COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO

# PROGETTO DI VARIANTE AL PIANO PARTICOLAREGGIATO APPROVATO Deliberazione n.44 del 20/04/2009 di iniziativa privata nel comparto di espansione residenziale C.3.98 SAPABA,

Casalecchio di Reno


*Proprietà*
Saraceni S.r.l.
Via Paolo Costa 9
Bologna

*Progetto Architettonico*
Mario Cucinella Architects Srl
Via Francesco Flora 6- 40129
Bologna Italia
T +39 051 631 3381 F +39 051 631 3316
mca@mcarchitects.it
www.mcarchitects.it

*Project Manager e*
*Progetto Opere di urbanizzazione*
Ing. Stefano Barozzi
Via E.Mattei 14
40045 Budrio (BO)
T +39 051 802601
www.grandesole.it


Titolo tavola

## RELAZIONE GEOLOGICA

| Codice consegna | Dis. | Contr. | Appr. |
|---|---|---|---|
| | | | |

| Data | Scala | Tipo | Rev | N. tavola |
|---|---|---|---|---|
| 01/08/2017 | | A | 00 | 3002 |

# CITTA' METROPOLITANA DI BOLOGNA

## COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO

---

## Relazione geologica di supporto all'inserimento di un'area nel PPIP

---

Committente: Grande Sole srl – Budrio (BO)

I Professionisti incaricati: Dott. Geol. Piero Cavarocchi

Dott. Geol. Riccardo Galassi

Bologna, luglio 2017

**OGGETTO DELL'INDAGINE**

Oggetto dell'incarico professionale: relazione geologica di supporto alla documentazione necessaria per la definizione di un PPIP riguardante un'area identificata come C.3.98 Sapaba, ubicata lungo Via Ronzani, nella periferia meridionale del capoluogo.
Il documento riassume gli esiti di un'apposita campagna geognostica eseguita allo scopo di determinare le caratteristiche geolitologiche dei terreni presenti al suo interno e fornire preliminari parametri geomeccanici propedeutica ad un successivo intervento progettuale di costruzione di una serie di fabbricati residenziali.

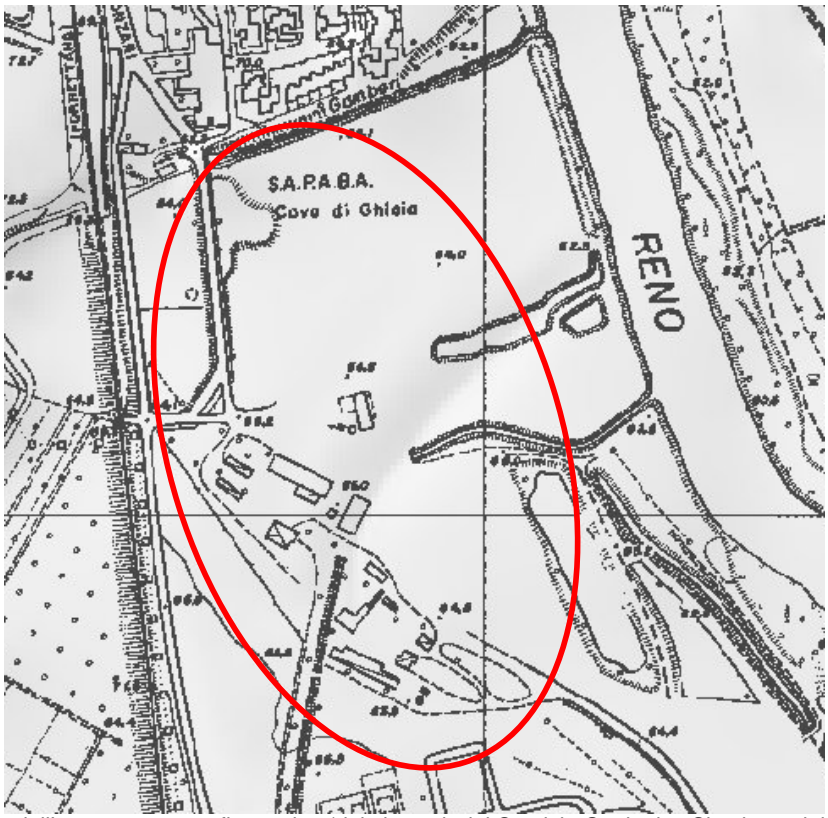


Fig. 1 – ubicazione dell'area su cartografia tecnica (dal sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna

Si tratta di una vasta area che in tempi passati ha ospitato, nella porzione settentrionale, una cava per l'estrazione di ghiaie utilizzate in ambito edilizio mentre nella porzione meridionale erano presenti fabbricati che ospitavano impianti di lavorazione delle suddette ghiaie. Attualmente l'area si presenta incolta e pianeggiante, con i fabbricati demoliti e con la viabilità interna ormai quasi completamente scomparsa. (si veda la Fig.2)

Fig. 2 – stato attuale dei luoghi da foto aerea

Riferimento CTR: Sezione n° 220120 (CASALECCHIO DI RENO)
Fasi di studio:

- raccolta dati bibliografici, geologici e geognostici;
- rilevamento diretto delle caratteristiche dei terreni e dell'intorno della zona di interesse;
- elaborazione dati e stesura relazione finale

Lo studio è stato condotto in osservanza delle norme vigenti, in particolare delle NTC illustrate nel DM 14 gennaio 2008.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

**Geologia: l'**area ricade in una zona costituita in superficie da sedimenti in prevalenza fini (limi prevalenti ed argille) nella porzione occidentale e limoso sabbiosi nella estrema porzione orientale (Fig. 3).
Si tratta di depositi appartenenti al cosiddetto Subsintema di Ravenna, individuato nella cartografia del Servizio Tecnico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna dalla sigla AES8.

In particolare l'area è occupata in superficie da sedimenti riconducibili alla più recente Unità di Modena (AES8a). Nella piana alluvionale è costituita da ghiaie, sabbie, limi ed argille variamente intercalate. Per l'area in studio la cartografia regionale specifica che si tratta di depositi ghiaioso-sabbiosi.
Il limite superiore è dato da suoli calcarei di colore bruno olivastro e bruno grigiastro privo di reperti archeologici di epoca romana o più antichi, non rimaneggiati. Lo spessore massimo in pianura è di circa 7 metri, nel sottosuolo circa 10 metri.
*Età: post romana (IV-VI sec d.C. – attuale: datazione archeologica)*

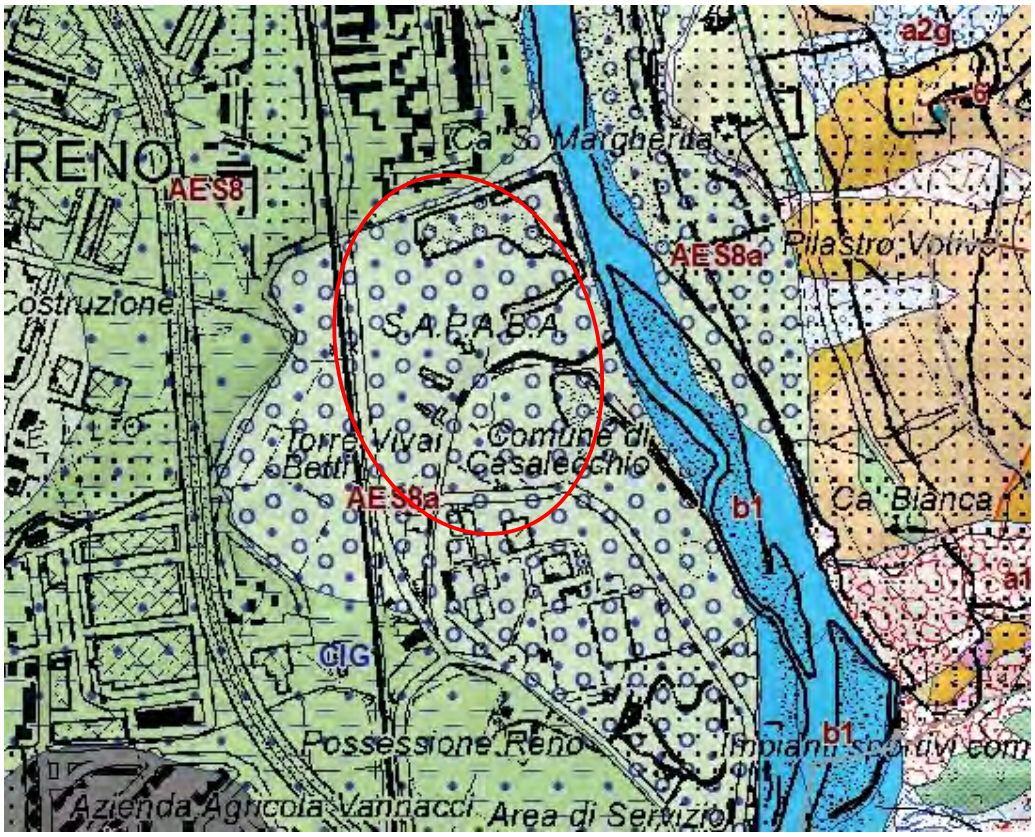



Fig. 3: cartografia geologica estratta dal sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

Al di sotto dello spessore superficiale riconducibile alle coperture quaternarie si rinvengono depositi appartenenti alla Formazione di Pantano, facente parte delle Unità Epiliguri. Si tratta di areniti siltose fini e finissime, grigie (beige se alterate), alternate a peliti marnose e siltose grigio chiare: stratificazione generalmente poco marcata o addirittura impercettibile a causa dell'intensa bioturbazione. Verso l'alto affiorano livelli di marne siltose grigio-azzurre laminate. Sedimentazione in ambiente da litorale a piattaforma esterna. La potenza è fino a circa 500 m. (*Burdigaliano Sup. – Langhiano Inf.*)

**Morfologia e morfodinamica**

L'area si presenta sostanzialmente pianeggiante e priva di tracce di elementi morfologici sepolti: l'unico elemento del paesaggio che caratterizza l'area è la presenza di un corso d'acqua che, provenendo dalle colline presenti ad ovest, entra nell'area da sud e si sviluppa verso nord per circa 100 metri per poi deviare dapprima verso NE e successivamente, dopo circa 50 metri, in corrispondenza del limite dell'area in studio, verso est per immettersi nel Fiume Reno.
Si sottolinea che l'area si trova ad una quota di circa 3 metri superiore rispetto al piano stradale della Via Ronzani, che segna il confine occidentale del lotto: questa quota più elevata è il frutto di un intervento antropico eseguito in un tempo non definibile con precisione ma che sicuramente ha avuto a che fare con l'attività estrattiva che a partire dal secondo dopoguerra ha interessato la fascia più vicina al corso del Fiume Reno, compresa l'area in studio.

**Idrogeologia generale**
Dal punto di vista idrogeologico la circolazione dell'acqua nel primo sottosuolo è strettamente legata alla presenza del Fiume Reno che scorre a poca distanza dal lotto in esame: il corso d'acqua funge da elemento drenante e le acque che si infiltrano in corrispondenza dei rilievi collinari scorrono fino ad intercettare gli impluvi minori o raggiungono direttamente l'elemento idrografico principale.

Nell'area in esame l'installazione di due piezometri in corrispondenza dei sondaggi geognostici eseguiti nel luglio 2017 ha permesso di verificare la presenza di un livello di falda a profondità di circa 6,5 metri dal pc. Questo valore, misurato in un momento in cui le precipitazioni atmosferiche risultavano praticamente nulle da diverso tempo, non rappresenta sicuramente la minore profondità a cui sarà possibile rinvenire il livello statico della prima falda freatica: considerando la natura prevalentemente incoerente dei sedimenti presenti al di sotto del pc, a seguito di eventi meteorologici di intensità e durata significativa si potrà misurare un livello di falda sensibilmente meno profondo rispetto a quello che caratterizza l'attuale stagione.

## DESCRIZIONE DELLE INDAGINI E LORO METODOLOGIA

In questa fase preliminare di indagini, che dovrà essere necessario implementare nelle successive fasi di progettazione degli interventi edificatori, per ottenere elementi utili per la ricostruzione di un modello geolitologico quanto più possibile dettagliato e fornire dati, seppur da considerarsi solo di massima, per caratterizzare il comportamento geotecnico dei terreni costituenti il primo sottosuolo dell'area in studio, è stata eseguita un'apposita indagine geognostica consistente in dueo sondaggi a carotaggio continuo e cinque prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH (Cone Penetration Test), queste ultime utilizzando un penetrometro costruito dalla PAGANI (TG63). Le prove sono state distribuite in modo da coprire il più omogeneamente possibile l'intera estensione del lotto, allo scopo di ottenere informazioni sufficientemente dettagliate per poter ricostruire, anche se in maniera schematica, il modello geologico del primo sottosuolo e per valutare le caratteristiche geomeccaniche dei possibili terreni di fondazione.
Vista l'estensione complessiva del lotto da indagare, è stato deciso di utilizzare tecniche di indagine indirette che potessero permettere di ottenere informazioni sull'andamento dei confini stratigrafici presenti nel primo sottosuolo: a tale scopo si proceduto all'esecuzione di due linee sismiche a rifrazione che hanno permesso di ricostruire, per un tratto lineare di circa 160 metri, l'andamento del substrato litoide.
L'analisi dei risultati delle prove penetrometriche è stata eseguita impiegando le metodologie contenute nella bibliografia specifica allegata alla presente relazione e ha permesso di ricostruire il comportamento dei terreni rispetto all'eventualità dell'insorgenza di un fenomeno sismico.
I due sondaggi hanno raggiunto il tetto del substrato litoide rappresentato dalle marne della Formazione di Pantano, a profondità di circa 12 metri dal pc.
Le prove DPSH sono state spinte a rifiuto (tranne che in DPSH1 e DPSH4), a profondità comprese tra 2,6 e 7,4 metri dal p.c.

Per l'ubicazione delle prove geognostiche si vedano la planimetria di Fig.4 e le foto che seguono.

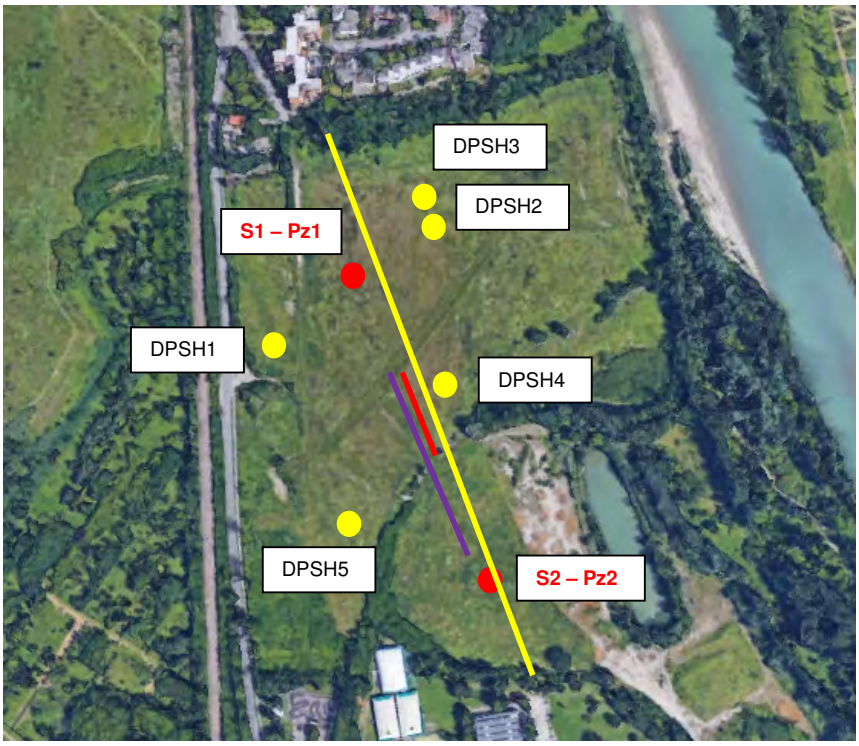



Fig. 6: ubicazione dei sondaggi, delle prove penetrometriche dinamiche DPSH, della prova MASW (linea rossa), delle linee a rifrazione (linea viola) e traccia della sezione di correlazione litologica delle indagini geognostiche (linea gialla).

