduzione di efficienza, dall'altra la capacità residua a svolgere ed assicurare le funzioni che il sistema territoriale nel suo complesso esprime in condizioni normali. Ad esempio nel caso degli edifici la vulnerabilità dipende dai materiali, dalle caratteristiche costruttive e dallo stato di manutenzione ed esprime la loro resistenza al sisma.

Le indagini per la valutazione del rischio sismico possono quindi essere suddivise in due fasi.

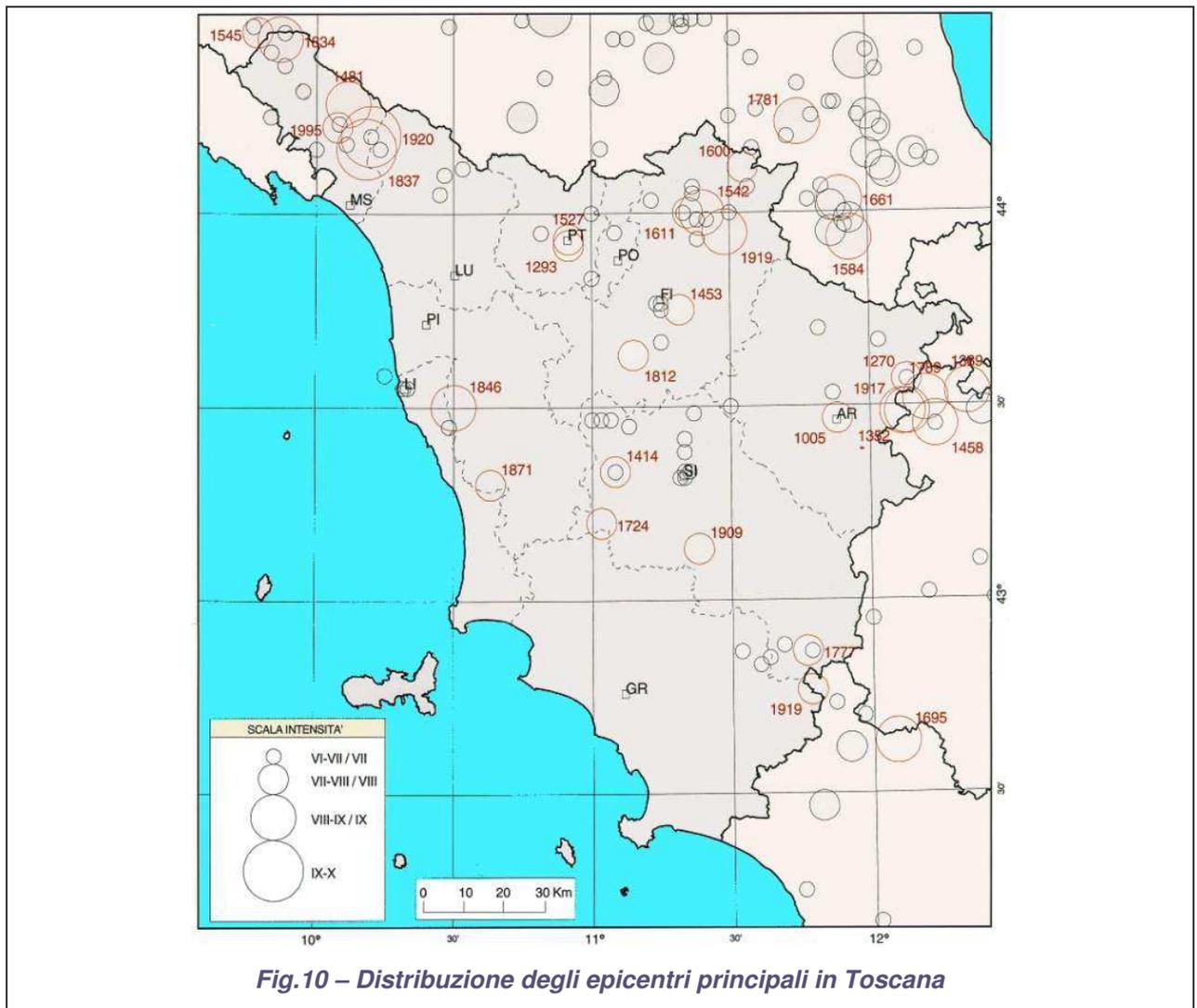
4.1 - Macrozonazione sismica

Consiste nell'individuazione generale della pericolosità sismica in una regione, fornendo una visione generale del potenziale sismico di un'ampia area, individuando prioritariamente le aree sismiche e quelle non sismiche, successivamente la ricorrenza dei terremoti e la valutazione della scuotibilità.

Integrando i dati storici con la ricostruzione delle strutture geodinamiche si ottiene un modello sismotettonico che individua le sorgenti sismiche, le leggi di ricorrenza, la massima magnitudo ed i relativi parametri: caratterizzata la sorgente attraverso un modello probabilistico di ricorrenza, è possibile passare alla previsione per ogni sito dello scuotimento e dei parametri di moto. La distribuzione degli epicentri all'interno della Regione è schematizzata nell'illustrazione seguente.

La macrozonazione sismica del territorio italiano è stata aggiornata nell'ambito del **Ord. P.C.M. n°3274 del 20.03.2003** (*"Criteri generali per la riclassificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*).

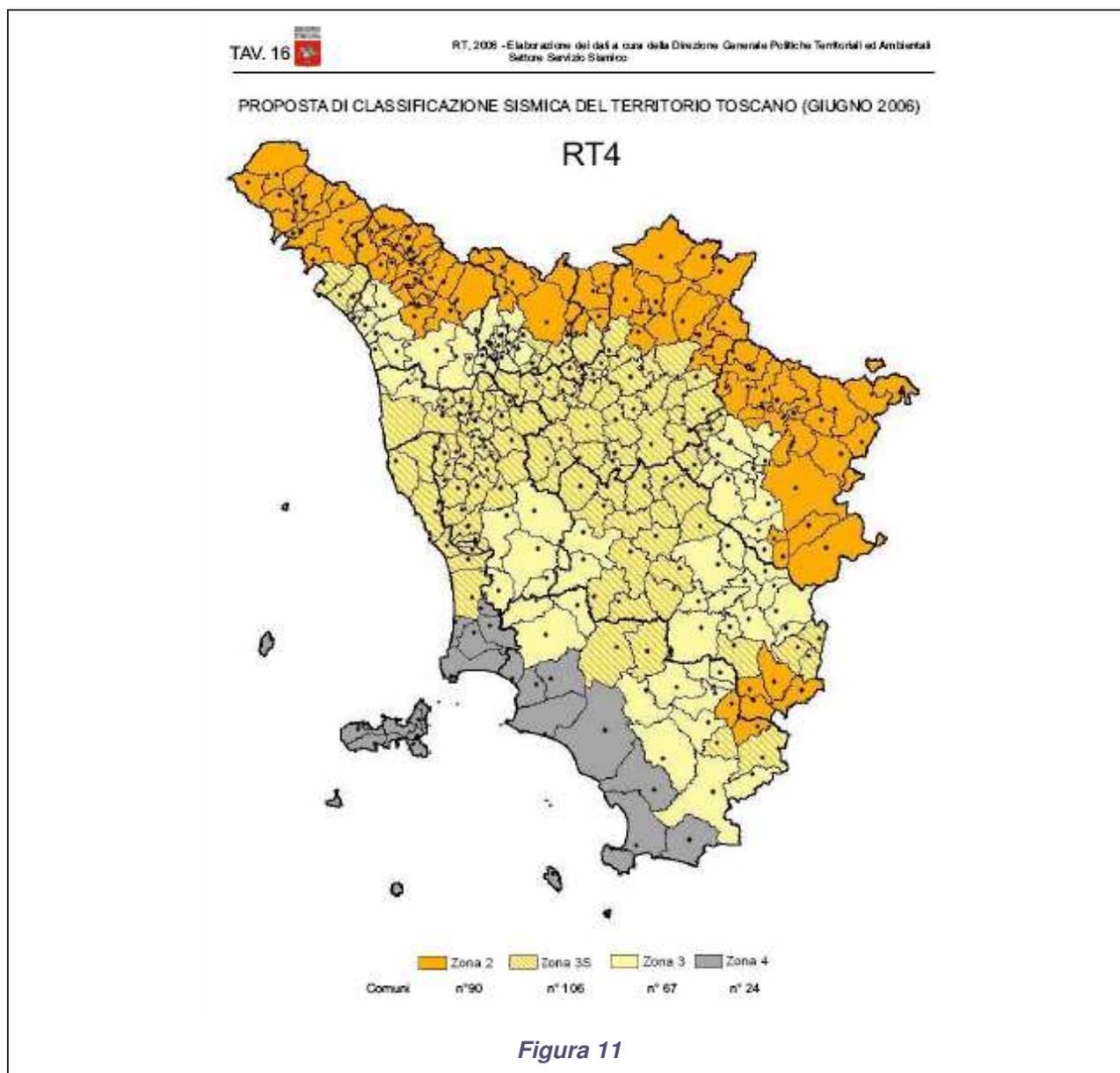
Tale ordinanza ha approvato i criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e le normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, in accordo con le Regioni alle quali restano ferme le competenze di cui all'art. 93, comma 1, lettera g) del decreto legislativo 31 marzo 1998, n. 112. Essa riclassifica il territorio nazionale sulla base della Proposta 1998 del Gruppo di Lavoro (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e Servizio Sismico Nazionale) istituito dal Dipartimento della Protezione Civile.



La nuova classificazione distingue 4 zone: le prime tre corrispondono alle vecchie zone definite dalla vecchia **L. n°64 del 02.02.74**; la quarta è invece di nuova introduzione ed in essa è data facoltà alle regioni di imporre l'obbligo della progettazione antisismica. In particolare si prevede per la Toscana l'inserimento di 4 comuni della provincia di Arezzo in zona 2, l'inserimento di 77 comuni in zona 3 e 24 comuni in zona 24 tra quelli che non erano classificati sismici con D.M. del 1982: sono invece confermati in zona 2 tutti i comuni già classificati sismici in II^a categoria, che ad oggi salgono quindi a 186 comuni.

Recentemente la Regione Toscana, con **D.G.R. n°431 del 19.06.2006** e in ottemperanza alla normativa nazionale, ha approvato la proposta di nuova classificazione sismica del territorio regionale, nel cui ambito viene istituita una nuova classe (**3S**) intermedia tra le classi attuali 2 e 3, al cui interno non viene diminuito il livello di protezione e le costruzioni vengono progettate e realizzate con le azioni sismiche della classe 2 (vedi sotto).

Il Comune di Prato – in particolare – ricade tra i 106 Comuni che vengono trasferiti dalla Zona 2 alla **Zona 3S**, caratterizzata dai seguenti parametri.



Decreti fino al 1984	Grado di sismicità	9
Classificazione 2003	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico	0.25
Proposta Toscana 2006	Accelerazione media (g)	0.14

Per evitare una sovrastima della pericolosità, con conseguenti ingiustificati vincoli all'utilizzazione del territorio, la Regione Toscana ha da tempo introdotto una differenziazione in ulteriori tre classi dei Comuni sismici di II° categoria (contenuta nella **D.C.R. 94/1985**): le tre classi vengono differenziate in base a diversi valori convenzionali della massima accelerazione del terreno, ai quali sono anche associati dei valori di massima intensità macrosismica. Prato fu inserito, in particolare, nella **classe 1**, caratterizzata dai seguenti parametri:

<i>accelerazione convenzionale massima</i>	$a = 0,35 g.$
<i>intensità massima</i>	$I_{max} > 8.5$

4.2 - Microzonazione sismica

La microzonazione deve sostanzialmente individuare la presenza di terreni dinamicamente instabili e stimare le accelerazioni che si possono determinare sui terreni dinamicamente stabili. Esistono infatti particolari situazioni geologiche e geomorfologiche che determinano variazioni nella risposta sismica locale (amplificazione e attenuazione delle onde sismiche, fenomeni di liquefazione) e quindi condizioni di pericolosità indotta. In considerazione della sua classificazione, per il Comune di Firenze vanno presi in esame i seguenti tipi di effetti dinamici locali riportati nella Tab.1 della D.C.R. 94/85.

Si ricorda inoltre che il **Dipartimento della Protezione Civile**, con **Ordinanza n°2788 del 12.06.98**, ha individuato le zone ad elevato rischio sismico del territorio nazionale. Ciò è stato fatto valutando la massima intensità sismica registrata misurata con la Scala MERCALLI-SIEBERG, e l'**indice di rischio** (definito come il *rapporto tra la percentuale di popolazione coinvolta in crolli e la percentuale di patrimonio danneggiato*).

I Comuni ad elevato rischio sismico sono stati identificati come quelli che hanno indice di rischio superiore al valore medio nazionale ($im = 0,0455$), calcolato pesando ciascun comune con la sua popolazione. Firenze, in particolare, è classificato non a rischio essendo caratterizzato dai seguenti parametri:

<i>indice di rischio:</i>	$i = 0,0188$
<i>intensità massima osservata:</i>	$VIII MCS$

4.3 – Azione sismica (art. 3.2 Norme Tecniche Costruzioni)

L'azione sismica sulle costruzioni è generata dal moto non uniforme del terreno per effetto delle onde sismiche: il moto sismico sollecita la struttura provocandone la risposta dinamica, che deve essere verificata negli aspetti di sicurezza e di prestazioni attese. Sotto l'effetto dell'azione sismica allo Stato Limite Ultimo le strutture, pur subendo danni di rilevante entità, devono mantenere una resistenza e rigidità residua nei confronti delle azioni orizzontali e dei carichi verticali.

Di seguito verranno determinati alcuni parametri necessari alla determinazione dell'azione sismica di progetto, di pertinenza del geologo, rimandando l'analisi degli spettri di risposta elastici e degli spettri di progetto relativi ai vari stati limite alle fasi successive della progettazione.

4.3.1 - Categoria del suolo di fondazione

Ai sensi del punto 3.2.1 delle "Norme Tecniche per le Costruzioni", ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è necessario valutare l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto in superficie, prendendo in considerazione il terreno compreso tra il piano di posa delle

fondazioni ed un substrato rigido di riferimento. A tal fine la norma individua sette diversi tipi di sottosuolo (cinque indicati con la lettera da A a E, due indicati con S1 e S2) a rigidezza via via decrescente (vedi sotto)

Tipo di terreno	Descrizione stratigrafica del profilo	Parametri		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (colpi/30 cm)	c_u (kPa)
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m	> 800	-	-
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità	360-800	> 50	> 250
C	Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille consistenti, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri	180-360	15-50	70-250
D	Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti	< 180	< 15	< 70
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali con valori $V_{s,30}$ di simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso fra 5 e 20 m, giacenti su un substrato di materiale più rigido con valore di $V_{s,30}$ > 800 m/s			
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato dello spessore di almeno 10 m di argille /limi di bassa consistenza con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto d'acqua	< 100 (indicativo)	-	10-20
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti A-E o S1			

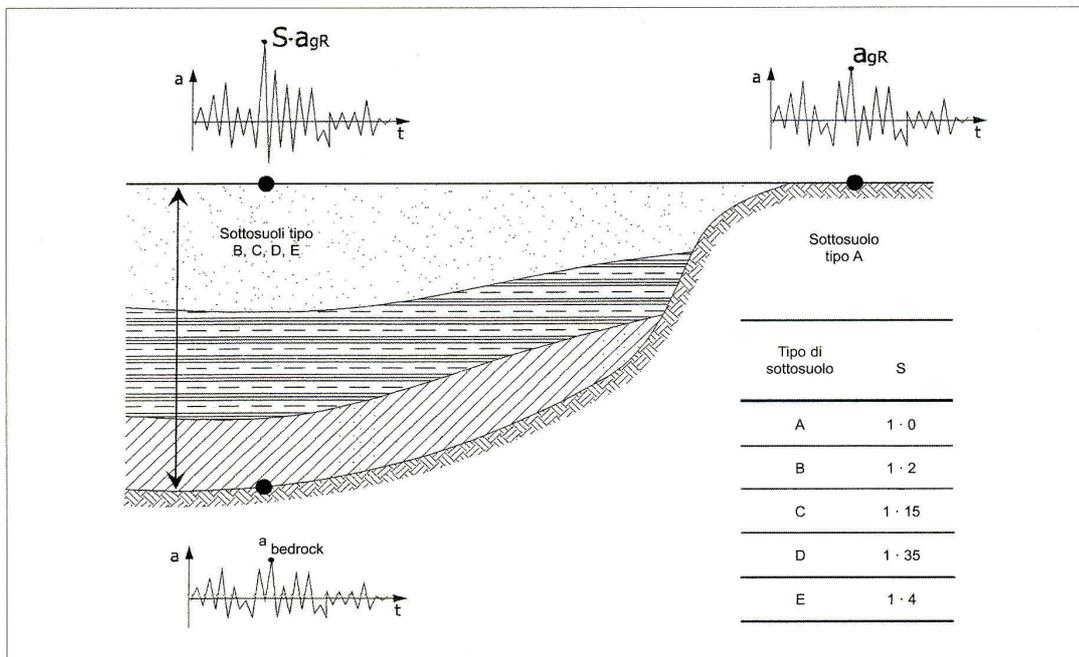
In considerazione dei dati in nostro possesso acquisiti con il presente lavoro tramite l'indagine sismica, possiamo affermare che il substrato di fondazione dell'edificio in oggetto rientra all'interno della categoria denominata **C** - **“Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille consistenti, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri”**.

4.3.2 – Fattori per il calcolo dell'azione sismica

La pericolosità sismica di un sito è sintetizzata in un unico parametro definito come la massima accelerazione di riferimento attesa su un suolo rigido, con riferimento al periodo di ritorno e all'equivalente probabilità di eccedenza. La forma dello spettro dell'azione di progetto varia in funzione dei vari periodi e di alcuni fattori (introdotto dall'Eurocodice EC8) che tengono conto delle condizioni fisiche del sito in oggetto.

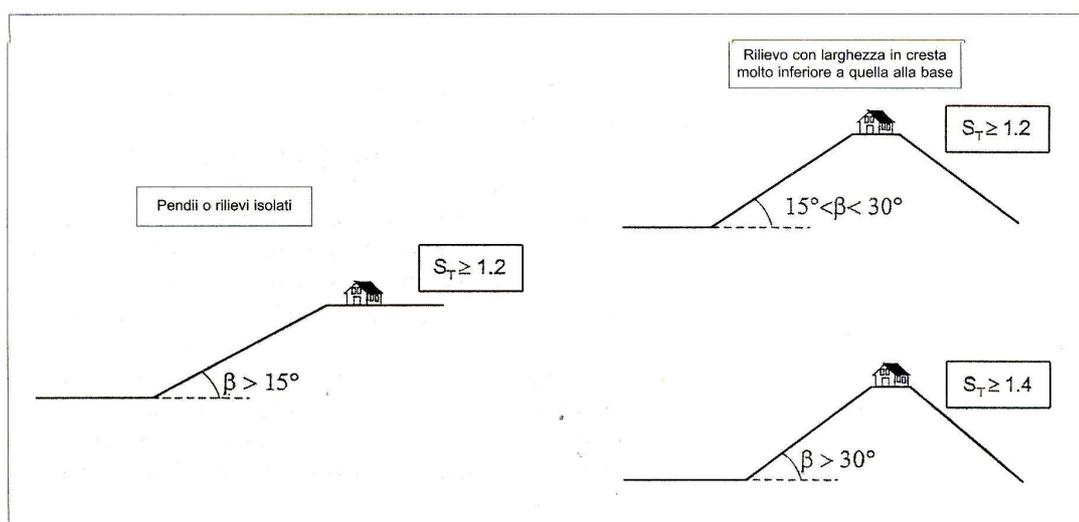
1) - Fattore del terreno S – E' questo un fattore moltiplicativo dell'accelerazione di picco su suolo rigido (tipo A) e fornisce – quindi – l'accelerazione di picco alla superficie dei sottosuoli da B ad E (vedi Fig.12). Sulla base della categoria di suolo che caratterizza il sito in esame, tale fattore assume il valore:

$S = 1,25$



Rappresentazione schematica del significato delle accelerazioni su affioramento rigido (sottosuolo tipo A) e alla superficie dei sottosuoli da B ad E. Da notare che l'accelerazione dei sottosuoli da B ad E si ottiene moltiplicando il fattore di sottosuolo S per l'accelerazione massima su affioramento rigido (sottosuolo di tipo A), indicata nell'EC8 con il simbolo a_{gR} (reference peak ground acceleration)

Figura 12



Valori del fattore di amplificazione topografica S_T secondo l'EC8 per: (a) pendii e rilievi isolati e (b) con larghezza in cresta molto minore di quella alla base

Figura 13

2) - Fattore della topografia St – L'Eurocodice 8 suggerisce anche di tener conto degli effetti topografici, mediante l'applicazione del coefficiente di amplificazione St . Potendo trascurare questo effetto per aree caratterizzate da pendenza inferiore a 15° (vedi Fig.13), nel nostro caso si ha:

$St = 1,0$

4.4 - Liquefazione

Ai sensi del punto 2.3 delle “*Norme Tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni*” allegate alla O.P.C.M. 3274/2003, per liquefazione si intende una diminuzione di resistenza al taglio causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti fino all'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

Deve essere verificata la suscettibilità alla liquefazione in presenza di terreni granulari e di falda acquifera in prossimità della superficie topografica. Altresì – per edifici con fondazioni superficiali - tale verifica può essere omessa se i terreni rispondono ad almeno una dei seguenti requisiti granulometrici e geotecnici:

- ✓ livello sabbioso saturo a profondità >15 mt. dal piano di campagna
- ✓ contenuto in argilla $>20\%$ con $Ip > 10$
- ✓ contenuto di limo $>35\%$ e resistenza $N > 20$
- ✓ frazione fine trascurabile e resistenza $N > 25$

Nel nostro caso, non siamo in una situazione dove “*la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda*”, per cui la verifica alla suscettibilità alla liquefazione può essere omessa.