S1

S2

DPSH1

DPSH2

DPSH3

DPSH4

DPSH5

**METODOLOGIE DI PROVA**

**Sondaggio geognostico**

Questa tecnica permette di investigare il sottosuolo per profondità elevate e contestualmente prelevare aliquote di terreno indisturbato da inviare al laboratorio di analisi terre per la caratterizzazione geomeccanica dello stesso. sulle "carote" che vengono portate in superficie è possibile eseguire test speditivi che forniscono indicazioni sui principali parametri geotecnici mentre, durante la perforazione è possibile eseguire prove in situ (SPT) che forniscono valori sul grado di addensamento dei sedimenti prevalentemente incoerenti.

**Prove DPSH: prova penetrometrica dinamica super pesante**

La prova DPSH rappresenta la più antica delle indagini geotecniche in situ: da diversi anni il suo utilizzo si è molto ridotto a seguito dell'introduzione di prove più affidabili [penetrometrie statiche CPT senza e con piezocono (CPTU)] relativamente all'interpretazione stratigrafica dei valori ottenuti ed alla caratterizzazione geotecnica dei terreni.

Attualmente le DPSH vengono utilizzate in cantieri dove non è possibile accedere con la strumentazione più recente o dove si pensa che i terreni più consistenti e quindi non facilmente indagabili con le CPT si trovino a profondità inferiori a 4-5 metri dal p.c.

La prova si basa sull'infissione di una punta conica metallica mediante battitura di un maglio che cade da un'altezza stabilita: il valore che viene registrato è il numero di colpi necessari per l'infissione di 20 cm.

# ANALISI DEI RISULTATI

## RISULTATI DELL'INDAGINE GEOGNOSTICA

Per la ricostruzione della successione stratigrafica sono stati utilizzati i dati provenienti dai sondaggi geognostici a carotaggio continuo mentre con le penetrometrie dinamiche è stato possibile avere informazioni sul grado di addensamento dei terreni attraversati e, dal confronto con i risultati degli stessi sondaggi, è stato possibile ipotizzare le profondità di passaggio tra i terreni di riporto superficiali e le sottostanti ghiaie.
Informazioni dirette sulla natura dei sedimenti attraversati sono state desunte dai carotaggi continui, nel corso dei quali sono state eseguite prove SPT (Standard Penetration Test) che hanno fornito valori sul grado di addensamento dei livelli incoerenti.
Le colonne litologiche che sintetizzano l'interpretazione delle prove penetrometriche eseguite sono riportate nelle seguenti tabelle, ove sono distinti i principali intervalli ricostruiti sulla base del confronto con i sondaggi geognostici.
Vengono di seguito riportate le colonne stratigrafiche derivanti dai sondaggi a carotaggio continuo che hanno permesso di valutare direttamente la natura dei terreni, servendo quale importante supporto per una più accurata taratura ed interpretazione dei dati penetrometrici.

**SONDAGGIO S1**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 1.90 | Terreno di riporto | |
| 2.70 | Sabbie | Incoerente |
| 12.70 | Ghiaia e sabbia in matrice limoso argillosa | Incoerente |
| 13.20 | Substrato marnoso | Roccia - Coesivo |

**SONDAGGIO S2**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 1.30 | Terreno di riporto | |
| 3.20 | Ghiaia e sabbia in matrice limoso argillosa | Incoerente |
| 4.50 | Sabbie limose | Incoerente/Coesivo |
| 11.90 | Ghiaia e sabbia in matrice limoso argillosa | Incoerente |
| 12.00 | Substrato marnoso | Roccia - Coesivo |

**PROVA ...DPSH1**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 2.60 | Terreno di riporto | |
| 5.60 | Sabbia limosa/Limo sabbioso | Incoerente/Coesivo |
| 6.20 | Ghiaia e sabbia | Incoerente |

**PROVA ...DPSH2**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 2.60 | Terreno di riporto | |

**PROVA ...DPSH3**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 2.80 | Terreno di riporto | |
| 5.20 | Sabbia limosa/Limo sabbioso | Incoerente/Coesivo |
| 5.80 | Ghiaia e sabbia | Incoerente |

**PROVA ...DPSH4**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 3.60 | Terreno di riporto | |
| 4.80 | Sabbia limosa/Limo sabbioso | Incoerente/Coesivo |
| 7.40 | Ghiaia e sabbia | Incoerente |

**PROVA ...DPSH5**

| Prof. Strato (m) | Descrizione Litologica | Comp. Geotecnico |
|---|---|---|
| 3.00 | Terreno di riporto | |
| 4.60 | Sabbia limosa/Limo sabbioso | Incoerente/Coesivo |
| 5.20 | Ghiaia e sabbia | Incoerente |

In allegato sono riportate le colonne stratigrafiche dei sondaggi geognostici con descrizioni più dettagliate delle diverse litologie attraversate e l'indicazione dei risultati delle SPT.

## MODELLO GEOTECNICO
### INTERPRETAZIONE E PRESENTAZIONE DEI DATI

**Metodologia di Elaborazione**

Per quanto riguarda le penetrometrie dinamiche, le elaborazioni sono state effettuate mediante un programma di calcolo automatico Dynamic Probing della *GeoStru Software.*

I dati rilevati dalle prove sono trattati in modo da essere trasformati nel parametro NSPT (Standard Penetration Test) che rappresenta uno dei test più diffusi per ricavare informazioni sul comportamento geomeccanico dei terreni e per il quale sono note diverse correlazioni che permettono di ricavare i principali parametri.

## CORRELAZIONI GEOTECNICHE

**TERRENI INCOERENTI**
*Angolo di Attrito*: metodo di Durgunouglu-Mitchell 1973
*Densità relativa (%)*: Metodo di Lancellotta 1983
*Modulo Edometrico: Metodo di* Robertson & Campanella da Schmertmann
Modulo di Young: Metodo di Schmertmann
*Peso di Volume Gamma e Gamma sat: Metodo di* Meyerhof -
*Modulo di deformazione di taglio* : metodo di Imai & Tonouchi (1982) elaborazione valida soprattutto per sabbie e per tensioni litostatiche comprese tra 0,5 - 4,0 kg/cmq.
*OCR* - Grado di Sovraconsolidazione Metodo di Larsson 1991 S.G.I.

**TERRENI COESIVI**
*Coesione Non Drenata:Metodo* Rolf Larsson SGI 1995
*Modulo Edometrico-Confinato*: Metodo Mitchell & Gardner (1975
*Peso di Volume Gamma e Gamma sat*: Metodo di Meyerhof
*Modulo di deformazione di taglio): Metodo di* Imai & Tonouchi (1982)
OCR: Metodo Larsson 1991 S.G.I.

***Caratterizzazione geomeccanica***
Si riassumono, di seguito, i parametri del terreno ricavati dall'interpretazione dei dati numerici delle prove DPSH mediante espressioni bibliografiche. Vengono riportati i dati relativi ai soli intervalli riconducibili a depositi in situ, non possedendo i terreni di riporto caratteristiche di omogeneità composizionale e di uniformità di resistenza alle pressioni verticali tali da rendere significativi ed affidabili i dati derivanti dalle elaborazioni via software.
Gli intervalli inseriti nelle tabelle non corrispondono alla schematizzazione litologica riportata nelle tabelle precedenti ma rappresentano, ove opportuno, una più approfondita

schematizzazione che tiene conto dei risultati delle DPSH.
I dati riportati sono comunque stati ricavati da software ed il loro utilizzo va ponderato attentamente da parte del progettista abilitato.

**Schematizzazione litologica e tabella riassuntiva dati geomeccanici prova DPSH 1**

| | Litologia | Intervallo profondità strato (m) | Qc (Kg/cmq) | γ (KN/m³) | γsat (KN/m³) | Go (Kg/cmq) | Eed (Kg/cmq) | DR (%) | Φ' (°) | Cu (Kg/cmq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Strato 2 | Sabbie limose | 2.60÷5.60 | 25 | 19 | 20 | 650 | 58 | 40 | 28 | 0.87 |
| Strato 3 | Ghiaie e sabbie | 5.60÷6.20 | 250 | 19 | 20 | 1200 | 250 | 90 | 40 | |

**Schematizzazione litologica e tabella riassuntiva dati geomeccanici prova DPSH 3**

| | Litologia | Intervallo profondità strato (m) | Qc (Kg/cmq) | γ (KN/m³) | γsat (KN/m³) | Go (Kg/cmq) | Eed (Kg/cmq) | DR (%) | Φ' (°) | Cu (Kg/cmq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Strato 2 | Sabbie limose | 2.80÷3.40 | 36 | 19 | 20 | 950 | 64 | 53 | 33 | 1,1 |
| Strato 3 | Sabbie limose | 3.40÷5.20 | 22 | 18 | 19 | 620 | 50 | 37 | 31 | 0,7 |
| Strato 4 | Ghiaie e sabbie | 5.20÷5.60 | 95 | 18 | 19 | 1500 | 120 | 70 | 41 | |

**Schematizzazione litologica e tabella riassuntiva dati geomeccanici prova DPSH 4**

| | Litologia | Intervallo profondità strato (m) | Qc (Kg/cmq) | γ (KN/m³) | γsat (KN/m³) | Go (Kg/cmq) | Eed (Kg/cmq) | DR (%) | Φ' (°) | Cu (Kg/cmq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Strato 2 | Sabbie limose | 3.60÷4.80 | 38 | 19 | 20 | 1000 | 65 | 53 | 33 | 1,1 |
| Strato 3 | Ghiaie e sabbie | 4.80÷7.40 | 105 | 18 | 19 | 1600 | 130 | 74 | 42 | |

**Schematizzazione litologica e tabella riassuntiva dati geomeccanici prova DPSH 5**

| | Litologia | Intervallo profondità strato (m) | Qc (Kg/cmq) | γ (KN/m³) | γsat (KN/m³) | Go (Kg/cmq) | Eed (Kg/cmq) | DR (%) | Φ' (°) | Cu (Kg/cmq) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Strato 2 | Sabbie limose | 3.00÷4.60 | 32 | 19 | 20 | 850 | 60 | 48 | 31 | 1,0 |
| Strato 3 | Ghiaie e sabbie | 4.60÷5.20 | 95 | 18 | 19 | 1700 | 120 | 90 | 42 | |

**Qc = resistenza alla punta, Cu = coesione non drenata, Φ' *= angolo di attrito interno efficace, Eed = modulo edometrico, Dr *= densità relativa, G = Modulo di taglio dinamico, γ = peso di volume non saturo e saturo (sat).**

Parametri del terreno ricavati dall'interpretazione dei dati numerici delle prove SPT mediante espressioni bibliografiche.

Tabella riassuntiva

| **Sondaggio** | **Profondità** | **N spt** | **Φ** | **E** | **Go** | **Dr** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 10,50÷10,95 | 58 | 40 | 32 | 194 | 84 |
| S2 | 4,00÷4,45 | 8 | 33 | 8 | 59 | 38 |

Profondità = espressa in metri dal p.c., Nspt = numero di colpi del maglio per penetrazione di 30 cm, φ *= angolo di attrito interno (°), E = modulo di elasticità (MPa), Dr *= densità relativa (%), Go = Modulo di taglio dinamico (MPa).

## MODELLO GEOLITOLOGICO DEL SOTTOSUOLO

Dall'interpretazione e dalla comparazione dei dati ricavati dall'indagine geognostica e dall'indagine sismica a rifrazione si è proceduto alla ricostruzione del modello litostratigrafico schematico del primo sottosuolo nell'area oggetto di studio. Questa interpretazione deve considerarsi puramente indicativa, vista la scarsità dei dati certi che è stato possibile recuperare e la potenziale variabilità che un sito come quello in esame, storicamente soggetto ad operazioni di scavo di inerti e successivo riempimento, può presentare.
Nelle fasi più avanzate della progettazione degli interventi edificatori (progetto preliminare – definitivo ed esecutivo) sarà necessario procedere a ulteriori indagine geognostiche di tipo diretto (sondaggi a carotaggio continuo) per ricostruire con il massimo dettaglio possibile l'andamento delle litologie individuate con la presente indagine preliminare in termini sia di spessori dei singoli livelli sia di natura e composizione degli stessi, oltre che della variabilità del comportamento geomeccanico.

Lo schema allegato mostra come sia presumibile che lungo la direzione N-S la successione stratigrafica abbia caratteristiche abbastanza uniformi all'interno dell'area indagata: in superficie si ritrova terreno di riporto di varia natura con spessori variabili (da 1,3 a 1,9 metri nei due sondaggi a carotaggio) che copre i sedimenti incoerenti dapprima sabbiosi e sabbioso limosi (per uno spessore che mediamente si attesta sul metro) e successivamente ghiaioso sabbiosi. Alla base compare il substrato dato dalle argilliti della Formazione di Pantano. L'andamento di quest'ultimo passaggio si pone a profondità di circa 12 metri dal pc, con variazioni significative riconosciute in corrispondenza dell'intercetto del corso d'acqua che attraversa il lotto che sembra avere inciso il substrato per circa 4 metri. Nella porzione compresa tra il corso d'acqua ed il sondaggio S2 il tetto del substrato sembra dapprima alzarsi fino ad una profondità di circa 9 metri dal pc per poi ridiscendere e tornare alla profondità media sopra indicata.
La conferma o meno di questa interpretazione la si potrà ottenere nelle fasi più avanzate della progettazione dei fabbricati previsti all'interno del comparto: come detto in precedenza in quell'occasione si renderà necessario procedere all'esecuzione di una campagna geognostica mirata alla verifica della reale natura dei sedimenti presenti nel primo sottosuolo, oltre ad una loro più accurata caratterizzazione geomeccanica.