5 – VALUTAZIONI GEOTECNICHE

5.1 – Considerazioni sull'intervento in progetto

5.1.1 – Analisi dell'intervento ed attribuzione della classe d'importanza

Il progetto prevede la realizzazione del nuovo polo scolastico di Paperino, in particolare la realizzazione del primo lotto dei lavori: in particolare è prevista la realizzazione di un edificio che si svilupperà su un unico piano (vedi prospetto in Fig.13), senza locali interrati. Trattandosi di un edificio pubblico e sensibile, dovrà avere garantita una lunga vita utile di progetto.

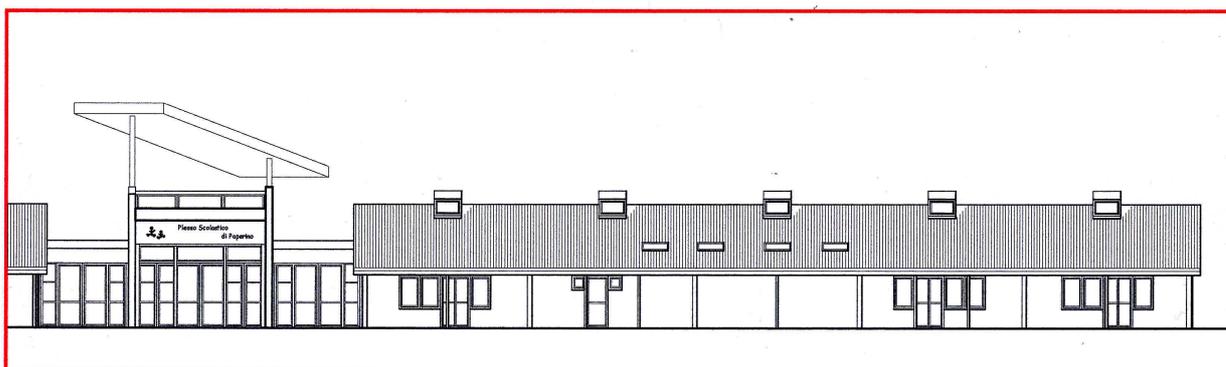


Fig.14 – Prospetto laterale su Via Como (scala indicativa)

Tale vita – stabilita dal committente e dal progettista – definisce la classe di importanza del fabbricato in progetto. Ai sensi del punto 2.5 del Testi Unico sulle Costruzioni, un edificio scolastico come quello in progetto rientra nella **classe 2**: questa raggruppa manufatti con vita utile di 100 anni, per i quali bisogna considerare i fenomeni naturali con tempo di ritorno di 1000 anni.

A tale classe sono assegnati valori dell'accelerazione sismica pari a 1,40 volte il valore assegnato alla classe 1 (**fattore di importanza = 1,40**).

5.1.2 – Soluzione fondale prescelta e quota d'imposta

Come già detto nel paragrafo precedente, il nuovo edificio scolastico non avrà piani interrati; inoltre – sviluppandosi su un unico piano – trasmetterà ai terreni di fondazione carichi generalmente contenuti. In considerazione del modello geotecnico ricostruito nei paragrafi precedenti – che ha escluso la presenza di livelli geotecnicamente non affidabili all'interno del volume significativo - riteniamo di poter adottare una soluzione fondale convenzionale, basata su un reticolato di travi rovesce caratterizzate da una larghezza **B = 100 cm**. (tale modello fondazionale dovrà naturalmente essere confrontato con le esigenze strutturali, quindi dovrà essere approvato o modificato dal progettista delle strutture). Le fondazioni poggeranno quindi sui terreni appartenenti all'Unità A; in considerazione dei parametri caratteristici di quest'ultima, possiamo suggerire un piano d'imposta superficiale a **D = 120 cm** rispetto all'attuale piano di campagna.

5.1.3 – Verifiche geotecniche allo Stato Limite Ultimo (SLU)

L'Eurocodice 7 e le Norme Tecniche per le Costruzioni prevedono, per la definizione del grado di sicurezza di una struttura relativamente alla possibilità di rottura del terreno di fondazione, un approccio di tipo semiprobabilistico adottando il concetto di **Stato Limite ultimo (SLU)**: con tale termine si intende lo stato al superamento del quale si ha il collasso strutturale o fenomeni che mettono fuori servizio irreversibile la struttura.

Per **Stato Limite di esercizio (SLE)** – invece – si intende lo stato al superamento del quale corrisponde la perdita di funzionalità che condiziona o limita la prestazione dell'opera.

Nella verifica agli stati limite ultimi per rottura o per eccessiva deformazione nel terreno e negli elementi strutturali, deve verificarsi la seguente disuguaglianza:

$$E_p \leq R_d$$

dove il primo termine rappresenta il valore di progetto degli effetti di tutte le azioni, mentre il secondo rappresenta il valore di progetto della corrispondente resistenza del terreno e/o della struttura.

Sia le Norme Tecniche per le Costruzioni che l'Eurocodice 7 non specificano quali teorie geotecniche devono essere utilizzate per determinare i vari parametri fisico-meccanici dei terreni, la scelta delle quali spetta al tecnico incaricato. Nel dimensionamento delle opere di fondazione e nelle verifiche di resistenza del terreno, le azioni sono quelle trasmesse dalle opere delle azioni moltiplicate per i coefficienti A2 riportati nella Tab. 7.2. Il Testo Unico delle Costruzioni: invece, i parametri geotecnici da adottare nelle verifiche (**valori di progetto**) sono ottenuti applicando ai parametri caratteristici delle varie unità i coefficienti riduttivi parziali γ_m riportati nella colonna **M2** n tabella 7.2.1 (vedi sotto).

			Valori di progetto
<i>Tangente dell'angolo d'attrito</i>	tg ϕ	1,25	0.31
<i>Coesione efficace (Kg/cmq)</i>	c'	0.114	0.081
<i>Coesione non drenata (Kg/cmq)</i>	c_u	1,40	0.24
<i>Peso dell'unità di volume (gr/cmc)</i>	γ	1,00	1.83

Per quanto attiene invece alla valutazione dei cedimenti (verifica in condizioni di **Stato Limite di Esercizio**), il Testo Unico non impone obbligatoriamente l'utilizzo del valore caratteristico inteso come frattile 5%, che tra l'altro appare eccessivamente conservativa: è quindi possibile utilizzare i parametri medi con il classico metodo di BOUSSINESQ, considerando i valori del terreno fino alla profondità dove l'incremento di pressione verticale diventa trascurabile.

5.2 - Capacità portante dei terreni di fondazione

In considerazione della natura litologica del substrato evidenziata, riteniamo opportuno privilegiare un comportamento fisico-meccanico al di sotto delle fondazioni regolato eminentemente dalla coesione. La valutazione della capacità portante viene quindi eseguita utilizzando le teorie per i terreni sciolti completamente coesivi.

Il valore di progetto per la resistenza portante verticale è calcolato mediante la formula di TERZAGHI (1943) e BUISMAN (1935), opportunamente integrate dai coefficienti correttivi introdotti da MEYERHOF (1953), VESIC (1970) e BRINCH-HANSEN (1970), contenuta nell'Annesso D dell'EUROCODICE 7

$$R_d = \left[(c * N_c * S_c * G_c) + (\gamma * D * N_q * S_q * G_q) + \left(\frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma * S_\gamma * G_\gamma \right) \right]$$

dove: c = coesione dell'unità di terreno considerata;
 γ = peso di volume del terreno;
 D = quota d'imposta delle fondazioni;
 N_c, N_q, N_γ = fattori di capacità portante, funzione dell'angolo d'attrito interno ϕ ;
 S_c, S_q, S_γ = fattori di forma della fondazione;
 G_c, G_q, G_γ = fattori che tengono conto dell'inclinazione del piano di campagna;
 K_c, K_q, K_γ = fattori che considerano l'inclinazione rispetto del carico applicato.

Applicando i coefficienti parziali per terreni puramente coesivi ed eseguendo la verifica in condizioni a breve termine (condizioni non drenate), tale formula viene così semplificata:

$$R_d = [(5,14 * c_u * S_c * G_c) + (\gamma * D * N_q * S_q * G_q)]$$

dove: c_u = valore di progetto della resistenza al taglio non drenato = 0,24 Kg/cm²
 γ = valore di progetto del peso di volume del terreno = 1,83 gr/cm³
 D = quota d'imposta delle fondazioni;
 N_q = 1
 S_c, S_q = 1
 G_c, G_q = 1
 K_c, K_q = 1

Dall'applicazione di detta formula si ricava il valore da adottare per la capacità portante dei terreni di fondazione in relazione a carichi verticali:

$q_s = 1,45 \text{ Kg/cm}^2$

5.3 – Compressibilità dei terreni di fondazione

Come già detto, i cedimenti dei terreni sono stati valutati in condizioni di Stato Limite di Esercizio (**SLE**): è quindi possibile utilizzare i parametri medi con il classico metodo di BOUSSINESQ, considerando i valori del terreno fino alla profondità dove l'incremento di pressione verticale diventa trascurabile. Le caratteristiche di compressibilità dei terreni vengono valutate ipotizzando la colonna di sedimenti fini come compressibili per espulsione d'acqua (*cedimento edometrico*). Si ricava quindi il cedimento utilizzando la formula:

$$S = H * \Delta q * m_v$$

dove: H = spessore iniziale dello strato di terreno considerato cedevole
 Δq = carico efficace permanente gravante sullo strato di terreno indagato
 m_v = coefficiente di compressibilità volumetrica

Non disponendo dei carichi che saranno realmente trasmessi dal futuro fabbricato, la compressibilità è stata calcolata ipotizzando un carico applicato pari alla resistenza portante verticale precedentemente calcolata ($q_s = 1,45 \text{ Kg/cm}^2$). Il cedimento è stato valutato per le cinque prove penetrometriche a disposizione, ottenendo i seguenti risultati in valore assoluto:

CPT 1	S = 2,15 cm
CPT 2	S = 2,46 cm
CPT 3	S = 2,50 cm
CPT 4	S = 2,10 cm
CPT 5	S = 2,10 cm

Si nota che tali valori risultano omogenei, e probabilmente saranno compatibili con le strutture in progetto. Di conseguenza modesti saranno anche i massimi cedimenti differenziali originati da cause stratigrafiche:

$\Delta S = 2,50 - 2,10 = 0,40 \text{ cm.}$

Probabilmente potranno essere più marcati i cedimenti differenziali indotti da un'eventuale eterogenea distribuzione del carico: tale circostanza potrà essere attentamente valutata una volta noti i carichi trasmessi dalle varie porzioni di fabbricato.

5.4 - Modulo di reazione del terreno K (di Winkler)

Il programma utilizza formule empiriche che danno valori non esatti del coefficiente di sottofondo: esso può tuttavia fornire un'utile indicazione sull'ordine di grandezza di tale parametro. Vengono usati tre metodi di calcolo, i cui risultati sono poi mediati.

1) Metodo di TERZAGHI (1955): consente di valutare K sulla base dell'effettivo comportamento del suolo, diviso in perfettamente non coesivo e perfettamente coesivo in considerazione del diverso comportamento sotto carico e della diversità dei parametri che le caratterizzano. Essendo in presenza di sedimenti prevalentemente coesivi, si usa la formula:

$$K = \left(\frac{K_a}{B} \right) * \left(L + \frac{0,5 * B}{1,5 * B} \right)$$

dove: K_a = modulo unitario dipendente da μ e resistenza alla compressione semplice

2) Metodo di VESIC (1961): si basa unicamente sulla teoria dell'elasticità, approssimando il terreno come perfettamente omogeneo e isotropo; e ricava il coefficiente di reazione di sottofondo con la relazione:

$$K = \frac{E}{B * (1 - \nu^2)}$$

dove: E = modulo edometrico, o modulo di elasticità, medio del terreno
 ν = modulo di POISSON.

3) Metodo di KOGLER & SCHEIDIG (1971): ricava K partendo dalle caratteristiche geometriche della fondazione e dallo spessore H del terreno considerato elastico, omogeneo e isotropo. Si usa la relazione:

$$K = b * \left(\frac{E}{B} \right)$$

dove b è un coefficiente dipendente dal rapporto H/B , variabile da 1,82 a 0,54.

Il calcolo è stato condotto sui valori penetrometrici mediati delle 5 verticali d'indagine, ottenendo il seguente risultato:

$K = 1.58 \text{ Kg/cm}^3$

6 – INDICAZIONI TECNICHE RIASSUNTIVE

Lo studio geotecnico sopra riportato ha avuto come oggetto la realizzazione del primo lotto del nuovo plesso scolastico di Peperino, che si articolerà su un solo piano fuori terra e senza piani interrati: per tale fabbricato è stato quindi ipotizzata una fondazione costituita da un reticolo di travi larghe $B = 100 \text{ cm}$. e poggianti a $D = 120 \text{ cm}$ dal piano di campagna.

Le indagini geognostiche in sito hanno messo in evidenza una stratigrafia costituita da sedimenti alluvionali recenti e caratterizzata da buona continuità in senso laterale. Questa è formata da una successione di livelli limoso-argillosi e ghiaioso-sabbiosi a varia consistenza.

Lo studio geotecnico – eseguito con appropriati programmi di calcolo automatico e impostato nelle condizioni di Stato Limite Ultimo (capacità portante) e Stato Limite di Esercizio (cedimenti) – ha portato ai seguenti risultati numerici.

Capacità portante	Resistenza portante verticale allo SLU	Kg/cm^2	1.45
Compressibilità <i>($Q = 1,45 \text{ Kg/cm}^2$)</i>	Max. cedimento assoluto	Cm	2.50
	Min. cedimento assoluto	Cm	2.10
	Max. cedimento differenziale	Cm	0.40
Modulo di reazione	(K di Winkler)	Kg/cm^3	1.58

Firenze, 15 dicembre 2006

Dott. Geol. ROBERTO CHECCUCCI



IGETECMA s.a.s.

Istituto Sperimentale di Geotecnica e Tecnologia dei Materiali

Concessione Ministeriale D.M. 54143 del 7/11/05

Rapporto di Prova n°214/06/S

SETTORE: Geofisica - sismica a rifrazione con onde P e SH
COMMITTENTE: Dott. Geol. R. Checcucci
CANTIERE: Complesso Scolastico di Paperino - Via Como, Prato
RIFERIMENTO: R.P.E. n°263/06

Indice:

1. Scopo dell'indagine
2. Correlazione fra velocità delle onde sismiche e parametri elastico-dinamici
3. Indagine mediante sismica a rifrazione
 - 3.1 Procedure di campagna
 - 3.2 Metodo di elaborazione dei dati
4. Presentazione dei dati
5. Risultati dell'indagine
6. Normativa sismica e calcolo del V_{s30}
7. Caratteristiche della strumentazione

Il Direttore del Laboratorio
Ing. F. Politi

Il Tecnico
Geol. L. Gambassi

1. Scopo dell'indagine

Su incarico del Dott. Geol. R. Checcucci è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche presso il Complesso Scolastico di Paperino in Via Como, Comune di Prato.

E' stato eseguito un profilo di sismica a rifrazione superficiale con registrazione delle onde P di compressione e delle onde SH di taglio, utilizzando un'equidistanza di 4 m per un totale complessivo di 92 m di rilievo. L'ubicazione è stata decisa insieme alla committenza.

Scopo delle indagini è stata la caratterizzazione sismostratigrafica dei terreni presenti, il calcolo dei parametri elastico-dinamici del terreno ed il calcolo del parametro V_s30 .

2. Correlazione fra velocità delle onde sismiche e parametri elastico-dinamici

Secondo i principi dell'elasticità dei materiali e le leggi che associano le deformazioni subite da un corpo agli sforzi ad esso applicati, è possibile stabilire relazione che forniscono i parametri elastici di un materiale conoscendo i valori di velocità delle onde sismiche di compressione P e di taglio S.

Poiché le tensioni e le deformazioni che si generano sotto l'azione del campo d'onda sismico sono di modesta entità, anche il terreno e le rocce sollecitate in questo ambito possono essere considerati in prima approssimazione come materiali omogenei, isotropi ed elastici, ed è quindi applicabile la legge di Hook (proporzionalità tra lo sforzo applicato σ_{ij} e la deformazione prodotta ϵ_{kl}) espressa come:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

nella quale le costanti di proporzionalità C_{ijkl} sono dette Moduli Elastici. Tali costanti definiscono le proprietà dei materiali, ed assumendo materiali isotropi ed elastici, diminuiscono da 81 a 5, di cui quattro hanno un preciso significato fisico (G , E , K , ν), mentre λ rappresenta una semplificazione nelle formule.

In senso più generale possono essere definite le costanti di Lamè λ e μ come caratteristiche elastiche indipendenti dalle direzioni lungo cui vengono applicate le tensioni o lungo cui vengono registrate le deformazioni. Queste due costanti sono definite dalle relazioni:

$$\lambda = (\nu E) / ((1 + \nu) (1 - 2\nu)) \quad \mu = E / 2 (1 + \nu)$$

Analogamente i due moduli E e ν possono essere espressi in funzione delle costanti di Lamè:

$$E = \mu (3\lambda + 2\nu) / (\lambda + \mu) \quad \nu = \lambda / 2 (\lambda + \mu)$$

Dimensionalmente i moduli elastici **G**, **E**, **K** e le due costanti di Lamè esprimono il rapporto tra una forza ed una superficie e sono quindi delle pressioni, mentre il rapporto di Poisson è adimensionale.

La costante **E** viene definita come rapporto tra sollecitazione e conseguente deformazione longitudinale rappresenta il modulo elastico del materiale (Modulo di Young). E' importante sottolineare che in campo dinamico si parla di modulo elastico dinamico, non statico, proprio perché tale modulo è ricavato dalle velocità delle onde sismiche.

La misura della resistenza del materiale al taglio viene definita come il rapporto tra deformazione e sforzo applicato, ed è chiamata Modulo di Taglio, **G**.

Il rapporto tra la tensione idrostatica e la deformazione cubica definisce il Modulo di compressione volumetrica o Bulk, **k**. Il Modulo di Poisson ν è definito come rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale. Un'ultima costante entra a far parte delle relazioni tra caratteristiche elastiche e velocità, la densità ρ del materiale.

Le velocità sismiche possono essere espresse tramite le costanti elastiche con le seguenti relazioni:

$$V_p = ((\lambda + 2 \nu) / \rho)^{1/2}$$
$$V_s = (\nu / \rho)^{1/2}$$

Pertanto avendo determinato i valori di V_p e V_s ed il valore ρ della densità del materiale attraversato, è possibile calcolare i valori delle costanti elastiche dinamiche che caratterizzano i terreni esaminati con le seguenti relazioni.

$$\nu = ((V_p^2 - 2 V_s^2) / (2 (V_p^2 - V_s^2)))$$
$$G = \rho V_s^2$$
$$E = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu)$$
$$K = (2 \rho V_s^2 (1 + \nu)) / (3 (1 - 2 \nu))$$

Merita di essere ricordato infine che i parametri ricavati da misure dinamiche, cioè mediante l'utilizzo delle velocità delle onde sismiche, hanno in genere valori superiori a quelli ricavati da prove statiche di laboratorio proprio per il diverso campo di sforzo applicato e deformazione raggiunta: le intense ma brevi sollecitazioni provocate dalla propagazione delle onde sismiche si mantengono, infatti, nel campo elastico delle deformazioni del materiale, per cui sebbene in teoria il modulo di Poisson sia considerato stress-indipendente ed i suoi valori risultino compresi tra 0.25 e 0.33, nei porous-media esso risulta stress-dipendente, e presenta un campo di variabilità più esteso e può addirittura arrivare, secondo GREGORY (1976), a valori negativi.

I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati, in alcuni sedimenti incoerenti e saturi i valori possono risultare uguali o superiori a 0.49; nelle sospensioni assume il valore di 0.5.

Il rapporto fra V_p e V_s non è costante e dipende dallo stato di saturazione e dalla pressione interstiziale dei pori, in Tabella I sono riportati valori medi delle V_p per i principali litotipi e il range di V_s relative comprese fra i rapporti di V_p/V_s di 1.9 e 3.5; questi valori sono da ritenere indicativi in quanto in particolari condizioni il rapporto V_p/V_s può aumentare.

Materiale	V P m/sec	V SH m/sec	
		VP/VSH 1.9 - 3.5	VP/VSH 1.9 - 3.5
Detrito superficiale alterato	300 - 600	86 - 158	171 - 316
Ghiaia, pietrisco, sabbia asciutta	500 - 900	143 - 263	257 - 474
Sabbia bagnata	600 - 1800	171 - 316	514 - 947
Argilla	900 - 2700	257 - 474	771 - 1421
Acqua	1430 - 1680	-	-
Arenaria	1800 - 4000	514 - 947	1143 - 2105
Scisti argillosi	2500 - 4200	714 - 1316	1200 - 2211
Calcere	2000 - 6000	571 - 1053	1714 - 3158
Sale	4200 - 5200	1200 - 2211	1486 - 2737
Granito	4000 - 6000	1143 - 2105	1714 - 3158
Rocce metamorfiche	3000 - 7000	857 - 1579	2000 - 3684

Tabella I – Velocità dei principali materiali.