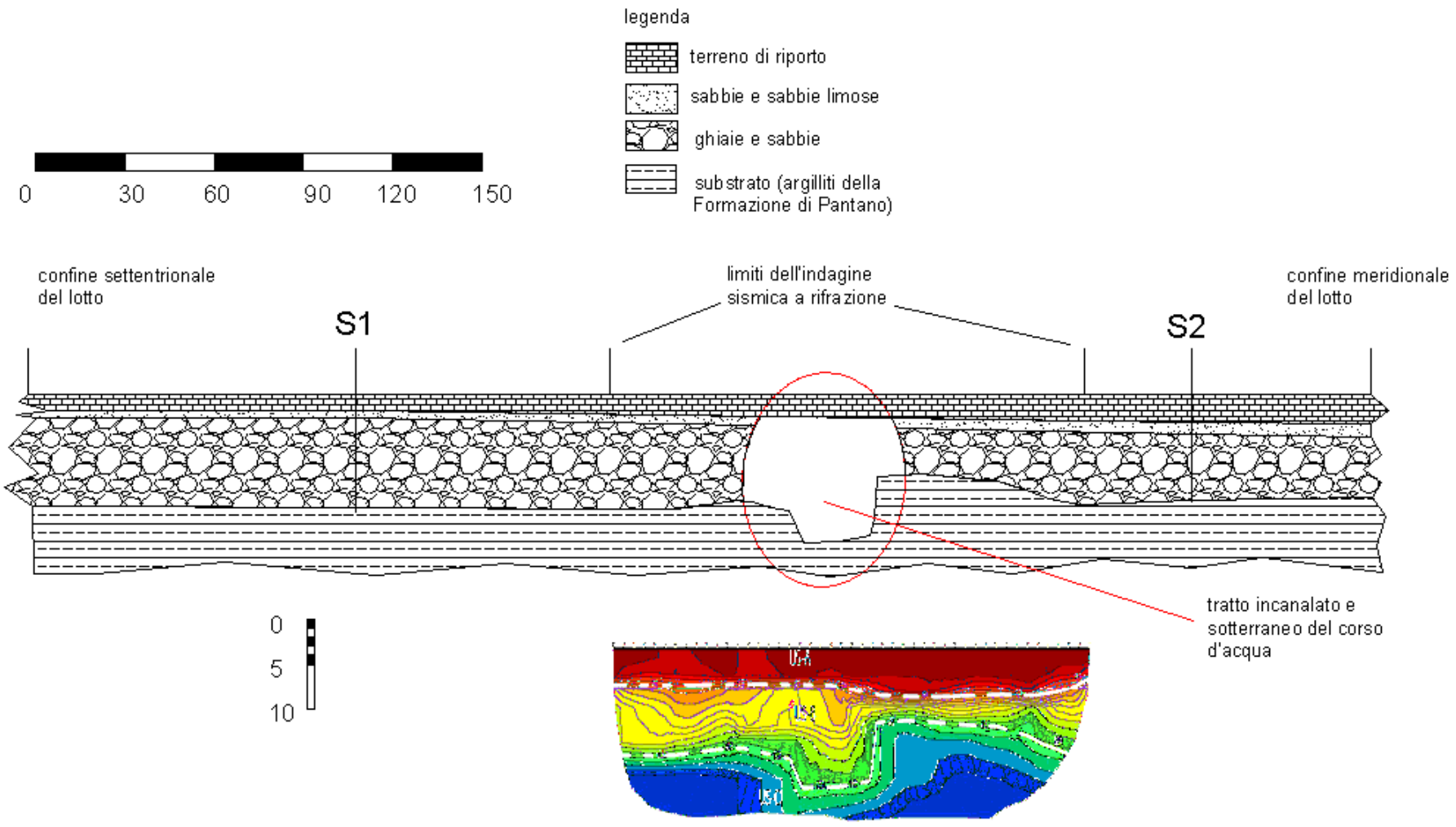



Fig. 7 – schematico modello geolitologico del primo sottosuolo

**ANALISI DI LABORATORIO GEOTECNICO**

Al laboratorio geotecnico SINERGEA s.r.l. è stato chiesto di realizzare una granulometria con setacci ed in un caso anche per sedimentazione, di due campioni disturbati prelevati nel corso dell'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo.

Le granulometrie hanno interessato i livelli prevalentemente sabbiosi riscontrati al tetto dei sedimenti incoerenti presenti sotto lo strato di terreno di riporto.

La tabella che segue specifica le profondità di prelievo dei campioni disturbati mentre i rapporti di prova sono allegati alla presente relazione.

| Denominazione campione | Profondità prelievo (mt) | Prove eseguite |
|---|---|---|
| | | |
| S1 Campione 1 | 5,10 ÷ 5,50 | Granulometria con setacci |
| S2 Campione 1 | 3,20 ÷ 3,40 | Granulometria con setacci e sedimentazione |

La valutazione dell'esito delle analisi granulometriche è contenuta nel capitolo di questa relazione che prende in considerazione la problematica della potenziale liquefacibilità dei terreni presenti nell'area indagata.

**DETERMINAZIONE DEI VALORI GEOMECCANICI CARATTERISTICI**

Secondo quanto indicato del decreto del 14/1/2008, per la definizione delle caratteristiche geomeccaniche di riferimento dei vari intervalli riconosciuti nella sequenza, in fase preliminare, si è proceduto alla individuazione dei valori di angolo di attrito interno, coesione, coesione efficace e peso di volume per ognuno di tali intervalli.

Si fa presente che in virtù delle caratteristiche della sequenza stratigrafica sono stati caratterizzati i soli intervalli potenzialmente interessati dall'azione di fondazioni superficiali (escludendo i terreni di riporto presenti in superficie).

Le procedure di stima dei parametri di progetto, utilizzate per la definizione del modello geotecnico concettuale preliminare, sono descritte come segue.

**Procedura per ricavare i valori caratteristici mediante l'analisi statistica per parametri che seguono distribuzione log-normale (Cu, c', E, altri)**

Si è applicato il metodo di Cox (da Zhou & Gao, 1997):

$$L_{1-\alpha}\left(\overline{Y},S^2\right)=\overline{Y}+\frac{S^2}{2}\pm z_{1-\frac{\alpha}{2}}*\sqrt{\frac{S^2}{n}+\frac{S^4}{2(n-1)}}$$

dove:

⌈ valore medio del dataset con distribuzione lognormale

z distribuzione normale standardizzata

t valore della distribuzione di Student ad n-1 gradi di libertà

S deviazione standard del campione

n numero di dati

I valori caratteristici non sono stati divisi per il relativo coefficiente previsto dal decreto per determinarne il valore in caso di analisi simica.

La sottostante tabella individua preliminarmente le caratteristiche del terreno che interagirà con le opere di fondazione da progettarsi; queste dovranno essere riviste in fase di progettazione definitiva/esecutiva in funzione dell'esito delle prove che verranno realizzate in quelle fasi.

Si ritiene importante far rilevare che i valori dell'angolo di attrito interno efficace e della coesione efficace vanno riferiti generalmente ai livelli più granulari a comportamento incoerente compresi nell'intervallo considerato.

La successiva schematizzazione della successione stratigrafica rappresenta il risultato dell'indagine geognostica eseguita in questa fase che dovrà essere confermata o meno per ogni

singolo intervento edificatorio che verrà realizzato.

| Intervallo | Litologia |
|---|---|
| 1 | Terreno di riporto |
| 2 | Sabbie e sabbie limose |
| 3 | Ghiaie e sabbie mediamente addensate |
| 4 | Argilliti |

**Valori di riferimento indicativi per il progetto**

| **Intervallo** | **Profondità medie** | **Comportamento geotecnico prevalente** | **$\varphi'_k$** | **$c'_k$** | **$Cu_k$** | **$\gamma_k$** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,00 ÷2,0 | | | | | |
| 2 | 2,0-3,2÷2,7-4,5 | Coesivo - Incoerente | 25 | 15 | 80 | 19 |
| 3 | 2.7-4,5÷12,0 | Incoerente | 32 | | | 18 |
| 4 | > 12,0 | Incoerente | 22* | >50* | | 21* |

**N.B. Cu = coesione non drenata (KN/mq), Φ' = angolo di attrito interno efficace (°), C' = coesione efficace (KN/mq), γ = peso di volume non saturo o saturo (KN/mc). * Valori bibliografici cautelativi che si riferiscono al substrato marnoso**

Come specificato più sopra, i valori sopra tabellati devono intendersi come indicativi a livello di ogni singolo settore: in occasione delle fasi di progettazione dei singoli interventi edificatori dovranno essere confermati o meno dall'elaborazione di specifici dati acquisiti mediante appropriate indagini in situ ed in laboratorio di analisi terreni.

## CARATTERISTICHE SISMICHE: MODELLO CONCETTUALE

### Analisi a scala di area vasta

L'analisi che segue è stata condotta secondo le indicazioni contenute nel DM 14/1/2008 con i relativi allegati e circolari applicative.
In via preliminare si è ritenuto importante evidenziare che il territorio comunale di Casalecchio di Reno si colloca nella Zona Sismogenetica 913 (Appennino Emiliano Romagnolo).

Zona Sismogenetica 913: caratterizzata da eventi aventi le caratteristiche indicate nello specchietto, tratte dall'atlante della sismicità strumentale (1983 – 2002) dell'INGV e rielaborati statisticamente per la definizione delle caratteristiche sismogenetiche. La zona sorgente 913 rappresenta una fascia di transizione nella quale convivono meccanismi di fagliazione diversi, essenzialmente compressivi a Nord-Ovest e distensivi a Sud-Est.

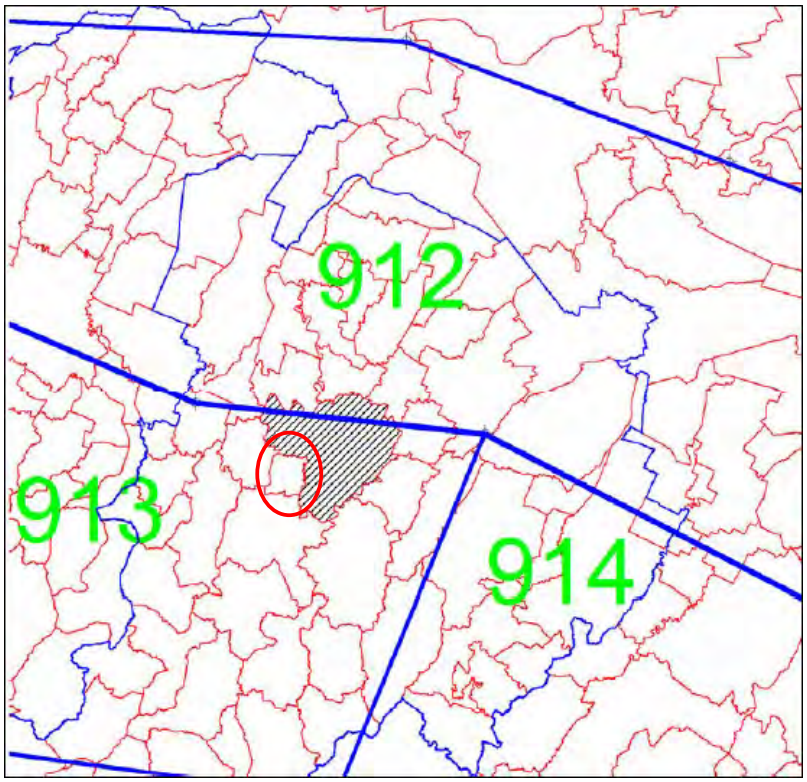


Fig. 8: *dettaglio della zonizzazione sismogenetica del territorio comunale di Casalecchio di Reno*

| Zona | Numero eventi Md>2 | Numero eventi Md>2 | Numero eventi Md>2 | Magnitudo massima Md | Classe di profondità (km) | Profondità efficace (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 912 | 180 | 141 | 54 | 4.6 | 5-8 | 7 |
| 913 | 767 | 362 | 100 | 4.8 | 12-20 | 13 |

I dati caratteristici della sismicità hanno consentito di classificare secondo i criteri della vecchia normativa l'intero territorio nazionale: il comune di Casalecchio di Reno, e dunque il lotto di progetto ricade in zona sismica 3, caratterizzata da un rapporto A/g = 0,15 (sismicità bassa).

**Pericolosità sismica**

La pericolosità e il rischio sismico del territorio nazionale sono stati affrontati dal Servizio Sismico Nazionale (SSN), utilizzando il calcolo probabilistico di Cornell, risalente alla fine degli anni '60, in grado di considerare tutte le possibili sorgenti influenzanti il moto del terremoto.

Il Servizio Sismico Nazionale, per tutto il territorio nazionale, ha elaborato la pericolosità sismica di base di cui al DM 14.1.2008 che rappresenta l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.
La pericolosità sismica di base è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa ag in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (categoria A), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente Se (T) , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR, nel periodo di riferimento VR.
Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:
- ag accelerazione orizzontale massima al sito;
- Fo valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale.
- T*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Le stazioni di riferimento che quantificano la pericolosità sismica di base per il territorio comunale di Casalecchio di Reno consentono di verificare che il territorio comunale presenta i seguenti dati

di pericolosità (Figura 9)
- accelerazione di picco per suoli di tipo A con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni per un periodo di ritorno di 475 anni.: PGA = 0,150 - 0,175;

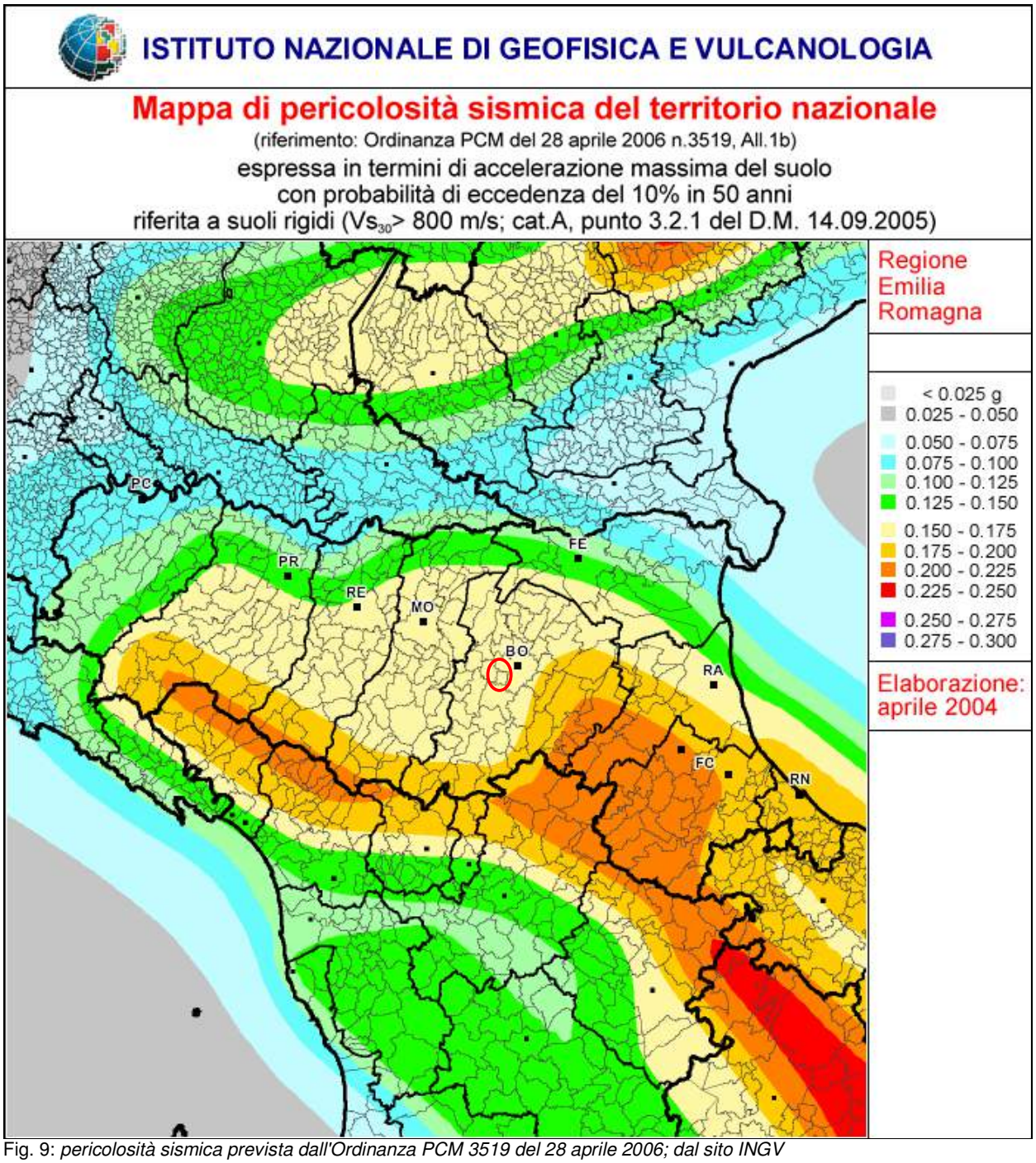


Fig. 9: *pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006; dal sito INGV*