3. Indagine mediante sismica a rifrazione

3.1 Procedure di campagna

Vengono stesi i cavi sismici lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite. L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di compressione può essere effettuata sia mediante massa battente da 60 Kg che tramite l'utilizzo del cannone sismico (minibang): l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro reso solidale con la fonte di energizzazione (*trigger*), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La produzione di onde di taglio viene effettuata ponendo una trave di legno in senso trasversale al profilo a diretto contatto con il terreno ed energizzando su entrambi i lati dopo averla adeguatamente caricata. Le registrazioni vengono effettuate alternativamente su entrambi i lati, mediante massa battente, e sommate con polarità scambiata in modo da migliorare l'individuazione dell'onda di taglio polarizzata che viene generata.

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (*shot points*), vengono disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi (*end*), esternamente (*offset*) ed a distanze variabili entro il profilo stesso (punti di scoppio centrali).

La profondità di investigazione è, in linea teorica direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza degli offset e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

3.2 Metodo di elaborazione dei dati

La procedura d'elaborazione dati consiste di due fasi: la lettura dei tempi d'arrivo ai vari geofoni dello stendimento per ciascuna energizzazione effettuata e la loro successiva elaborazione mediante metodi di calcolo.

I tempi di primo arrivo delle onde sismiche vengono riportati su diagrammi spazio-tempo (dromocrone) nei quali l'asse dei tempi ha l'origine coincidente con l'istante in cui viene prodotta l'onda sismica (*t₀*), mentre nelle ascisse si hanno le distanze relative fra i geofoni dello stendimento. Tali diagrammi consentono di determinare, nei punti di flesso, le variazioni di velocità fra i vari strati attraversati dai raggi sismici e, tramite elaborazioni, le profondità a cui si verificano tali variazioni.

In Tabella I sono riportate le relazioni tra le velocità medie delle onde sismiche compressionali P (esprese in m/sec) e le principali litologie, desunte da letteratura.

Il procedimento di elaborazione dei tempi d'arrivo per ottenere le profondità dei rifrattori, utilizza più metodi: il Metodo del tempo di ritardo (*delay time*), il Metodo del tempo di intercetta ed il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) proposto da Palmer (1980).

Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni (analisi della velocità e tempo-profondità) si determinano le velocità e quindi le profondità dei rifrattori individuati sulle dromocrone.

La funzione di analisi della velocità corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifratore (distanza intergeofonica), per cui la sua determinazione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche nel

rifratore stesso. Tramite un procedimento di migrazione dei dati, sia la funzione tempo-profondità che quella di analisi della velocità vengono calcolate per distanze intergeofoniche crescenti (da 0 a multipli interi dell'equidistanza dei geofoni): viene scelta poi quella distanza per la quale le curve presentano il miglior andamento rettilineo.

I limiti del metodo a rifrazione risiedono nella 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 nascosto". 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. Ambedue le situazioni stratigrafiche portano a sovraestimare o sottostimare lo spessore delle coperture. Quando da altri rilievi si è a conoscenza della possibile presenza di orizzonti sismici nascosti è possibile, in fase di elaborazione dei dati con il metodo G.R.M., la verifica dello spessore di tali zone, poiché negli strati nascosti si ha sempre un aumento di velocità con la profondità, ma il loro spessore è sottile e/o il contrasto di velocità con lo strato sottostante è così piccolo, per cui i raggi sismici che partono da questi strati vengono oscurati dai raggi che partono dallo strato sottostante. Gli strati a bassa velocità presentano invece una velocità sismica minore rispetto allo strato sovrastante (inversione di velocità), per cui alla loro interfaccia non si verifica una rifrazione critica e così non vengono evidenziati sul grafico tempo-distanza. L'individuazione di eventuali strati nascosti e/o inversioni di velocità viene effettuata attraverso il confronto fra i valori delle funzioni tempo-velocità misurate e quelle ricalcolate in base al valore di XY utilizzata per l'elaborazione (Palmer 1980).

4. Presentazione dei dati

Nella presente relazione vengono forniti i seguenti elaborati:

- planimetria con ubicazioni delle indagini
- sezioni sismiche, rappresentazioni bidimensionali delle velocità sismiche e degli spessori degli strati individuati lungo il profilo per le onde P e per le onde SH
- tabulati numerici delle velocità delle onde sismiche e degli spessori relativi ad ogni strato rilevato per ciascuna sezione sismica
- registrazioni di campagna e dromocrone relative
- tabulati numerici dei parametri elastici dinamici relativi ad ogni strato rilevato.

5. Risultati dell'indagine

Profilo Ps1 (92 m): l'elaborazione ha messo in evidenza la presenza di quattro orizzonti sismici sia per le onde di compressione P che per le onde di taglio SH.

Il primo orizzonte sismico ha uno spessore compreso tra 1.1 m e 1.6 m per le onde P e tra 0.7 m e 1.1 m per le SH. In questo orizzonte le velocità delle onde di compressione variano fra 275 m/sec. e 305 m/sec. e le velocità delle onde di taglio fra 59 m/sec. e 69 m/sec.; tali velocità sono riferibili a terreno naturale arenato.

Il secondo orizzonte sismico ha uno spessore variabile tra 4.0 m e 7.4 m per le onde P e tra 6.0 m e 7.1 m per le SH, raggiungendo rispettivamente profondità variabili fra 5.1 m e 8.8 m e fra 7.0 m e 8.0 m, con velocità media di 574 m/sec. per le P e di 202 m/sec. per le SH; questo orizzonte sismico può essere riferito, sulla base del sondaggio geognostico eseguito dalla D.L., a limo argilloso e argilla limosa.

Il terzo orizzonte sismico ha uno spessore variabile tra 20.4 m e 23.3 m per le onde P e tra 20.9 m e 22.6 m per le SH, raggiungendo rispettivamente profondità variabili fra 27.3 m e 30.2 m e fra 27.9 m e 30.3 m, con velocità media di 919 m/sec. per le P e di 364 m/sec. per le SH; questo orizzonte sismico può essere riferito all'insieme dei depositi alluvionali composti da livelli di limo argilloso, argilla limosa, sabbie e ghiaie sabbiose.

Le velocità delle onde sismiche lungo il quarto orizzonte sismico hanno un valore medio di 2248 m/sec. per le onde P e di 711 m/sec. per le onde SH, riferibili ad un netto aumento del grado di addensamento e/o consistenza dei depositi alluvionali.

In Tabella II sono riportati i parametri elastico-dinamici medi per ciascun orizzonte sismico.

	Vp m/sec.	Vsh m/sec.	ρ t / m ³	ν -	G MPa	E MPa	K MPa
Primo Orizzonte Sismico	296	64	1.6	0.48	7	19	131
Secondo Orizzonte Sismico	574	202	1.7	0.43	69	198	468
Terzo Orizzonte Sismico	919	364	1.8	0.41	238	671	1202
Quarto Orizzonte Sismico	2248	711	2.2	0.44	1112	3213	9635

Vp	Velocità media onde di compressione	G	Modulo taglio
Vsh	Velocità media onde di taglio	E	Modulo di Young
ρ	Densità	K	Modulo di rigidità volumetrica
ν	Modulo di Poisson		

Tabella II – Parametri elastico-dinamici

6. Normativa sismica e calcolo del parametro V_{s30}

L'Ordinanza P.C.M. n°3274/03 istituisce diverse categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto. Tali categorie vengono definite in base al calcolo del parametro V_{s30} che è dato da:

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1,N} (h_i/V_i)$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio SH (in m/sec.) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Categorie di Suolo di Fondazione	$V_s 30$ m/sec.	$N_{spt} - C_u$
A Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/sec, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5m.	$V_{s30} > 800$	
B Depositi di sabbie e ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/sec e 800 m/sec (ovvero resistenza penetrometrica $N_{spt} > 50$, o coesione non drenata $c_u > 250$ kPa)	$360 < V_{s30} < 800$	$N_{spt} > 50$ $C_u > 250$ kPa
C Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/sec e 360 m/sec ($15 < N_{spt} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa)	$180 < V_{s30} < 360$	$15 < N_{spt} < 50$ $70 < C_u < 250$ kPa
D Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 180$ m/sec ($N_{spt} < 15$, $c_u < 70$ kPa)	$V_{s30} < 180$	$N_{spt} < 15$ $C_u < 70$ kPa
E Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di V_{s30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{s30} > 800$ m/sec.	$V_{s30} < 360$	
S1 Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($I_p > 40$) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 100$ m/sec.	$V_{s30} < 100$	$10 < C_u < 20$ kPa
S2 Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.		

Tabella III – Categorie di suolo di fondazione

In Tabella III sono riportate le categorie di suolo in base ai valori di V_{s30} e, per i materiali non litoidi, i valori di N_{spt} e di C_u , mentre nella Tabella IV è riportato il valore medio di V_{s30} calcolato per la linea sismica eseguita e la relativa categoria di appartenenza rispetto ai valori di riferimento della normativa.