Gli elementi di amplificazione sismica validi per il territorio comunale sono in seguito riassunti:
- Sovrascorrimenti sepolti. Per il territorio di Casalecchio l'elemento più importante è rappresentato dal Pedeappenninic Thrust Front (PTF – Boccaletti et al., 1985; 2004; 2010) che solleva le rocce dell'attuale rilievo e taglia tutta la crosta fino alla superficie, in particolare tra Casalecchio di Reno e Bologna. Secondo questo modello la pericolosità sismica dell'area risulta medio-alta, in quanto ipotizza che le faglie simicamente più attive siano ubicate in superficie, con il conseguente interessamento dei centri abitati.
- Depositi prevalentemente argillosi e limosi. Le aree ricadenti in questa classe sono potenzialmente soggette ad amplificazione caratteristiche stratigrafiche e quindi dovrà essere

valutato il coefficiente di amplificazione litologico. Talora, i terreni prevalentemente argillosi possono presentare caratteristiche meccaniche scadenti ed essere soggetti a cedimenti in caso di forti scosse. In caso di caratteristiche meccaniche scadenti dovranno essere stimati anche i potenziali cedimenti.
- Depositi prevalentemente sabbiosi. La presenza di sabbie, soprattutto se incoerenti e ben classate, nei primi 20 m dal p.c., con falda acquifera a profondità minore di 15 m dal p.c., favorisce il verificarsi del fenomeno della liquefazione in caso di forti scosse sismiche (magnitudo > 5). In queste zone, pertanto, devono essere valutati, oltre a coefficiente di amplificazione litologico, anche il potenziale di liquefazione e gli eventuali cedimenti.

Le sottostanti Figure 10 e 11 inquadrano la zona di studio all'interno della zonazione sismogenetica ZS9 e sono tratte dall'Appendice 2 al Rapporto conclusivo a Cura di C. Meletti e G. Valensise (Marzo 2004).

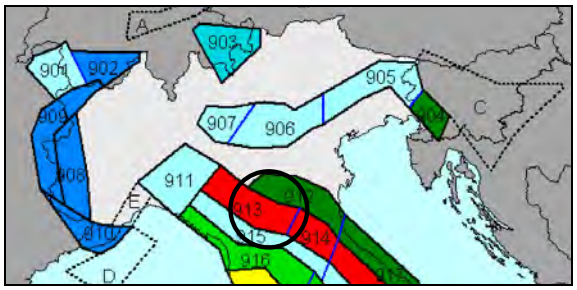



**Fig. 10**
Profondità dei principali terremoti
(moda = 13 km)

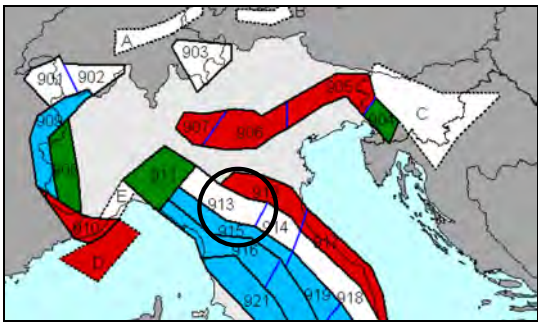



**Fig. 11**
Meccanismo di fagliazione prevalente

Le figure mettono in luce come nella zona di studio sia caratterizzata da eventi aventi le caratteristiche indicate nello specchietto, tratti dall'atlante della sismicità strumentale (1983 – 2002) dell'INGV e rielaborati statisticamente per la definizione delle caratteristiche sismogenetiche.

**ANALISI SISMICA STORICA**

La seguente figura 12 con la relativa tabella mostrano i principali terremoti registrati a Casalecchio di Reno con Is superiore a 5.

I dati sono desunti dalla seguente pubblicazione:

*Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15*

## Casalecchio di Reno

| | |
|---|---|
| PlaceID | IT_39413 |
| Coordinate (lat, lon) | 44.478, 11.277 |
| Comune (ISTAT 2015) | Casalecchio di Reno |
| Provincia | Bologna |
| Regione | Emilia-Romagna |
| Numero di eventi riportati | 15 |

| Effetti | In occasione del terremoto del | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Int.** | **Anno** | **Me** | **Gi** | **Ho** | **Mi** | **Se** | **Area epicentrale** | **NMDP** | **Io** | **Mw** |
| 6 | 1929 | 04 | 19 | 04 | 16 | | Bolognese | 82 | 6-7 | 5.13 |
| 5-6 | 1929 | 04 | 20 | 01 | 10 | | Bolognese | 109 | 7 | 5.36 |
| 5 | 1929 | 04 | 10 | 05 | 44 | | Bolognese | 87 | 6 | 5.05 |
| 4 | 1929 | 04 | 12 | 00 | 32 | | Bolognese | 7 | 4 | 4.82 |
| 4 | 1967 | 12 | 30 | 04 | 19 | | Emilia Romagna orientale | 40 | 6 | 5.05 |
| 3-4 | 1971 | 07 | 15 | 01 | 33 | 2 | Parmense | 228 | 8 | 5.51 |
| 3-4 | 1992 | 04 | 17 | 11 | 59 | 0 | Appennino bolognese | 56 | 4-5 | 4.11 |
| NF | 1965 | 11 | 09 | 15 | 35 | | Appennino reggiano | 32 | 5 | 4.17 |
| NF | 1986 | 12 | 06 | 17 | 07 | 1 | Ferrarese | 604 | 6 | 4.43 |
| NF | 1987 | 05 | 02 | 20 | 43 | 5 | Reggiano | 802 | 6 | 4.71 |
| NF | 2000 | 05 | 10 | 16 | 52 | 1 | Faentino | 151 | 5-6 | 4.82 |
| NF | 2000 | 06 | 18 | 07 | 42 | 0 | Pianura emiliana | 304 | 5-6 | 4.40 |
| NF | 2002 | 06 | 08 | 20 | 13 | 0 | Frignano | 115 | 4 | 4.23 |
| NF | 2002 | 06 | 18 | 22 | 23 | 3 | Frignano | 186 | 4 | 4.30 |
| NF | 2002 | 06 | 19 | 22 | 11 | 1 | Frignano | 52 | 3 | 4.03 |

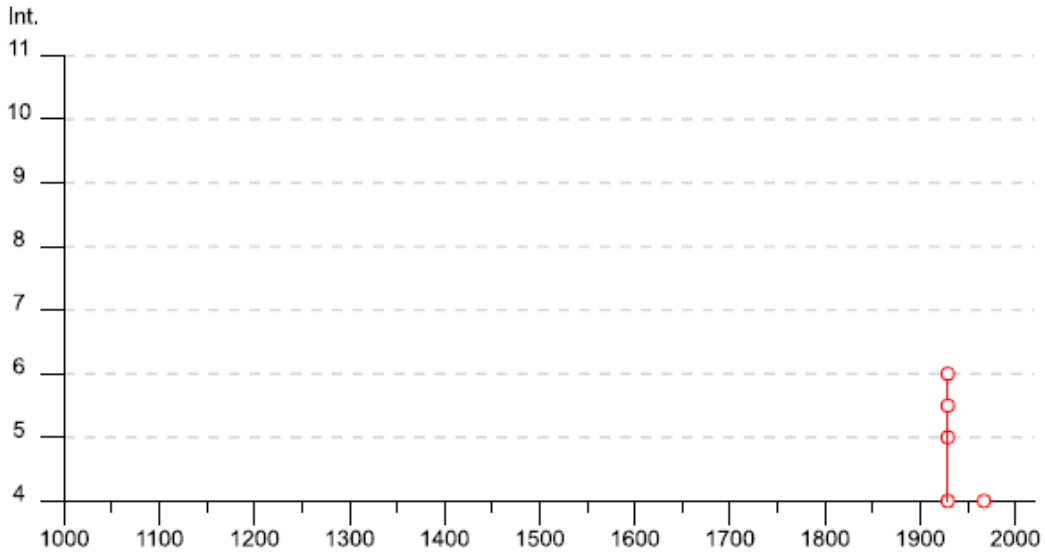



Fig.13 L'esame congiunto della tabella e della figura consente di apprezzare una serie di eventi in cui sono stati registrati superamenti della magnitudo 5 -

**ANALISI A SCALA LOCALE**

Lo strumento di pianificazione comunale che analizza gli aspetti del territorio legati alle caratteristiche sismiche è il PSC: l'art. 10 delle Norme di Attuazione della Variante per la Riqualificazione Urbana (maggio 2016) si occupa in maniera specifica delle norme ed indirizzi operativi in materia sismica. Nel documento si fa riferimento a due norme ed indirizzi sovra comunali di riferimento per l'approccio alla problematica della pericolosità sismica: la Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia Romagna n. 112 del 2 maggio 2007 ("Indirizzi pere gli studi di microzonazione sismica") e la Variante al Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) in materia sismica (in particolare alla Tavola 2C - "Rischio sismico: carta delle aree suscettibili di effetti locali per l'intero territorio provinciale" e alle relative Norme Attuative).
A livello comunale le norme del PSC fanno riferimento a due elaborati specifici prodotti in materia per soddisfare le richieste delle suddette norme regionali/provinciali: uno studio sismico che viene indicato quale allegato al Quadro conoscitivo del PSC (costituito da una relazione di Microzonazione Sismica e da numerosi elaborati cartografici – documenti però non disponibili sul sito web del Comune) e da due tavole, allegate al PSC, indicate quali riferimenti per l'attuazione delle previsioni degli strumenti di pianificazione e per gli interventi diretti. Le tavole hanno questi titoli:

- Tav.A1 – carta degli effetti locali attesi. Questo elaborato opera una prima distinzione del territorio comunale sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e, per ciascuna tipologia di esse, indica le indagini e/o analisi di approfondimento che devono essere effettuate dagli strumenti di pianificazione successivi, nonché indicazioni normative sugli interventi ammissibili nella aree caratterizzate da pericolo sismico elevato;
- Tav.A2 – carta di sintesi delle prescrizioni in base alla microzonazione sismica di II° livello. Questo elaborato riporta gli esiti di risposta sismica semplificata (secondo livello) definiti dalla DAL 112/2007, ovvero i fattori di amplificazione. La tavola indica inoltre per quali aree si richiedono ulteriori approfondimenti sismici di "terzo livello" da espletarsi nelle successive fasi di pianificazione (POC, PUA o interventi diretti)

Di seguito vengono riportati gli estratti dalle succitate carte allegate al PSC.

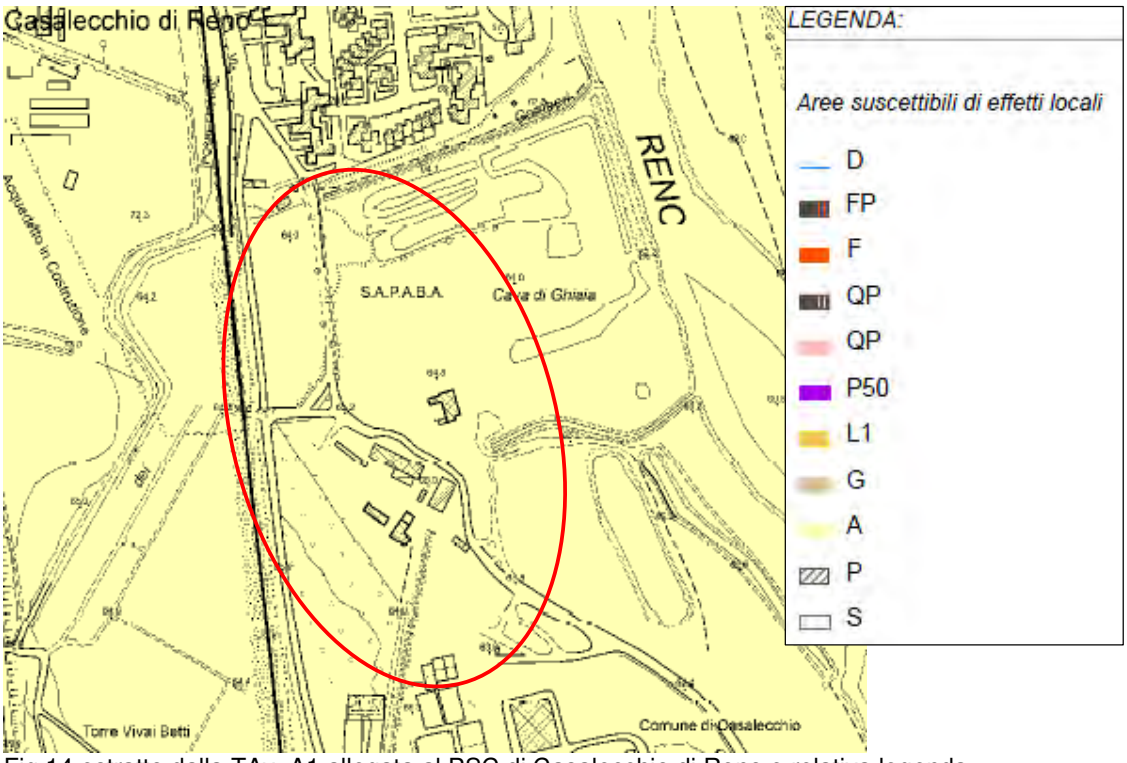
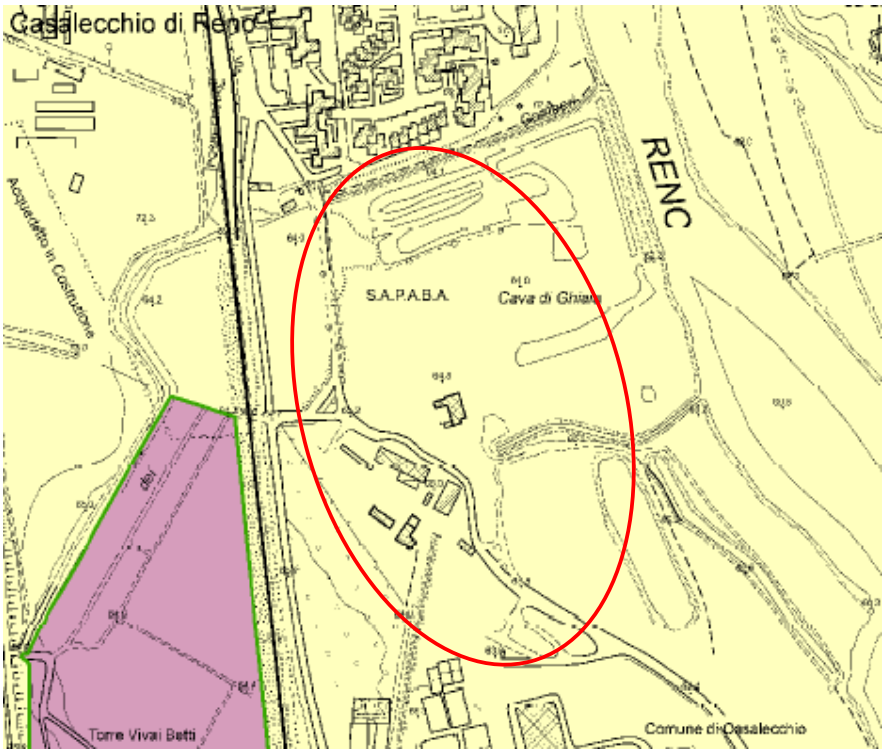