Profilo	V_{s30}	Categoria
Ps1	279	C

Tabella IV – Risultati dell'indagine

7. Caratteristiche della strumentazione

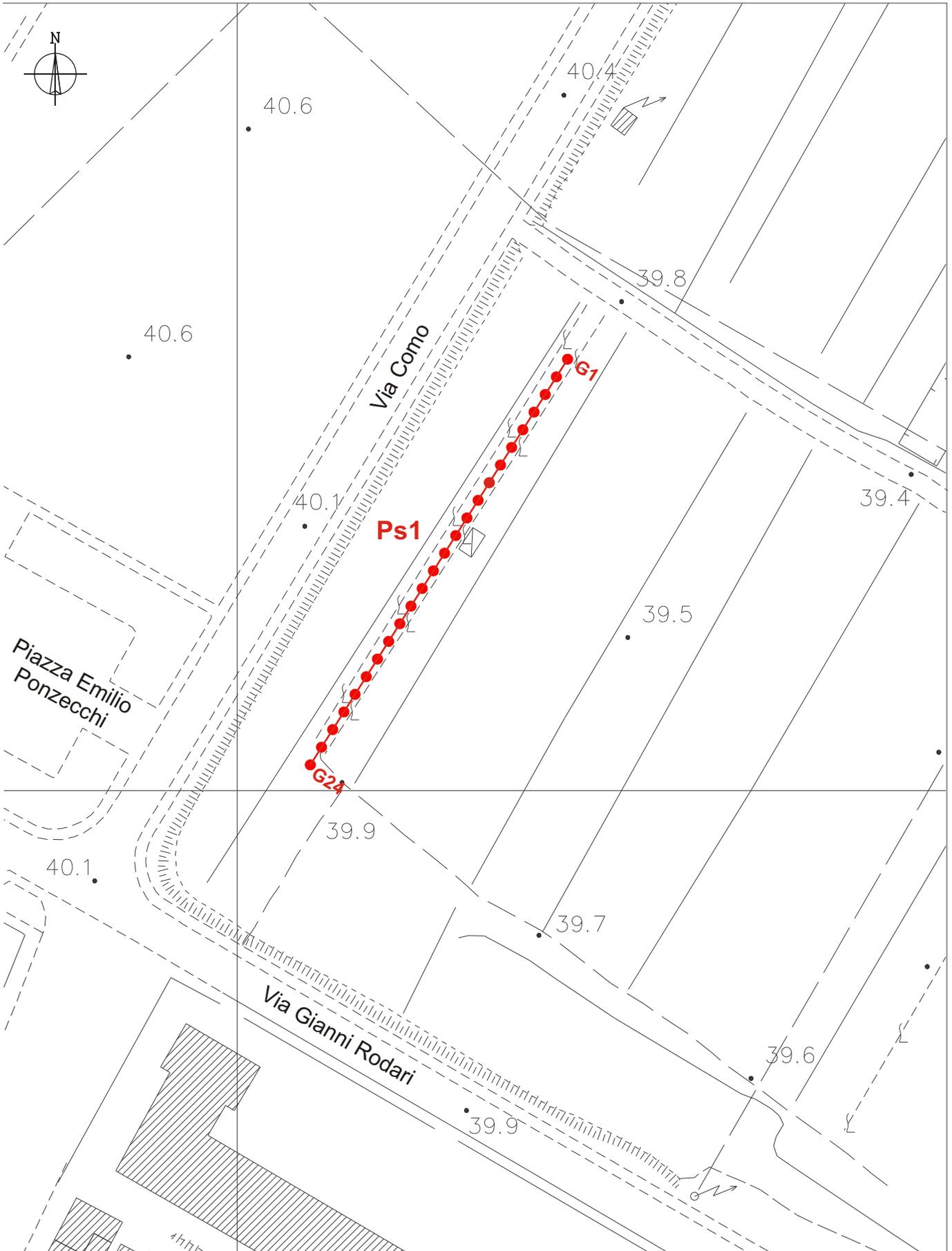
Il sistema di acquisizione usato nella presente campagna d'indagini è composto da un sistema modulare della Geometrics così configurato:

Sismografo GEODE 48 canali (2 moduli a 24 canali) con Controller Stratavisor NZC:

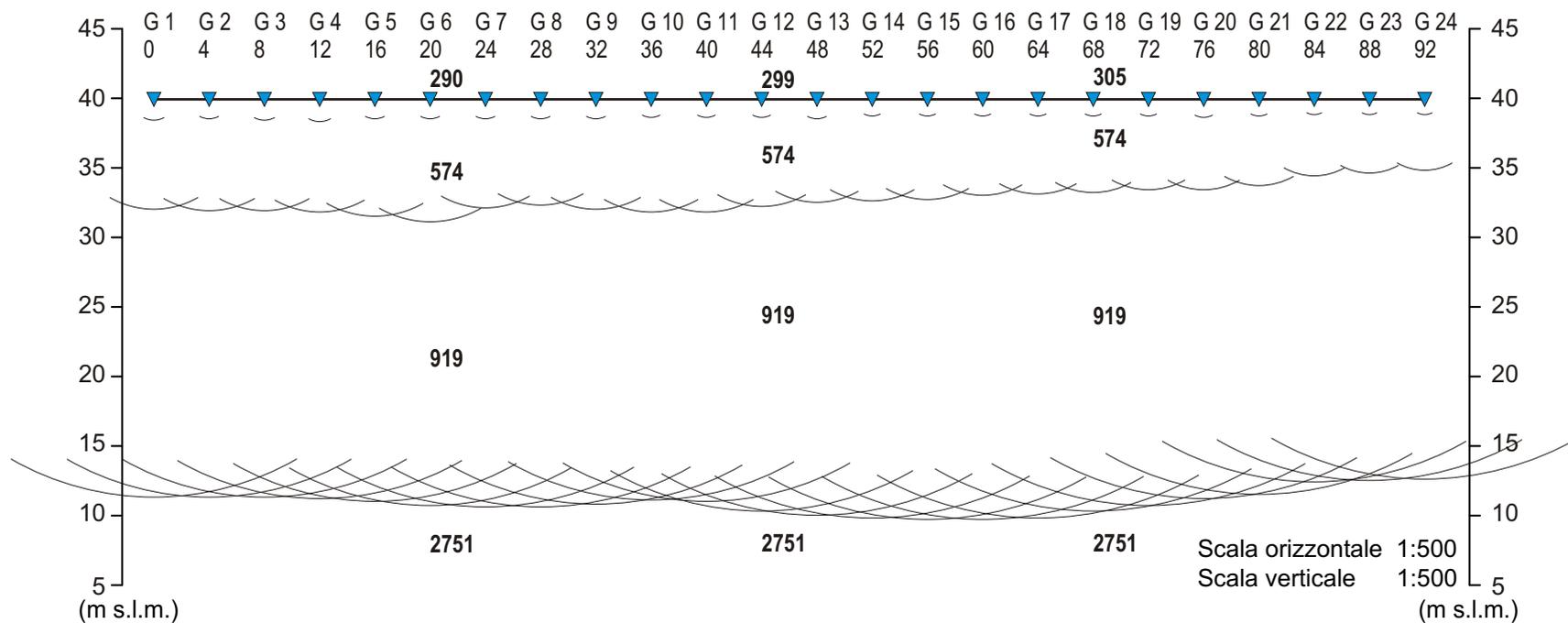
- risoluzione segnale A/D 24 bit;
- escursione dinamica 144 dB, 110 dB istantanea a 2 ms;
- passo di campionamento da 0.02 a 16 ms indipendente dal tempo d'acquisizione;
- fino a 64.000 campioni per traccia;
- distorsione 0.0005% a 2 ms, 1.75 – 208 Hz;
- amplificazione del segnale da 0 a 36 dB;
- filtri analogici anti-aliasing a 90 dB della frequenza di Nyquist;
- filtri digitali low-cut, high-cut, notch a 24-48 dB/oct;
- precisione trigger in sommatoria 1/32 del passo di campionamento;
- pre-trigger fino a 4096 campioni, delay sino a 10000 ms;
- salvataggio dati in formato SEG-2 su hard-disk incorporato;
- 24 geofoni verticali con frequenza propria di 14 Hz;
- 24 geofoni orizzontali con frequenza propria di 4.5 Hz;
- sistema di starter (trigger) mediante sensore accoppiato alla sorgente di energia;
- mazza da 5 Kg, minibang calibro 8 KILN, grave da 30/60 kg, pendolo da 30kg.

Paperino (PO) Ubicazione profilo di sismica a rifrazione

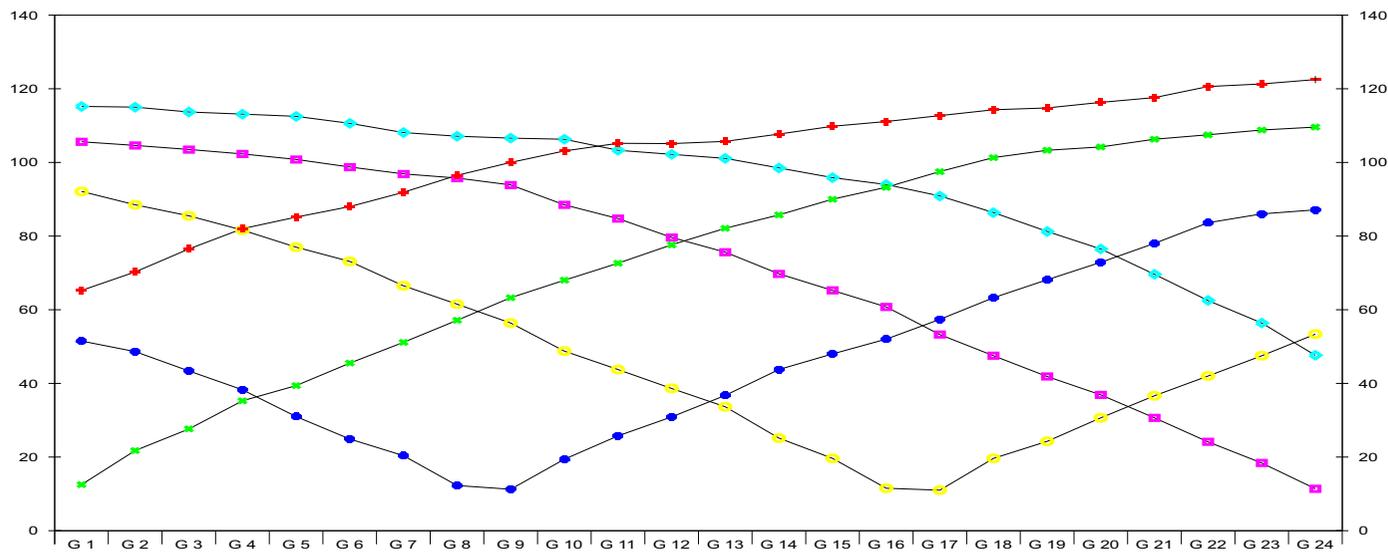
Scala 1:1000



Profilo di sismica a Rifrazione Ps1 - onde P



Dromocrone



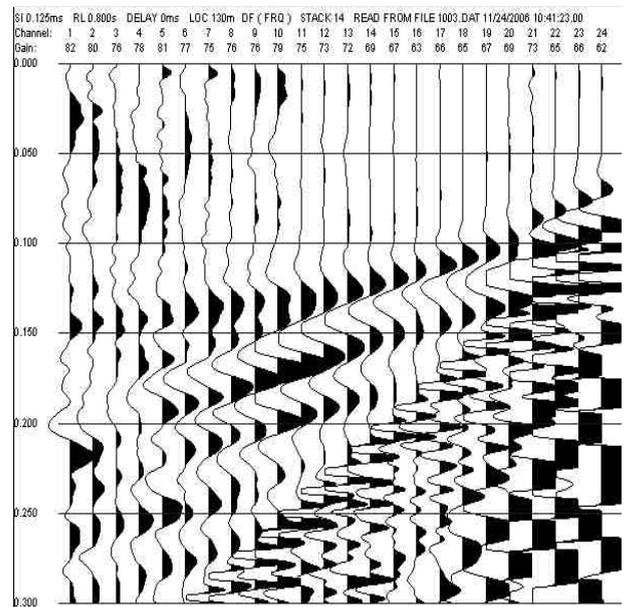
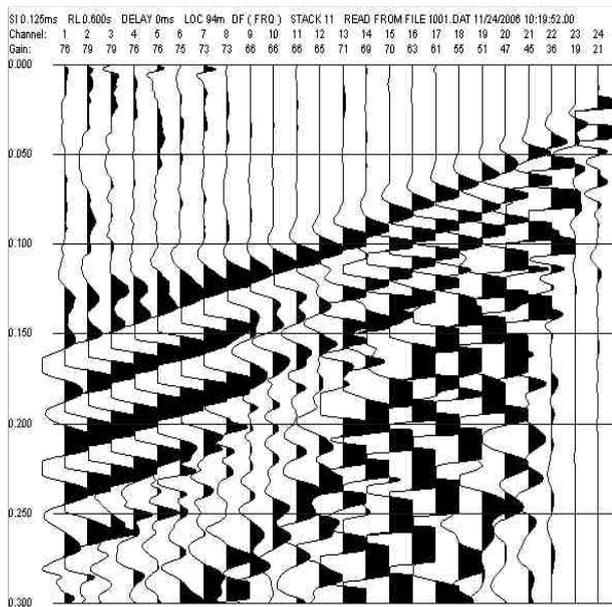
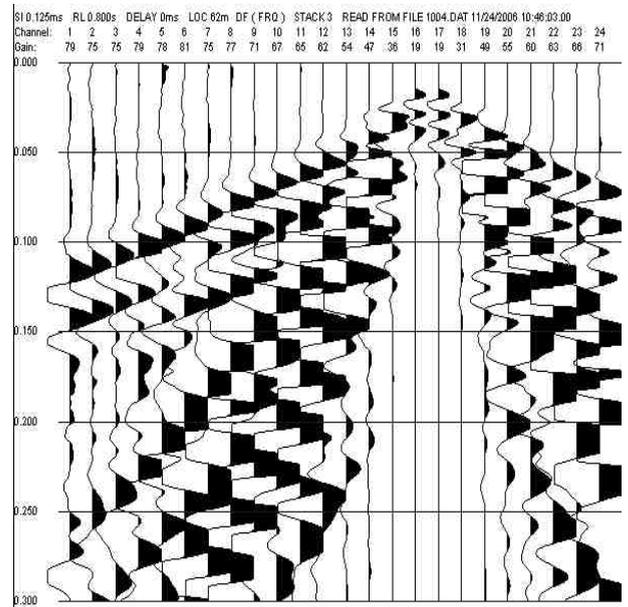
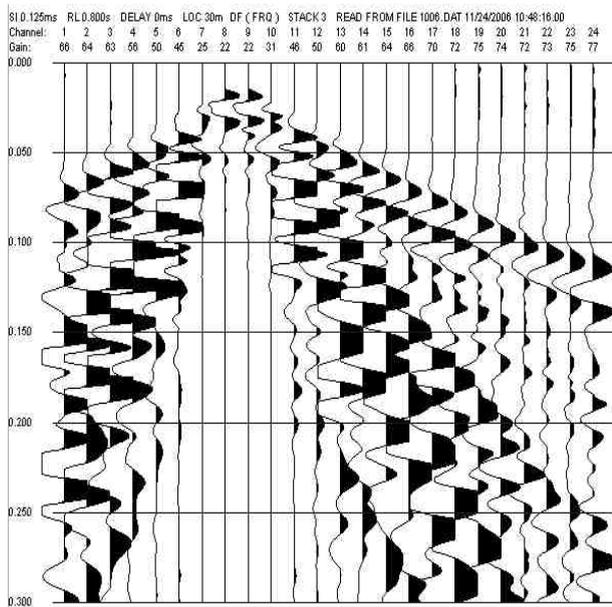
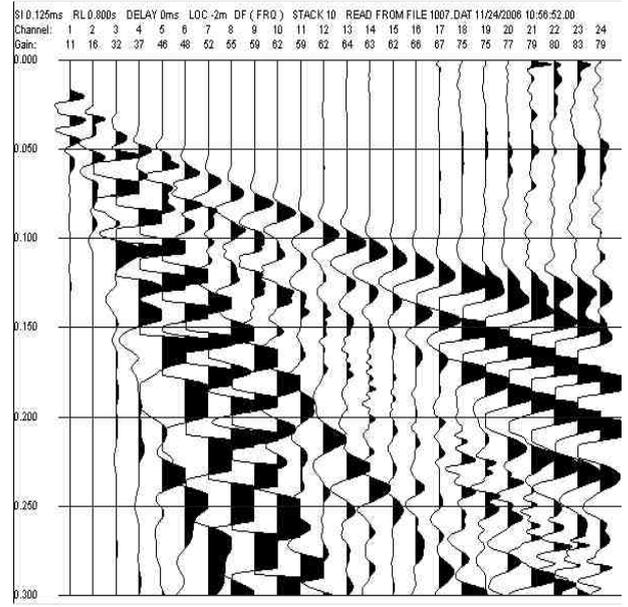
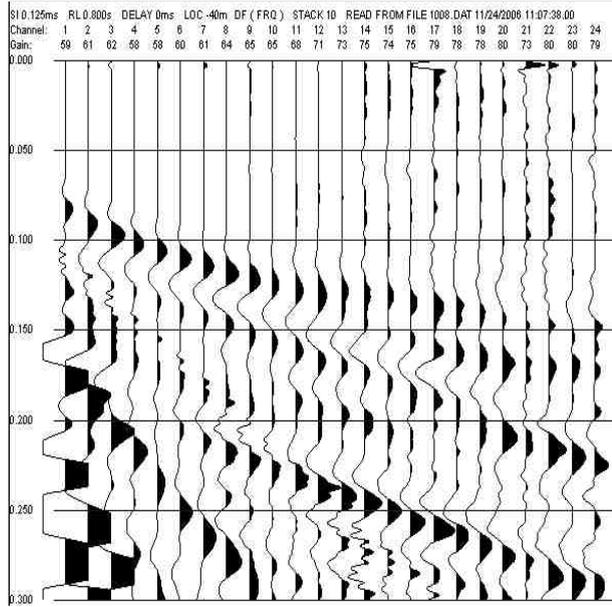
Dati profilo di sismica a rifrazione Ps1 - onde P

Geo. N°	ShotA ms	ShotB ms	ShotC ms	ShotD ms	ShotE ms	ShotF ms
1	65.25	12.50	51.50	92.12	105.60	115.20
2	70.25	21.75	48.62	88.50	104.60	115.00
3	76.50	27.62	43.37	85.50	103.50	113.70
4	82.00	35.25	38.25	81.62	102.30	113.10
5	85.12	39.37	31.00	77.00	100.80	112.50
6	88.00	45.50	24.87	73.12	98.75	110.60
7	91.87	51.12	20.37	66.50	96.87	108.10
8	96.50	57.12	12.25	61.50	95.75	107.10
9	100.00	63.25	11.25	56.37	93.87	106.60
10	103.10	68.00	19.37	48.75	88.50	106.30
11	105.20	72.62	25.75	43.75	84.75	103.30
12	105.10	77.62	30.87	38.62	79.62	102.20
13	105.70	82.12	36.75	33.62	75.62	101.10
14	107.70	85.75	43.75	25.12	69.75	98.50
15	109.80	90.00	48.00	19.62	65.25	95.87
16	111.10	93.25	52.00	11.50	60.75	94.00
17	112.70	97.50	57.37	11.00	53.25	90.87
18	114.30	101.30	63.25	19.62	47.50	86.37
19	114.80	103.30	68.12	24.25	41.87	81.25
20	116.30	104.20	72.87	30.62	36.87	76.50
21	117.60	106.30	78.00	36.62	30.62	69.62
22	120.60	107.50	83.62	42.00	24.12	62.50
23	121.30	108.80	86.00	47.50	18.37	56.37
24	122.50	109.60	87.12	53.37	11.37	47.62

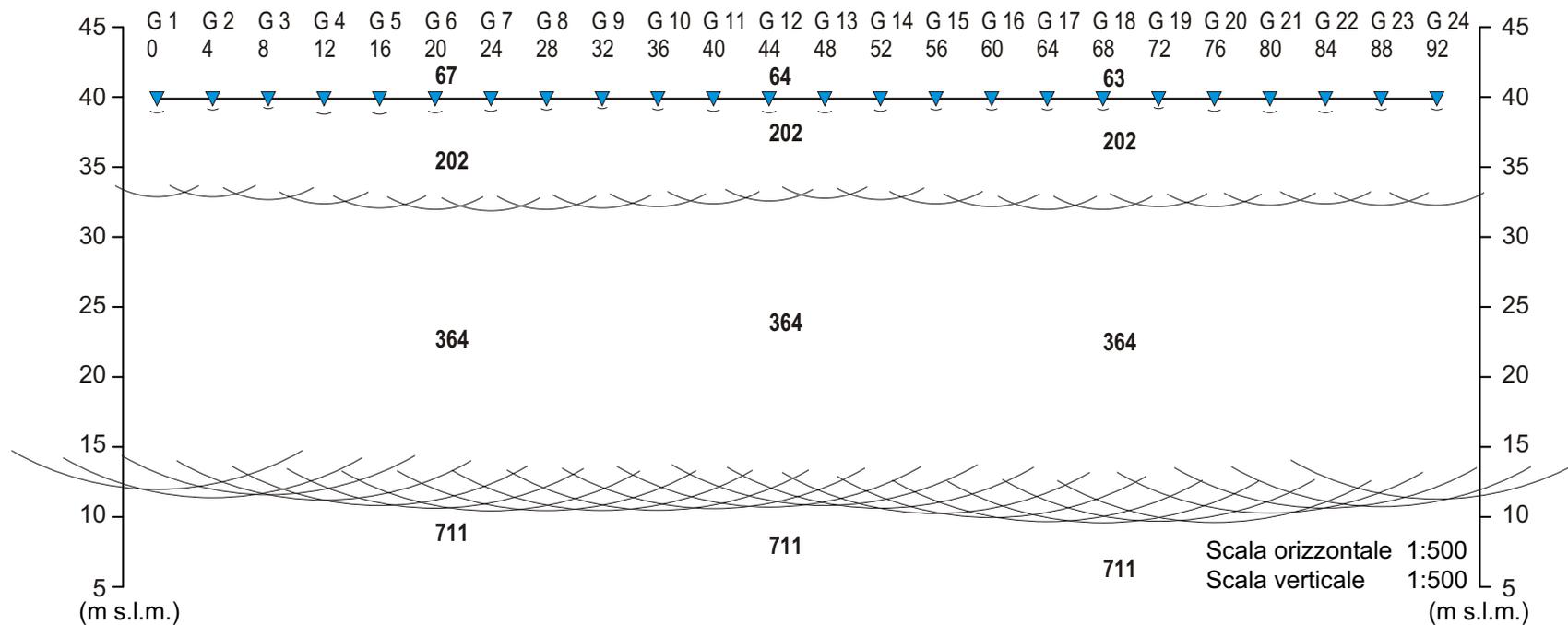
Dati profilo di sismica a rifrazione Ps1 - onde P