Fig.14 estratto dalla TAv. A1 allegata al PSC di Casalecchio di Reno e relativa legenda




## *LEGENDA:*

Fattori di amplificazione F.A. (PGA)

- FA (PGA) = 2,2; FA IS (0,1s-0,5s) = 2,2; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,7
- FA (PGA) = 2 ; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,7; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4
- FA (PGA) = 1,8; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,7; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4
- FA (PGA) = 1,7; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,5; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4
- FA (PGA) = 1,6; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,6; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4
- FA (PGA) = 1,5; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,4; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4
- FA (PGA) = 1,4; FA IS (0,1s-0,5s) = 1,4; FA IS (0,5s-1,0s) = 1,4

Categorie di sottosuolo

- B 360 < Vs30 < 800
- c 180 < vS30 < 360

Liquefazione

- B 360 < Vs30 < 800

Liquefazione

- Prove HVSR per microzonazione sismica 2012
- Prove HVSR per microzonazione sismica 2014 e studi precedenti

Fig.15 estratto dalla TAv. A2 allegata al PSC di Casalecchio di Reno e relativa legenda

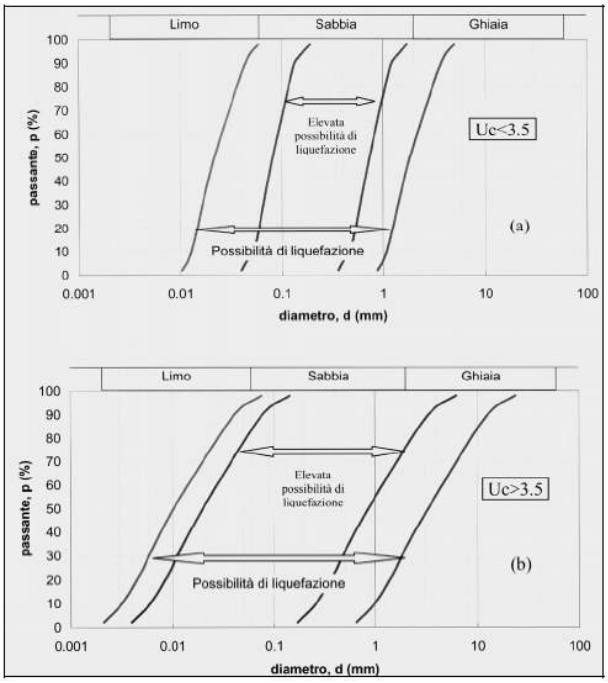
La Tav.A1 inserisce l'area in esame tra le aree identificate dalla lettera A: la legenda non esplicita meglio le caratteristiche di questa area ma, facendo riferimento alla succitata cartografia del PTCP (che riporta le medesime suddivisioni del territorio relativamente alla suscettibilità per effetti locali) è possibile ipotizzare che si tratti di aree potenzialmente soggette ad amplificazioni per caratteristiche litologiche.
La Tav.A2 inserisce l'area in studio tra quelle per cui, dal punto di vista degli aspetti sismici, è sufficiente un approccio di II° livello.

I dati presentati consentono di definire il modello sismico del suolo alla scala vasta. Il passo successivo consiste nel calare tali dati nella specifica area di progetto. Per questo motivo, occorre descrivere in chiave sismica le caratteristiche del sottosuolo che caratterizza l'area:
- si appoggia su una sequenza sostanzialmente incoerente, dotata di caratteristiche meccaniche da buone a ottime, sequenza della quale sarà analizzato il comportamento sismico.
- in funzione delle caratteristiche geomeccaniche della sequenza e della presenza di acqua fino alla profondità indagata è possibile definire anche la risposta sismica del terreno di fondazione, seguendo quelle che sono le indicazioni contenute nel D.M: 14/1/2008 (con i relativi allegati tecnici).

**Liquefazione**
Con tale termine s'intende la perdita totale di resistenza dei terreni saturi soggetti a sollecitazioni statiche o dinamiche, in conseguenza delle quali il terreno si comporta come una massa viscosa avendo raggiunto una condizione di fluidità. Questo comportamento è tipico delle sabbie fini sciolte quando, sotto l'azione dei carichi applicati o di forze idrodinamiche, la pressione dell'acqua dei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, stato nel quale gli sforzi efficaci si riducono a zero.
La liquefazione di un deposito può avvenire sia in condizioni statiche sia sotto sollecitazioni dinamiche cicliche. Vengono identificati in bibliografia tre principali meccanismi di liquefazione:
1. Liquefazione per filtrazione
2. Liquefazione per effetto di carichi monotonici crescenti
3. Liquefazione per effetto di carichi ciclici

**Criteri di previsione e metodi per la valutazione del potenziale di liquefazione**
Per la stima di dettaglio della probabilità di liquefazione in un deposito sabbioso in caso di sisma sarebbe necessaria la conoscenza approfondita di tutti i fattori che determinano almeno in linea potenziale, il fenomeno. Risulta chiaro che è praticamente impossibile inglobare in un unico modello matematico tutti i parametri rappresentativi della liquefazione e per questo si ricorre a delle semplificazioni basate su studi recenti:

1. Osservazione delle caratteristiche sismiche, geologiche e geotecniche dei siti colpiti da terremoti distruttivi
2. Analisi del comportamento dei terreni in prove cicliche di laboratorio in condizioni controllate.




Da tali studi derivano i primi criteri empirici di previsione, basati sulle caratteristiche granulometriche e sullo stato di addensamento, cui sono seguiti metodi via via più complessi, che tengono conto di un numero di parametri sempre più elevato. Tali metodi per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi sono classificabili in:

1. **Criteri empirici**: i parametri sono desunti da prove di identificazione o da misure della densità relativa ovvero da prove penetrometriche standard
2. **Metodi semplificati**: derivano dal confronto fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto e richiedono la valutazione dei parametri sia relativi all'evento sismico sia alle caratteristiche del deposito
3. **Metodi di analisi dinamica semplificata**: necessitano della determinazione della storia delle sollecitazioni delle tensioni e deformazioni di taglio alle varie profondità, conseguente ad un input sismico, definito da una storia di accelerazioni riferibile al substrato roccioso
4. **Metodi dinamici avanzati**: vengono ricostruiti in condizioni bidimensionali mediante l'impiego di codici di calcolo ad elementi finiti o alle differenze finite ed in alcuni casi prevedono la modellazione integrata del sistema terreno-fondazione-struttura.

**Motivi di esclusione della verifica a liquefazione**

L'analisi preliminare della sismicità del sito e delle caratteristiche geotecniche del deposito, si permettere di verificare se la probabilità che si verifichi la liquefazione sia bassa o nulla. Lo studio specifico può dunque essere omesso nel caso si manifesti almeno una delle seguenti circostanze (come richiede la NTC D.M. 14/01/08):

- eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) inferiori a 0.1 g;
- profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)60 > 30$ oppure $qc1N>180$ dove $(N1)60$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e $qc1N$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nel primo grafico sotto riportato, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $Uc < 3,5$ e nel secondo, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $Uc > 3,5$.

Se lo studio mettesse in luce la suscettibilità alla liquefazione del terreno, e gli effetti conseguenti fossero tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorrerebbe procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o al trasferimento del carico agli orizzonti più profondi non suscettibili di liquefazione.

**Analisi sismica preliminare di II e III livello**

Le indagini eseguite, possono essere utilizzate in via preliminare per stimare i Fattori di

Amplificazione (F.A.) richiesti nell'analisi sismica semplificata, secondo quanto previsto dalla DGR Emilia Romagna 112/2007. Attraverso le indagini, infatti, sono stati definiti lo spessore del deposito di copertura e della profondità del bedrock (H) oltre alla velocità equivalente delle onde di taglio per lo spessore considerato ($Vs_H$ e $Vs_{30}$) del deposito di copertura. Le prove eseguite in situ per la determinazione delle $Vs_{30}$ (MASW e HVSR) hanno fornito un valore pari a 353 m/s, da cui discende la seguente indicazione dei Fattori di Amplificazione.
I Fattori di Amplificazione (F.A.) sono riferiti al Suolo A come previsto dall'Eurocodice 8, parte 1, e dal D.M. 14/9/2005 "Norme tecniche per le costruzioni", punto 3.2.1.
Per l'area di progetto tali fattori sono messi in evidenza in rosso nelle seguenti tabelle.

F.A. P.G.A.

| $Vs_{30}$ | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F.A. | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.1 | 1.0 | 1.0 |

F.A. INTENSITA' SPETTRALE - 0.1s < To < 0.5s

| $Vs_{30}$ | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F.A. | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.0 | 1.0 |

F.A. INTENSITA' SPETTRALE - 0.5s < To < 1.0s

| $Vs_{30}$ | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F.A. | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.5 | 1.2 | 1.0 |

Facendo riferimento alla tavola A2 allegata al PSC del Comune di Casalecchio di Reno, si fa notare che esiste una discrepanza tra il dato rilevato per questa relazione e quello deducibile dalla suddetta cartografia: in particolare si segnala la differenza tra il P.G.A. deducibile dalla tabella precedente (pari a 1,4) e quello indicato nella legenda della tavola del PSC (pari a 2,2) che evidentemente è un valore che non trova riscontro nemmeno nelle tabelle dell'Eurocodice 8 e dal DM del 2005 precedentemente citati.
Si ritiene che il dato desunto dalla cartografia possa essere cautelativo e di tipo generico, basato su un approccio che non ha previsto l'esecuzione di prove specifiche. Per questo motivo, è possibile che per l'area di progetto il dato debba essere modificato in funzione dei dati oggi rilevati. Va sottolineato, in ogni caso che in fase di progettazione preliminare degli interventi edificatori, saranno le ulteriori indagini di tipo sismico a confermare e ad approfondire i dati proposti.

**Stima della liquefacibilità – considerazioni preliminari**
In assenza di specifici dati ricavati da indagini geognostiche tipo CPT o CPTU, assenza dovuta alla natura prevalentemente granulare dei sedimenti presenti nel primo sottosuolo dell'area in studio, in questa fase preliminare propedeutica alla progettazione degli interventi edificatori previsti è possibile solo riportare alcune considerazioni in merito alla potenziale liquefacibilità dei terreni presenti nei primi 15 metri della successione stratigrafica.
Al di sotto dello strato di riporto presente in superficie sono stati rinvenuti livelli di sabbie e sabbie limose di spessore pari a circa 1 metro; a causa della possibilità del livello di falda, attualmente rinvenuto a circa 6,5 metri al di sotto del pc, di risalire in maniera anche sensibile a seguito di eventi meteorologici di buona intensità e durata, fino a saturare questi orizzonti granulari, si creerebbero le condizioni tali per cui in caso di sisma si possa verificare il fenomeno della liquefazione.

Per ottenere ulteriori parametri in grado di escludere o meno una delle condizioni espresse in precedenza per cui questo fenomeno si possa innescare, si è proceduto all'analisi granulometrica di due campioni disturbati prelevati nel corso dell'esecuzione dei sondaggi geognostici in corrispondenza dei livelli sabbiosi e sabbioso limosi: i risultati di queste analisi (in un caso si è proceduto all'esecuzione di una granulometria per setacci e per sedimentazione mentre per l'altra sono stati utilizzati i soli setacci) sono riportati nei seguenti grafici. Avendo calcolato che il coefficiente di uniformità (Uc) era per entrambi i campioni superiore a 3,5 è stato utilizzato il grafico relativo per valutare la possibilità di liquefazione: è risultato che il campione prelevato nel sondaggio S1 a profondità comprese tra 5,10 e 5,50 metri dal pc rientra tra quelli con elevata possibilità di liquefazione mentre il campione prelevato nel sondaggio S2 a profondità comprese tra 3,20 e 3,40 metri dal pc risulta scarsamente liquefacibile.

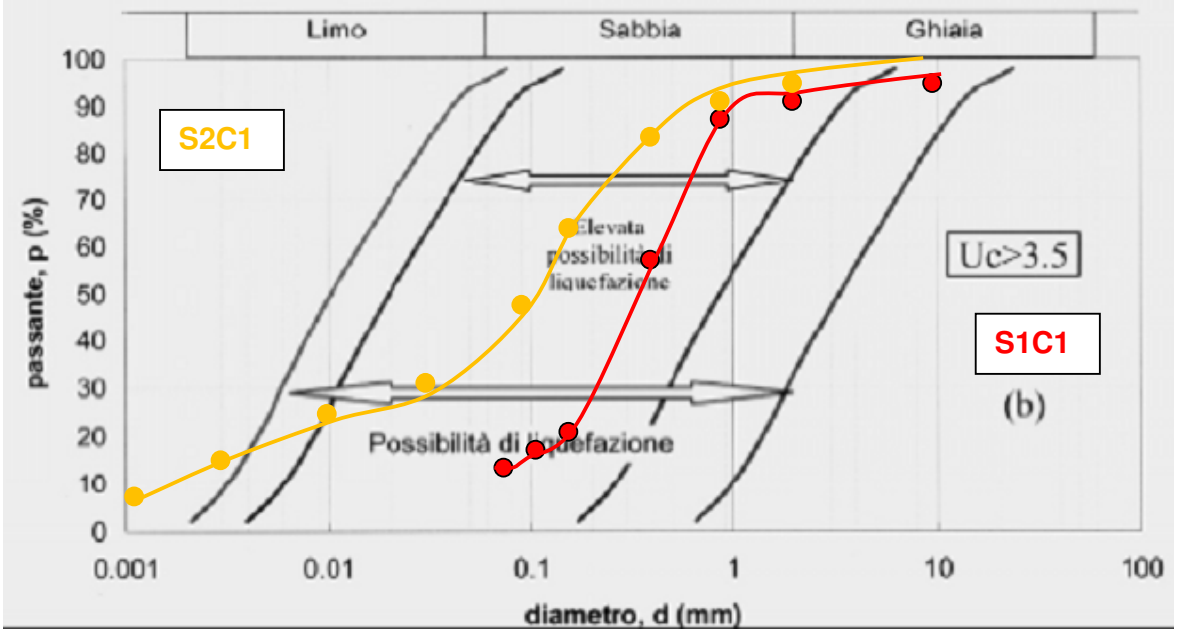



Fig.16 distribuzione granulometrica dei campioni di sabbia prelevati nei sondaggi geognostici sovrapposte ai campi che stabiliscono la potenzialità di liquefazione in caso di Uc>3,5

In conclusione è possibile affermare che, vista la sostanziale disomogeneità dei risultati delle analisi granulometriche eseguite in due distinte zone del comparto ed a profondità diverse, la potenziale liquefacibilità dei terreni incoerenti a prevalente composizione sabbiosa deve essere valutata con particolare attenzione e cura in corrispondenza di ogni lotto edificatorio del comparto, procedendo al prelievo di campioni rappresentativi degli strati sabbiosi e sabbioso limosi aventi spessori non inferiori a 1 metro, campioni dei quali dovrà essere ricostruita la curva granulometrica quale importante fattore discriminante che dovrà essere confrontato con gli altri criteri di esclusione sopra riportati.

**Definizione della categoria di sottosuolo**

Attraverso le prove effettuate è stato possibile ricostruire la risposta sismica locale, termine con il quale si intende l'insieme delle modifiche che un moto sismico, relativo ad una formazione rocciosa di base posta ad una certa profondità nel sottosuolo, subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie.

Il sito, infatti è stato sottoposto ad una indagine che ha consentito di ricostruire i seguenti aspetti (per via diretta ed indiretta):

- stratigrafia con dettagliata definizione dell'andamento dei contatti dei livelli litologici riconosciuti nei primi 30 metri dal p.c,
- caratteristiche meccaniche dei terreni, con riferimento al loro comportamento dinamico,
- morfologia dell'area.

Per gli studi di risposta sismica locale finalizzati alla previsione delle azioni sismiche sugli edifici da realizzare è stato caratterizzato il terreno ricostruendo il valore di Vs (velocità delle onde di taglio) mediante l'esecuzione di una prova MASW associata ad una prova HVSR. Si richiamano brevemente alcuni contenuti del decreto citato.

**Il suolo è suddiviso in cinque categorie fondamentali:**

| **Categorie** | **Descrizione** | **S** |
|---|---|---|
| A | Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi con Vs superiori a 800 m/sec, comprendenti spessori di alterazione non superiori a 5 metri | 1 |
| B | Sabbie e ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, di spessore superiore a 10 metri con graduale miglioramento delle caratteristiche meccaniche con la profondità e Vs comprese tra 360 m/sec e 800 m/sec, | 1,25 |
| C | Sabbie e ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza, in spessori variabili tra decine e centinaia di metri, con valori di Vs compresi tra 180 m/sec e 360 m/sec, | 1,25 |
| D | Sabbie e ghiaie da sciolti a poco addensati o coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da Vs inferiore a 180 m/sec, | 1,35 |
| E | Profili di terreno costituiti da strati alluvionali superficiali, con valori di Vs simili a quelli di C e D e spessore compreso tra 5 e 20 metri giacenti su un substrato di materiale più rigido con Vs maggiore a 800 m/sec. | 1,25 |
| S1 | Depositi che includono uno strato di almeno 10 metri di spessore di argille/limi di bassa consistenza con elevato indice di plasticità (> 40) e contenuto in acqua, Cu (coesione non drenata) compresa tra 10 KN/mq e 20 KN/mq e Vs inferiori a 100 m/sec, | Servono studi speciali |
| S2 | Depositi soggetti a liquefazione e argille sensitive. | |

In base alle caratteristiche del terreno di fondazione, ricostruite mediante l'apposita campagna geofisica (si veda a tal proposito la documentazione allegata), è stato possibile verificare che la sequenza *può essere assimilata ad un suolo di tipo C con valore di Vs30 pari a 353 m/sec.* Si fa presente che il valore calcolato si pone subito al di sotto di quello che segna il passaggio tra suoli riconducibili alla categoria C e quelli riconducibili ala categoria B: tenendo conto che alcuni autori (Roser e Gosar 2010, Mulargia e Castellaro 2009) stimano l'incertezza dei valori di $Vs_{30}$ tra il 10% ed il 20%, nelle fasi di progettazione più avanzate si renderà necessario procedere a verifiche più precise del valore di questo importante parametro utilizzando, ad esempio, metodologie quali il Down Hole.
Come si può verificare analizzando il grafico che segue, il valore di Vs30 pari a 353 m/sec si riferisce all'ipotesi di fondazioni superficiali impostate alla stessa quota del pc: nel caso in cui si progettassero fabbricati con fondazioni più profonde (presenza di un piano interrato o scelta di fondazioni profonde) il valore della Vs 30 si porrebbe al di sopra di 360 m/sec e di conseguenza il suolo sarebbe inserito nella **categoria B**.

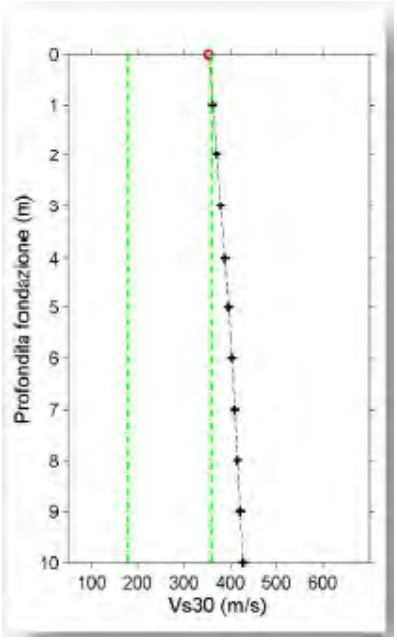



Fig.16 variazione del parametro Vs30 in funzione della profondità di posa delle fondazioni

Per procedere alla definizione dei parametri sismici richiesti dalla nuova normativa, dunque, va tenuto presente che la zona di progetto ricade in zona sismica 3, caratterizzata da un rapporto A/g = 0,15 (sismicità bassa).

In considerazione del fatto che il lotto in esame ricade all'interno di due differenti ed adiacenti maglie in cui è stato suddiviso l'intero territorio italiano, vengono di seguito riportati i parametri sismici relativi ad entrambe le maglie: si sottolinea che l'elaborazione è stata eseguita ipotizzando un suolo di tipo B in entrambe le maglie.

Parametri sismici della porzione settentrionale del lotto

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii
Muro rigido: 0

Sito in esame.

latitudine: 44,4663334586055
longitudine: 11,2809518786728
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sito 1 | ID: 16951 | Lat: 44,4637Lon: 11,2493 | Distanza: 2528,693 |
| Sito 2 | ID: 16952 | Lat: 44,4650Lon: 11,3193 | Distanza: 3045,991 |
| Sito 3 | ID: 16730 | Lat: 44,5150Lon: 11,3175 | Distanza: 6137,619 |
| Sito 4 | ID: 16729 | Lat: 44,5137Lon: 11,2474 | Distanza: 5899,100 |

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):
Probabilità di superamento: 81 %
Tr: 30 [anni]
ag: 0,054 g
Fo: 2,483
Tc*:0,257[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50[anni]
ag: 0,067 g
Fo: 2,485
Tc*: 0,271 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):
Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475[anni]
ag: 0,165 g
Fo: 2,390
Tc*: 0,309[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975[anni]
ag: 0,209 g
Fo: 2,416
Tc*: 0,316[s]

Coefficienti Sismici
SLO:
Ss: 1,200
Cc: 1,440
St: 1,000
Kh: 0,013
Kv: 0,006
Amax: 0,634
Beta: 0,200
SLD:
Ss: 1,200
Cc: 1,430
St: 1,000
Kh: 0,016
Kv: 0,008
Amax: 0,787
Beta: 0,200
SLV:
Ss: 1,200
Cc: 1,390
St: 1,000
Kh: 0,047
Kv: 0,024
Amax: 1,938
Beta: 0,240
SLC:
Ss: 1,200
Cc: 1,390
St: 1,000
Kh: 0,070
Kv: 0,035
Amax: 2,461
Beta: 0,280

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50
Geostru software - www.geostru.com
Coordinate WGS84
latitudine: 44.465393
longitudine: 11.279958

Parametri sismici

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii
Muro rigido: 0

Sito in esame.
latitudine: 44,4639285113234
longitudine: 11,2816808211626
Classe: 2
Vita nominale: 50

Siti di riferimento

| | | | |
|---|---|---|---|
| Sito 1 | ID: 16951 | Lat: 44,4637Lon: 11,2493 | Distanza: 2569,825 |
| Sito 2 | ID: 16952 | Lat: 44,4650Lon: 11,3193 | Distanza: 2986,972 |
| Sito 3 | ID: 17174 | Lat: 44,4150Lon: 11,3211 | Distanza: 6272,983 |
| Sito 4 | ID: 17173 | Lat: 44,4137Lon: 11,2512 | Distanza: 6085,478 |

Parametri sismici della porzione meridionale del lotto

Categoria sottosuolo: B
Categoria topografica: T1
Periodo di riferimento: 50anni
Coefficiente cu: 1

Operatività (SLO):
Probabilità di superamento: 81%
Tr: 30[anni]
ag: 0,055 g
Fo: 2,484
Tc*: 0,257[s]

Danno (SLD):
Probabilità di superamento: 63 %
Tr: 50[anni]
ag: 0,068 g
Fo: 2,480
Tc*: 0,270[s]

Salvaguardia della vita (SLV):
Probabilità di superamento: 10 %
Tr: 475[anni]
ag: 0,165 g
Fo: 2,406
Tc*: 0,304[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):
Probabilità di superamento: 5 %
Tr: 975[anni]
ag: 0,208 g
Fo: 2,426
Tc*: 0,314[s]

Coefficienti Sismici
SLO:
Ss: 1,200
Cc: 1,440
St: 1,000
Kh: 0,013
Kv: 0,007

| | | |
|---|---|---|
| | Amax: | 0,647 |
| | Beta: | 0,200 |
| SLD: | | |
| | Ss: | 1,200 |
| | Cc: | 1,430 |
| | St: | 1,000 |
| | Kh: | 0,016 |
| | Kv: | 0,008 |
| | Amax: | 0,805 |
| | Beta: | 0,200 |
| SLV: | | |
| | Ss: | 1,200 |
| | Cc: | 1,400 |
| | St: | 1,000 |
| | Kh: | 0,048 |
| | Kv: | 0,024 |
| | Amax: | 1,946 |
| | Beta: | 0,240 |
| SLC: | | |
| | Ss: | 1,200 |
| | Cc: | 1,390 |
| | St: | 1,000 |
| | Kh: | 0,070 |
| | Kv: | 0,035 |
| | Amax: | 2,451 |
| | Beta: | 0,280 |

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50
Geostru software - www.geostru.com
Coordinate WGS84
latitudine: 44.462988
longitudine: 11.280687

Si evidenzia che dal punto di vista topografico l'area ricade in una zona T1 della Tabella 3.2.IV, caratterizzata cioè da superficie pianeggiante. Pertanto il relativo coefficiente di amplificazione topografica vale 1,0.

Si ricorda che le tipologie di opere di progetto appartengono alle costruzioni di Tipo 2 della Tabella 2.4.I del decreto citato, quelle con vita nominale $V_N$ superiore a 50 anni ed alla classe II richiamate nel paragrafo 2.4.2, che si riferisce all'uso previsto dei fabbricati. Pertanto in prima approssimazione il periodo di riferimento massimo ipotizzabile per l'azione sismica vale 50 x 1,0= 50 anni.

## CONSIDERAZIONI FINALI

Sulla scorta delle informazioni desunte dalla campagna geognostica preliminare e dall'elaborazione complessiva dei dati, è possibile evidenziare come il sottosuolo presente nell'area oggetto di questa relazione, fino alla massima profondità indagata di circa 12 metri dal p.c., corrispondente al tetto del substrato litoide sia dato da una sequenza sostanzialmente regolare ed omogenea caratterizzata da uno strato superficiale di terreno di riporto di spessore variabile (non superiore a 2 metri), cui segue un livello di sedimenti incoerenti (ghiaie e sabbie mediamente addensate in matrice fine) dello spessore medio di circa 10 metri aventi al tetto un livello di sabbie e sabbie limose di cui non è stato possibile valutare la continuità laterale. Al di sotto si rinviene il substrato riconducibile ai sedimenti argillosi della Formazione di Pantano.
La presenza nel passato di un'attività di estrazione di inerti all'interno dell'area rende particolarmente complessa una ricostruzione di dettaglio degli spessori del terreno di riporto, fattore questo in grado di influenzare in maniera determinante sulle scelte progettuali dei singoli interventi edificatori previsti, sia per quanto riguarda la scelta della tipologia di fondazioni sia per quanto riguarda la possibilità di realizzare piani interrati. Per questo già in fase di progettazione preliminare si rende necessario procedere all'esecuzione di specifiche indagini geognostiche di tipo diretto (sondaggi a carotaggio continuo) ubicate in corrispondenza dei singoli edifici in grado di fornire informazioni più puntuali e dettagliate sulle eventuali disomogeneità di spessore e litologie dei sedimenti presenti nel primo sottosuolo.

La falda è stata ritrovata ad una profondità di circa 6,5 metri dal p.c., all'interno del corpo ghiaioso - sabbioso rinvenuto con i sondaggi.

A livello di suggerimenti progettuali generici si fa presente che ad avviso degli scriventi sarebbe opportuno che la quota delle fondazioni fosse progettata sotto la base dei terreni di riporto, a causa della nota intrinseca disomogeneità composizionale e geotecnica di questo tipo di depositi antropici, prevedendo la realizzazione di fondazioni intestate ad una profondità superiore ai 2 – 3 metri anche in considerazione della presenza di uno strato di terreni grossolani dotati di buone caratteristiche geomeccaniche.

Nel presente documento sono stati indicati i valori caratteristici dei principali intervalli che costituiscono il modello geotecnico ricostruito attraverso le prove, valori che potranno essere utilizzati per un preliminare dimensionamento delle strutture di fondazione e comunque serviranno per le valutazioni relative alle interazioni tra terreno e futuri edifici anche in chiave di risposta sismica.

Dal punto di vista del comportamento sismico, le indagini hanno consentito di verificare in via preliminare che i primi 30 metri di sequenza nelle aree indagate sono classificabili in superficie come suolo di tipo C con $VS_{30}$ pari a circa 353 m/sec. Nell'ipotesi di fondazioni impostate a profondità superiori a 1 metro dall'attuale pc il valore delle $Vs_{30}$ si porrebbe al disopra dei 360 m/sec ed il suolo dal punto di vista sismico sarebbe classificato come di tipo B, cambiando, dunque, la sua risposta nei confronti di evento sismico. Cautelativamente non è stato considerato lo scenario più favorevole.