Geo. N°	Dist. m	Q m slm	V1 m/sec.	Z1 m	Q1 m slm	V2 m/sec.	Z2 m	H2 m	Q2 m slm	V3 m/sec.	Z3 m	H3 m	Q3 m slm	V4 m/sec.
1	0	39.9	275	1.5	38.4	574	6.4	7.9	32.0	919	20.7	28.6	11.3	2751
2	4	39.9	275	1.4	38.5	574	6.6	8.0	31.9	919	20.6	28.6	11.3	2751
3	8	39.9	279	1.5	38.4	574	6.5	8.0	31.9	919	20.6	28.6	11.3	2751
4	12	39.9	283	1.6	38.3	574	6.5	8.1	31.8	919	20.6	28.7	11.2	2751
5	16	39.9	286	1.4	38.5	574	7.0	8.4	31.5	919	20.5	28.9	11.0	2751
6	20	39.9	290	1.4	38.5	574	7.4	8.8	31.1	919	20.4	29.2	10.7	2751
7	24	39.9	294	1.4	38.5	574	6.4	7.8	32.1	919	21.5	29.3	10.6	2751
8	28	39.9	295	1.4	38.5	574	6.2	7.6	32.3	919	21.7	29.3	10.6	2751
9	32	39.9	296	1.4	38.5	574	6.5	7.9	32.0	919	21.2	29.1	10.8	2751
10	36	39.9	297	1.3	38.6	574	6.8	8.1	31.8	919	20.7	28.8	11.1	2751
11	40	39.9	298	1.3	38.6	574	6.8	8.1	31.8	919	20.8	28.9	11.0	2751
12	44	39.9	299	1.3	38.6	574	6.4	7.7	32.2	919	21.9	29.6	10.3	2751
13	48	39.9	300	1.4	38.5	574	6.0	7.4	32.5	919	22.5	29.9	10.0	2751
14	52	39.9	301	1.2	38.7	574	6.1	7.3	32.6	919	22.8	30.1	9.8	2751
15	56	39.9	302	1.2	38.7	574	6.0	7.2	32.7	919	23.0	30.2	9.7	2751
16	60	39.9	303	1.2	38.7	574	5.7	6.9	33.0	919	23.3	30.2	9.7	2751
17	64	39.9	304	1.2	38.7	574	5.6	6.8	33.1	919	23.3	30.1	9.8	2751
18	68	39.9	305	1.2	38.7	574	5.5	6.7	33.2	919	22.9	29.6	10.3	2751
19	72	39.9	305	1.2	38.7	574	5.3	6.5	33.4	919	22.7	29.2	10.7	2751
20	76	39.9	305	1.3	38.6	574	5.2	6.5	33.4	919	22.2	28.7	11.2	2751
21	80	39.9	305	1.2	38.7	574	5.0	6.2	33.7	919	22.2	28.4	11.5	2751
22	84	39.9	305	1.1	38.8	574	4.4	5.5	34.4	919	22.0	27.5	12.4	2751
23	88	39.9	305	1.1	38.8	574	4.2	5.3	34.6	919	22.1	27.4	12.5	2751
24	92	39.9	305	1.1	38.8	574	4.0	5.1	34.8	919	22.2	27.3	12.6	2751

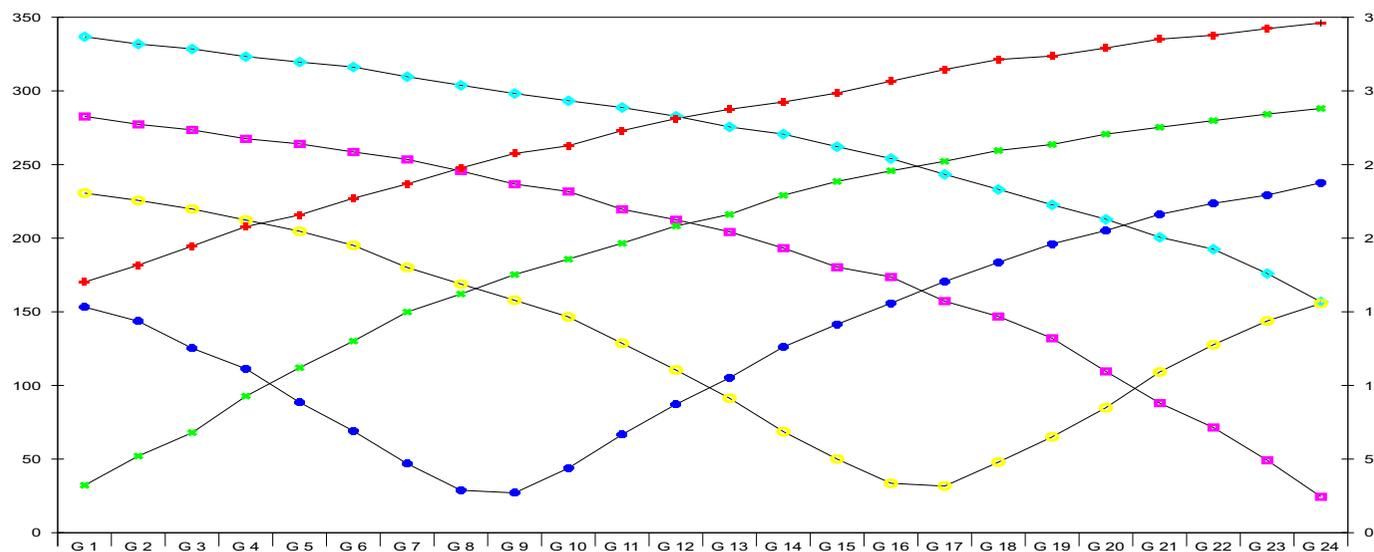
Registrazioni Ps1 - onde P



Profilo di sismica a Rifrazione Ps1 - onde SH



Dromocrone



Dati profilo di sismica a rifrazione Ps1 - onde SH

Geo. N°	ShotA ms	ShotB ms	ShotC ms	ShotD ms	ShotE ms	ShotF ms
1	170.20	32.12	153.20	230.60	282.70	336.80
2	181.70	52.00	143.60	225.60	277.30	331.80
3	194.60	67.87	125.20	219.80	273.50	328.50
4	207.80	92.62	111.30	212.30	267.50	323.30
5	215.70	112.00	88.50	204.70	264.00	319.60
6	227.10	130.10	69.00	195.10	258.50	316.20
7	236.80	149.80	46.87	180.10	253.50	309.60
8	247.60	162.10	28.75	168.80	245.60	303.80
9	257.50	175.30	27.00	157.80	236.70	298.20
10	262.70	185.70	43.75	146.50	231.70	293.30
11	273.00	196.50	66.62	128.60	219.60	288.70
12	281.10	208.20	87.12	110.50	212.50	282.80
13	287.50	216.10	105.20	91.25	204.20	275.50
14	292.50	229.10	126.10	68.62	193.20	270.60
15	298.50	238.50	141.50	50.00	180.30	262.10
16	306.60	245.70	155.80	33.50	173.70	254.00
17	314.50	252.20	170.50	31.62	157.20	243.30
18	321.30	259.50	183.50	47.87	146.80	233.10
19	323.60	263.60	196.10	65.00	132.00	222.60
20	329.10	270.60	205.10	84.87	109.50	212.80
21	335.10	275.30	216.10	109.10	88.00	200.60
22	337.80	279.80	223.60	127.60	71.37	192.50
23	342.30	284.20	229.20	143.80	49.12	176.00
24	346.10	288.10	237.60	155.70	24.37	156.70

Dati profilo di sismica a rifrazione Ps1 - onde SH

Geo. N°	Dist. m	Q m slm	V1 m/sec.	Z1 m	Q1 m slm	V2 m/sec.	Z2 m	H2 m	Q2 m slm	V3 m/sec.	Z3 m	H3 m	Q3 m slm	V4 m/sec.
1	0	39.9	62	1.0	38.9	202	6.0	7.0	32.9	364	20.9	27.9	12.0	711
2	4	39.9	63	0.8	39.1	202	6.2	7.0	32.9	364	21.5	28.5	11.4	711
3	8	39.9	64	0.7	39.2	202	6.5	7.2	32.7	364	21.1	28.3	11.6	711
4	12	39.9	65	1.1	38.8	202	6.4	7.5	32.4	364	21.2	28.7	11.2	711
5	16	39.9	66	1.1	38.8	202	6.7	7.8	32.1	364	21.3	29.1	10.8	711
6	20	39.9	67	1.0	38.9	202	6.9	7.9	32.0	364	21.4	29.2	10.7	711
7	24	39.9	68	0.9	39.0	202	7.1	8.0	31.9	364	21.4	29.4	10.5	711
8	28	39.9	69	0.8	39.1	202	7.1	7.9	32.0	364	21.5	29.4	10.5	711
9	32	39.9	68	0.7	39.2	202	7.1	7.8	32.1	364	21.6	29.4	10.5	711
10	36	39.9	66	0.8	39.1	202	6.9	7.7	32.2	364	21.7	29.4	10.5	711
11	40	39.9	65	0.9	39.0	202	6.6	7.5	32.4	364	21.8	29.3	10.6	711
12	44	39.9	64	1.0	38.9	202	6.3	7.3	32.6	364	21.9	29.2	10.7	711
13	48	39.9	63	1.0	38.9	202	6.1	7.1	32.8	364	22.0	29.1	10.8	711
14	52	39.9	62	0.9	39.0	202	6.3	7.2	32.7	364	22.0	29.2	10.7	711
15	56	39.9	60	0.8	39.1	202	6.7	7.5	32.4	364	22.1	29.6	10.3	711
16	60	39.9	59	0.8	39.1	202	6.9	7.7	32.2	364	22.2	29.9	10.0	711
17	64	39.9	63	0.8	39.1	202	7.1	7.9	32.0	364	22.3	30.2	9.7	711
18	68	39.9	63	0.8	39.1	202	7.1	7.9	32.0	364	22.4	30.3	9.6	711
19	72	39.9	63	0.7	39.2	202	7.0	7.7	32.2	364	22.5	30.2	9.7	711
20	76	39.9	63	0.9	39.0	202	6.8	7.7	32.2	364	22.6	30.3	9.6	711
21	80	39.9	63	1.0	38.9	202	6.6	7.6	32.3	364	22.0	29.6	10.3	711
22	84	39.9	63	1.0	38.9	202	6.5	7.5	32.4	364	21.7	29.2	10.7	711
23	88	39.9	63	0.8	39.1	202	6.8	7.6	32.3	364	21.5	29.1	10.8	711
24	92	39.9	63	0.8	39.1	202	6.8	7.6	32.3	364	21.0	28.6	11.3	711

Registrazioni Ps1 - onde SH