La difficoltà nella ricostruzione degli spessori dei litotipi meramente sabbiosi, legata alle tipologie di indagine scelta (prove DPSH) non consente una stima del potenziale di liquefazione che abbia una veridicità ubiquitaria nell'area.
La presenza a profondità inferiori a 10 metri dal pc di sedimenti sabbiosi o sabbioso-limosi con spessori che possono superare il metro e la potenziale possibilità che il livello di falda, nel corso di stagioni caratterizzate da una piovosità più intensa e costante rispetto alla siccità che da qualche mese sta interessando il territorio regionale, possa innalzarsi fino a saturare tali livelli, fanno sì che nell'ipotesi di spessori cospicui di sole sabbie sature il fenomeno della liquefazione possa accadere per valori di accelerazione validi per l'area in cui è ubicato l'intervento edificatorio.
Tale ipotesi, molto cautelativa in quanto la frazione ghiaiosa sembra ovunque ben rappresentata sia nel fuso granulometrico oggetto di analisi di laboratorio, sia nella ricostruzione delle prove DPSH eseguite, dovrà comunque essere attentamente e puntualmente verificata in occasione

delle fasi progettuali edificatorie che seguiranno questa relazione, al fine di verificare l'effettiva sussistenza del rischio della liquefazione.

Bologna, li 24/07/2017

Dott. Geol. Piero Cavarocchi

Dott. Geol. Riccardo Galassi

**NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

La stesura della seguente relazione è stata eseguita in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento elencate di seguito:
"Norme tecniche per le costruzioni D.M. 14 gennaio 2008" e sue circolari applicative.
AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977;
AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio, Maggio 1990 (edizione provvisoria);
Eurocodice Ec7 per l'ingegneria geotecnica, Settembre 1988;
ISO 31-11: Quantities and units, Mathematical signs and symbols for use in the physical sciences and technology, 1992;
UNI ISO 2955: Rappresentazione delle unità SI e di altre unità usate nei sistemi con insiemi limitati di caratteri, 1987;
CNR-UNI: norme relative al prelievo di campioni, all'esecuzione di analisi granulometriche, alla determinazione dei limiti di consistenza, alla classificazione di una terra;
ASTM: norme relative alla descrizione di una terra, all'esecuzione di analisi granulometrica per via umida con sedimentazione ed aerometria, alla esecuzione di prova di compressione monoassiale, alla esecuzione di S.P.T., alla esecuzione di C.P.T.

**Bibliografia**


- Cestari F.: Prove geotecniche in sito; Geo-Graph Ed., Segrate, 1990.
- Lambe W.T., Whitman R.V.: Meccanica dei terreni. Dario Flaccovio Ed., Palermo, 1997.
- Leoni G.: Idrografia e bonifica del bacino del Reno. Consorzio della Bonifica Renana; Bologna, 1994.
- Marchi G.F.: Effetti delle variazioni stagionali di umidità dei terreni coesivi su fabbricati con fondazioni superficiali. Atti del Convegno "La Geotecnica in Italia e in Europa" Università degli Studi di Ferrara, 1993.
- Regione Emilia Romagna: Carta dei Rischi Geo-Ambientali; Bologna, 1994.
- Regione Emilia Romagna: Carta Tecnica Regionale; Bologna.
- Regione Emilia Romagna: I Suoli dell'Emilia Romagna; Bologna, 1994.
- F. Cestari - prove Geotecniche in sito - ed. GEO-GRAPH 1990
- M. Casadio - Il Manuale del Geologo - Pitagora Editrice
- Di Martino - Geotecnica Stradale
- P. Focardi - Prove in sito - Geologia Tecnica 1982
- Piacentini - Righi - Valutazione Compressibilità dei terreni e Consolidamento in base ai risultati di prove penetrometriche statiche - Inarcos Bologna
- P. Ventura - Interpretazione delle prove penetrometriche statiche tramite punta piezometrica
- Pelli - Ottaviani - Definizione della resistenza non drenata delle argille del Mare Adriatico mediante prove penetrometriche statiche R.I.G. 1992
- G. Sanglerat - Le Penetrometre et la reconnoissance des soils - Dunod Paris 1965
- G. Sanglerat - The Penetrometre and soil exploration - ESPC 1972
- A. Flora - Introduzione alle Indagini Geotecniche - Helvelius Edizioni
- C. Guidi - Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni - Vol. I-II - Hoepli (1975)
- F. Gambini - Manuale dei Piloti - Ed. Scac
- Herminier - Theory for the interpretation of penetration test data - Annales I.T.B.T.P. - Congress of Zurich 1953)
- Bellotti-Jamiolkowski-Ghionna-Pedroni - Penetrometro Statico - terreni non coesivi - Atti Convegno Naz. Geotecnica 1983
- R. Lancellotta - Penetrometro Statico - terreni coesivi - Atti Convegno Naz. Geotecnica 1983
- R. Lancellotta - Meccanica dei Terreni - Elementi di Geotecnica - L.E.U. Torino
- S.G.S. - Recommended Standard for Cone Penetration Tests - June 1992
- Sunda Strumentazione Geotecnica - Manuale Uso Penetrometro Statico
- M. Carter (1983) - Geotechnical engineering-Handbook-Pentech Press-London

- F. Colleselli-Soranzo (1980) - Esercitazioni di Geotecnica - Ed. Cleup - Padova
- R.F. Craig (1985) - Soil mechanics - Van Notraan Reinhold (UH) Co.Ltd
- R.E. Hunt (1986) - Geotechnical engineering techniques and practices - MeGraw- Hill - Inc. USA
- M. Pellegrini (1982) - Geologia Applicata - Ed. Pitagora - Bologna
- G. Pilot (1982) - Foundation engineering - Ecole national des ponts et chausees - Paris
- A.G.I. (1977) - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - AGI - Roma
- Larsson R. (1985) - The CPT test Equipment - testing - evaluation. An situ method for determination of stratigraphy and properties in soil profiles - S.G.I.
- P. Mayne (1992) Tentative method for estimation Gvo from Qc data in sand - Potsdam NY 1991
- Lunne, P.K. Robertson and Powell J.J.M. (1997) - Cone Penetration Test in Geotechnical Pratice - B.A. & P.
- T. Lunne, A. Kleven (1981) - Role of CPT in North Sea foundation engineering - Session ASCE Nationali Convetion - S. Louis
- T. Lunne, Christoffersen H.P. (1985) - Interpretation of Cone Penetration Data for Offshore Sands - Norwegian Geotechnical Institute 1985 - Pbl. 156
- Jamiolkowski M. et al (1985) New developments in field and laboratory testing of soils
- Kulhawy F.H., Mayne P.H. (1990) - Manual on estimating soil properties for foundation design - Electric Power Research Institute 1990
- Robertson P.K., Campanella R.G., Greig J. et al. (1986) - Use of piezometer cone data - - Use in situ tests in Geotechnical Engineering - ASCE Conference 1986
- Robertson P.K., Campanella R.G. (1983) - Interpretation of cone penetration test - Canadian Geotechnical Journal - 20(4) .

PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE DPSH
SONDAGGI GEOGNOSTICI

Elaborati grafici e numerici delle prove

ANALISI GRANULOMETRICHE

Elaborati grafici e numerici

| Committente | Profondità raggiunta | Quota Ass. P.C. | Certificato n° | Pagina |
|---|---|---|---|---|
| Grande Sole Budrio | 13,2 metri | | | |
| **Operatore** | **Indagine** | **Note1** | | **Inizio/Fine Esecuzione** |
| | | | | 4 luglio 2017 |
| **Responsabile** | **Sondaggio** | **Tipo Carotaggio** | **Tipo Sonda** | **Coordinate X Y** |
| Dott. Piero Cavarocchi | S1 | carotaggio continuo | C.M.V. | |

| Scala (mt) | Litologia | Descrizione | Quota | S.P.T. (n° Colpi) | Campioni | Falda | Piezometro (P) P-(1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | Terreno di riporto: ciottoli di diametro fino a 8 cm in matrice limoso argillosa. | 1.20 | | | | |
| | | Limo argilloso ocra passante a argilla limosa bruno grigiastra con sparsi ciottoli (diametro 2-3 cm). A 1,7 metri orizzonte centimetrico con sostanza organica. Da 1,8 è presente una certa frazione sabbiosa. | 1.90 | | | | |
| 2 | | Sabbia grigia ben cernita, asciutta. | 2.70 | | | | |
| 3 | | Ghiaia (diametro 1-3 cm) limosa, Sporadicamente ciottoli di dimensioni fino a 10 cm. | 4.00 | | | | |
| 4 | | Limo sabbioso grigio. | 4.50 | | | | |
| 5 | | Ghiaia e sabbia in matrice limosa. Ciottoli fino a 10 cm. | | | | | |
| 6 | | | | | | 6.50 | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | | | | 12-21-37 | | | |
| 11 | | | | 10.50 PC | | | |
| 12 | | | 12.70 | | | | A 12.50 |
| | | Substrato litoide (argilliti della Formazione di Pantano). | 13.20 | | | | |

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato , Rs-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: carotaggio continuo

Sonda: C.M.V.

| Committente | Profondità raggiunta | Quota Ass. P.C. | Certificato n° | Pagina |
|---|---|---|---|---|
| Grande Sole Budrio | 12,0 metri | | | |
| **Operatore** | **Indagine** | **Note1** | | **Inizio/Fine Esecuzione** |
| | | | | 4 luglio 2017 |
| **Responsabile** | **Sondaggio** | **Tipo Carotaggio** | **Tipo Sonda** | **Coordinate X Y** |
| Dott. Piero Cavarocchi | S2 | carotaggio continuo | C.M.V. | |

| Scala (mt) | Litologia | Descrizione | Quota | S.P.T. (n° Colpi) | Campioni | Falda | Piezometro (P) P-(1) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | Terreno di riporto: limo argilloso sabbioso ocra marrone con sparsi ciottoli | 1.30 | | | | |
| 2 | | Ghiaia (dimensioni 2-3 cm) e sabbia in matrice limosa. Sparsi ciottoli fino a 10 cm. | | | | | |
| 3 | | | 3.20 | | | | |
| 4 | | Sabbia limosa grigia | 4.50 | 4-4-4<br>4.00 PC | | | |
| 5 | | Ghiaia e sabbia in matrice limosa. Ciottoli eterometrici (1-7 cm) Da 7,5 metri le dimensioni dei ciottoli aumentano fino a 10 cm. | | | | | |
| 6 | | | | | | 6.50 | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | A 10.60 |
| 11 | | | | | | | |
| 12 | | Substrato (argilliti della Formazione di Pantano). | 11.90<br>12.00 | | | | |

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato , Rs-Rimaneggiato da SPT
Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: carotaggio continuo

Sonda: C.M.V.

# PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

| | |
|---|---|
| Committente: Grande Sole srl Budrio<br>Cantiere: Area Ex Sapaba<br>Località: Casalecchio di Reno (BO) | |

Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

| | | |
|---|---|---|
| Rif. Norme | DIN 4094 | |
| Peso Massa battente | 63,5 | Kg |
| Altezza di caduta libera | 0,75 | m |
| Peso sistema di battuta | 8 | Kg |
| Diametro punta conica | 50,46 | mm |
| Area di base punta | 20 | cm² |
| Lunghezza delle aste | 1 | m |
| Peso aste a metro | 6,3 | Kg/m |
| Profondità giunzione prima asta | 0,80 | m |
| Avanzamento punta | 0,20 | m |
| Numero colpi per punta | N(20) | |
| Coeff. Correlazione | 3,007 | |
| Rivestimento/fanghi | No | |
| Angolo di apertura punta | 90 | ° |

PROVA ...DPSH1

Strumento utilizzato...DPSH (Dinamic Probing Super Heavy) Prova eseguita in data 13/07/2017
Profondità prova 6,20 mt Falda non rilevata
Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondità (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Kg/cm²) | Res. dinamica (Kg/cm²) | Pres. ammissibil con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 7 | 0,855 | 58,14 | 68,02 | 2,91 | 3,40 |
| 0,40 | 5 | 0,851 | 41,34 | 48,59 | 2,07 | 2,43 |
| 0,60 | 5 | 0,847 | 41,16 | 48,59 | 2,06 | 2,43 |
| 0,80 | 4 | 0,843 | 32,78 | 38,87 | 1,64 | 1,94 |
| 1,00 | 8 | 0,840 | 60,39 | 71,92 | 3,02 | 3,60 |
| 1,20 | 6 | 0,836 | 45,11 | 53,94 | 2,26 | 2,70 |
| 1,40 | 5 | 0,833 | 37,44 | 44,95 | 1,87 | 2,25 |
| 1,60 | 6 | 0,830 | 44,75 | 53,94 | 2,24 | 2,70 |
| 1,80 | 18 | 0,776 | 125,62 | 161,82 | 6,28 | 8,09 |
| 2,00 | 13 | 0,773 | 84,06 | 108,72 | 4,20 | 5,44 |
| 2,20 | 10 | 0,820 | 68,59 | 83,63 | 3,43 | 4,18 |
| 2,40 | 6 | 0,817 | 41,00 | 50,18 | 2,05 | 2,51 |
| 2,60 | 6 | 0,814 | 40,86 | 50,18 | 2,04 | 2,51 |
| 2,80 | 4 | 0,811 | 27,14 | 33,45 | 1,36 | 1,67 |
| 3,00 | 4 | 0,809 | 25,29 | 31,27 | 1,26 | 1,56 |
| 3,20 | 2 | 0,806 | 12,60 | 15,64 | 0,63 | 0,78 |
| 3,40 | 2 | 0,803 | 12,56 | 15,64 | 0,63 | 0,78 |
| 3,60 | 2 | 0,801 | 12,52 | 15,64 | 0,63 | 0,78 |
| 3,80 | 3 | 0,798 | 18,73 | 23,46 | 0,94 | 1,17 |
| 4,00 | 2 | 0,796 | 11,69 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 4,20 | 2 | 0,794 | 11,65 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 4,40 | 2 | 0,791 | 11,62 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 4,60 | 1 | 0,789 | 5,79 | 7,34 | 0,29 | 0,37 |
| 4,80 | 2 | 0,787 | 11,56 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 5,00 | 3 | 0,785 | 16,29 | 20,75 | 0,81 | 1,04 |
| 5,20 | 7 | 0,783 | 37,91 | 48,42 | 1,90 | 2,42 |
| 5,40 | 4 | 0,781 | 21,61 | 27,67 | 1,08 | 1,38 |
| 5,60 | 10 | 0,779 | 53,89 | 69,17 | 2,69 | 3,46 |
| 5,80 | 45 | 0,577 | 179,69 | 311,27 | 8,98 | 15,56 |
| 6,00 | 43 | 0,575 | 161,84 | 281,23 | 8,09 | 14,06 |
| 6,20 | 33 | 0,624 | 134,62 | 215,83 | 6,73 | 10,79 |

PROVA ...DPSH2

Strumento utilizzato...DPSH (Dinamic Probing Super Heavy) Prova eseguita in data 13/07/2017
Profondità prova 2,60 mt Falda non rilevata
Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondità (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Kg/cm²) | Res. dinamica (Kg/cm²) | Pres. ammissibil con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 9 | 0,855 | 74,75 | 87,46 | 3,74 | 4,37 |
| 0,40 | 8 | 0,851 | 66,14 | 77,74 | 3,31 | 3,89 |
| 0,60 | 14 | 0,797 | 108,43 | 136,05 | 5,42 | 6,80 |
| 0,80 | 9 | 0,843 | 73,76 | 87,46 | 3,69 | 4,37 |
| 1,00 | 9 | 0,840 | 67,94 | 80,91 | 3,40 | 4,05 |
| 1,20 | 5 | 0,836 | 37,59 | 44,95 | 1,88 | 2,25 |
| 1,40 | 3 | 0,833 | 22,46 | 26,97 | 1,12 | 1,35 |
| 1,60 | 2 | 0,830 | 14,92 | 17,98 | 0,75 | 0,90 |
| 1,80 | 2 | 0,826 | 14,86 | 17,98 | 0,74 | 0,90 |
| 2,00 | 2 | 0,823 | 13,77 | 16,73 | 0,69 | 0,84 |
| 2,20 | 2 | 0,820 | 13,72 | 16,73 | 0,69 | 0,84 |
| 2,40 | 42 | 0,617 | 216,78 | 351,26 | 10,84 | 17,56 |
| 2,60 | 50 | 0,614 | 256,86 | 418,17 | 12,84 | 20,91 |

PROVA ...DPSH3

Strumento utilizzato...DPSH (Dinamic Probing Super Heavy) Prova eseguita in data 13/07/2017
Profondità prova 5,80 mt
Falda non rilevata
Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondità (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Kg/cm²) | Res. dinamica (Kg/cm²) | Pres. ammissibil con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 7 | 0,855 | 58,14 | 68,02 | 2,91 | 3,40 |
| 0,40 | 7 | 0,851 | 57,87 | 68,02 | 2,89 | 3,40 |
| 0,60 | 13 | 0,797 | 100,69 | 126,33 | 5,03 | 6,32 |
| 0,80 | 12 | 0,843 | 98,34 | 116,61 | 4,92 | 5,83 |
| 1,00 | 9 | 0,840 | 67,94 | 80,91 | 3,40 | 4,05 |
| 1,20 | 9 | 0,836 | 67,66 | 80,91 | 3,38 | 4,05 |
| 1,40 | 5 | 0,833 | 37,44 | 44,95 | 1,87 | 2,25 |
| 1,60 | 3 | 0,830 | 22,37 | 26,97 | 1,12 | 1,35 |
| 1,80 | 3 | 0,826 | 22,29 | 26,97 | 1,11 | 1,35 |
| 2,00 | 4 | 0,823 | 27,54 | 33,45 | 1,38 | 1,67 |
| 2,20 | 4 | 0,820 | 27,44 | 33,45 | 1,37 | 1,67 |
| 2,40 | 4 | 0,817 | 27,34 | 33,45 | 1,37 | 1,67 |
| 2,60 | 15 | 0,764 | 95,87 | 125,45 | 4,79 | 6,27 |
| 2,80 | 24 | 0,711 | 142,80 | 200,72 | 7,14 | 10,04 |
| 3,00 | 7 | 0,809 | 44,26 | 54,73 | 2,21 | 2,74 |
| 3,20 | 5 | 0,806 | 31,51 | 39,09 | 1,58 | 1,95 |
| 3,40 | 6 | 0,803 | 37,69 | 46,91 | 1,88 | 2,35 |
| 3,60 | 3 | 0,801 | 18,78 | 23,46 | 0,94 | 1,17 |
| 3,80 | 2 | 0,798 | 12,48 | 15,64 | 0,62 | 0,78 |
| 4,00 | 2 | 0,796 | 11,69 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 4,20 | 4 | 0,794 | 23,30 | 29,36 | 1,17 | 1,47 |
| 4,40 | 6 | 0,791 | 34,86 | 44,04 | 1,74 | 2,20 |
| 4,60 | 4 | 0,789 | 23,17 | 29,36 | 1,16 | 1,47 |
| 4,80 | 4 | 0,787 | 23,11 | 29,36 | 1,16 | 1,47 |
| 5,00 | 4 | 0,785 | 21,72 | 27,67 | 1,09 | 1,38 |
| 5,20 | 5 | 0,783 | 27,08 | 34,59 | 1,35 | 1,73 |
| 5,40 | 11 | 0,781 | 59,43 | 76,09 | 2,97 | 3,80 |
| 5,60 | 22 | 0,679 | 103,35 | 152,18 | 5,17 | 7,61 |
| 5,80 | 50 | 0,577 | 199,66 | 345,86 | 9,98 | 17,29 |

PROVA ...DPSH4

Strumento utilizzato...DPSH (Dinamic Probing Super Heavy) Prova eseguita in data 13/07/2017
Profondità prova 7,40 mt
Falda non rilevata
Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondità (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Kg/cm²) | Res. dinamica (Kg/cm²) | Pres. ammissibil con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 7 | 0,855 | 58,14 | 68,02 | 2,91 | 3,40 |
| 0,40 | 7 | 0,851 | 57,87 | 68,02 | 2,89 | 3,40 |
| 0,60 | 9 | 0,847 | 74,08 | 87,46 | 3,70 | 4,37 |
| 0,80 | 10 | 0,843 | 81,95 | 97,18 | 4,10 | 4,86 |
| 1,00 | 8 | 0,840 | 60,39 | 71,92 | 3,02 | 3,60 |
| 1,20 | 2 | 0,836 | 15,04 | 17,98 | 0,75 | 0,90 |
| 1,40 | 3 | 0,833 | 22,46 | 26,97 | 1,12 | 1,35 |
| 1,60 | 5 | 0,830 | 37,29 | 44,95 | 1,86 | 2,25 |
| 1,80 | 7 | 0,826 | 52,00 | 62,93 | 2,60 | 3,15 |
| 2,00 | 5 | 0,823 | 34,42 | 41,82 | 1,72 | 2,09 |
| 2,20 | 3 | 0,820 | 20,58 | 25,09 | 1,03 | 1,25 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2,40 | 3 | 0,817 | 20,50 | 25,09 | 1,03 | 1,25 |
| 2,60 | 2 | 0,814 | 13,62 | 16,73 | 0,68 | 0,84 |
| 2,80 | 3 | 0,811 | 20,36 | 25,09 | 1,02 | 1,25 |
| 3,00 | 3 | 0,809 | 18,97 | 23,46 | 0,95 | 1,17 |
| 3,20 | 6 | 0,806 | 37,81 | 46,91 | 1,89 | 2,35 |
| 3,40 | 44 | 0,603 | 207,58 | 344,01 | 10,38 | 17,20 |
| 3,60 | 24 | 0,701 | 131,51 | 187,64 | 6,58 | 9,38 |
| 3,80 | 6 | 0,798 | 37,45 | 46,91 | 1,87 | 2,35 |
| 4,00 | 7 | 0,796 | 40,90 | 51,38 | 2,05 | 2,57 |
| 4,20 | 14 | 0,744 | 76,43 | 102,76 | 3,82 | 5,14 |
| 4,40 | 5 | 0,791 | 29,05 | 36,70 | 1,45 | 1,84 |
| 4,60 | 4 | 0,789 | 23,17 | 29,36 | 1,16 | 1,47 |
| 4,80 | 2 | 0,787 | 11,56 | 14,68 | 0,58 | 0,73 |
| 5,00 | 10 | 0,785 | 54,30 | 69,17 | 2,72 | 3,46 |
| 5,20 | 30 | 0,683 | 141,73 | 207,52 | 7,09 | 10,38 |
| 5,40 | 28 | 0,681 | 131,90 | 193,68 | 6,60 | 9,68 |
| 5,60 | 31 | 0,629 | 134,91 | 214,43 | 6,75 | 10,72 |
| 5,80 | 28 | 0,677 | 131,18 | 193,68 | 6,56 | 9,68 |
| 6,00 | 16 | 0,725 | 75,92 | 104,64 | 3,80 | 5,23 |
| 6,20 | 7 | 0,774 | 35,42 | 45,78 | 1,77 | 2,29 |
| 6,40 | 5 | 0,772 | 25,25 | 32,70 | 1,26 | 1,64 |
| 6,60 | 7 | 0,770 | 35,27 | 45,78 | 1,76 | 2,29 |
| 6,80 | 13 | 0,719 | 61,11 | 85,02 | 3,06 | 4,25 |
| 7,00 | 19 | 0,717 | 84,51 | 117,84 | 4,23 | 5,89 |
| 7,20 | 22 | 0,666 | 90,83 | 136,45 | 4,54 | 6,82 |
| 7,40 | 36 | 0,614 | 137,13 | 223,28 | 6,86 | 11,16 |

PROVA ...DPSH5

Strumento utilizzato...DPSH (Dinamic Probing Super Heavy) Prova eseguita in data 13/07/2017
Profondità prova 5,20 mt
Falda non rilevata
Tipo elaborazione Nr. Colpi: Medio

| Profondità (m) | Nr. Colpi | Calcolo coeff. riduzione sonda Chi | Res. dinamica ridotta (Kg/cm²) | Res. dinamica (Kg/cm²) | Pres. ammissibil con riduzione Herminier - Olandesi (Kg/cm²) | Pres. ammissibile Herminier - Olandesi (Kg/cm²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 9 | 0,855 | 74,75 | 87,46 | 3,74 | 4,37 |
| 0,40 | 13 | 0,801 | 101,16 | 126,33 | 5,06 | 6,32 |
| 0,60 | 9 | 0,847 | 74,08 | 87,46 | 3,70 | 4,37 |
| 0,80 | 15 | 0,793 | 115,64 | 145,77 | 5,78 | 7,29 |
| 1,00 | 7 | 0,840 | 52,84 | 62,93 | 2,64 | 3,15 |
| 1,20 | 5 | 0,836 | 37,59 | 44,95 | 1,88 | 2,25 |
| 1,40 | 4 | 0,833 | 29,95 | 35,96 | 1,50 | 1,80 |
| 1,60 | 2 | 0,830 | 14,92 | 17,98 | 0,75 | 0,90 |
| 1,80 | 8 | 0,826 | 59,43 | 71,92 | 2,97 | 3,60 |
| 2,00 | 6 | 0,823 | 41,31 | 50,18 | 2,07 | 2,51 |
| 2,20 | 7 | 0,820 | 48,01 | 58,54 | 2,40 | 2,93 |
| 2,40 | 4 | 0,817 | 27,34 | 33,45 | 1,37 | 1,67 |
| 2,60 | 5 | 0,814 | 34,05 | 41,82 | 1,70 | 2,09 |
| 2,80 | 50 | 0,611 | 255,68 | 418,17 | 12,78 | 20,91 |
| 3,00 | 50 | 0,609 | 237,95 | 390,92 | 11,90 | 19,55 |
| 3,20 | 9 | 0,806 | 56,72 | 70,37 | 2,84 | 3,52 |
| 3,40 | 5 | 0,803 | 31,41 | 39,09 | 1,57 | 1,95 |
| 3,60 | 4 | 0,801 | 25,05 | 31,27 | 1,25 | 1,56 |
| 3,80 | 5 | 0,798 | 31,21 | 39,09 | 1,56 | 1,95 |
| 4,00 | 4 | 0,796 | 23,37 | 29,36 | 1,17 | 1,47 |
| 4,20 | 4 | 0,794 | 23,30 | 29,36 | 1,17 | 1,47 |
| 4,40 | 5 | 0,791 | 29,05 | 36,70 | 1,45 | 1,84 |
| 4,60 | 7 | 0,789 | 40,55 | 51,38 | 2,03 | 2,57 |
| 4,80 | 29 | 0,687 | 146,26 | 212,87 | 7,31 | 10,64 |
| 5,00 | 50 | 0,585 | 202,34 | 345,86 | 10,12 | 17,29 |
| 5,20 | 50 | 0,583 | 201,64 | 345,86 | 10,08 | 17,29 |

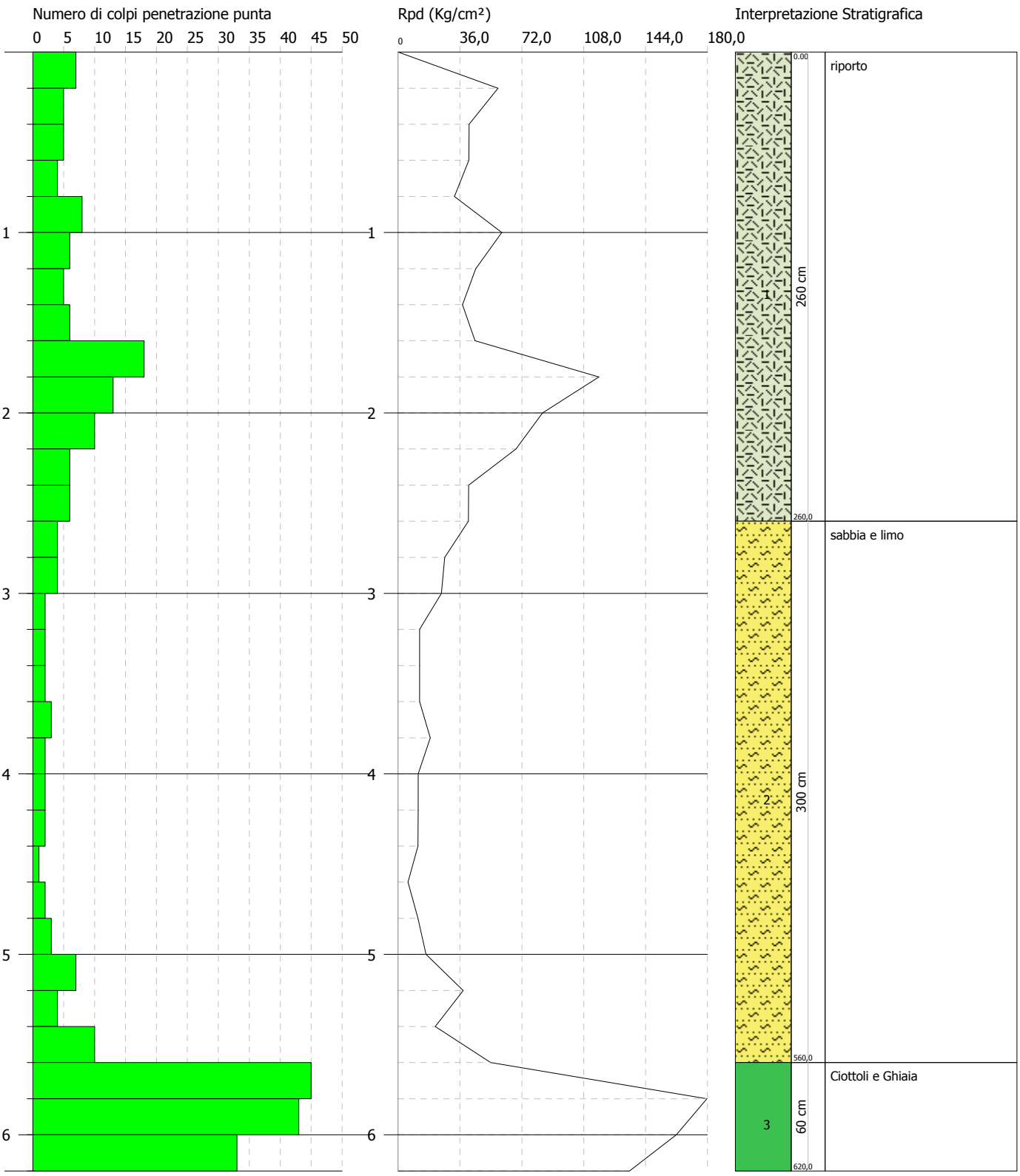
S.P.I.R.A.
Studio Professionale Indagini Restauro Ambiente
Via Murri. 44 - 40137 BOLOGNA

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH1
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente: Grande Sole srl Budrio
Cantiere: Area Ex Sapaba
Località: Casalecchio di Reno (BO)

Data: 13/07/2017

Scala 1:31



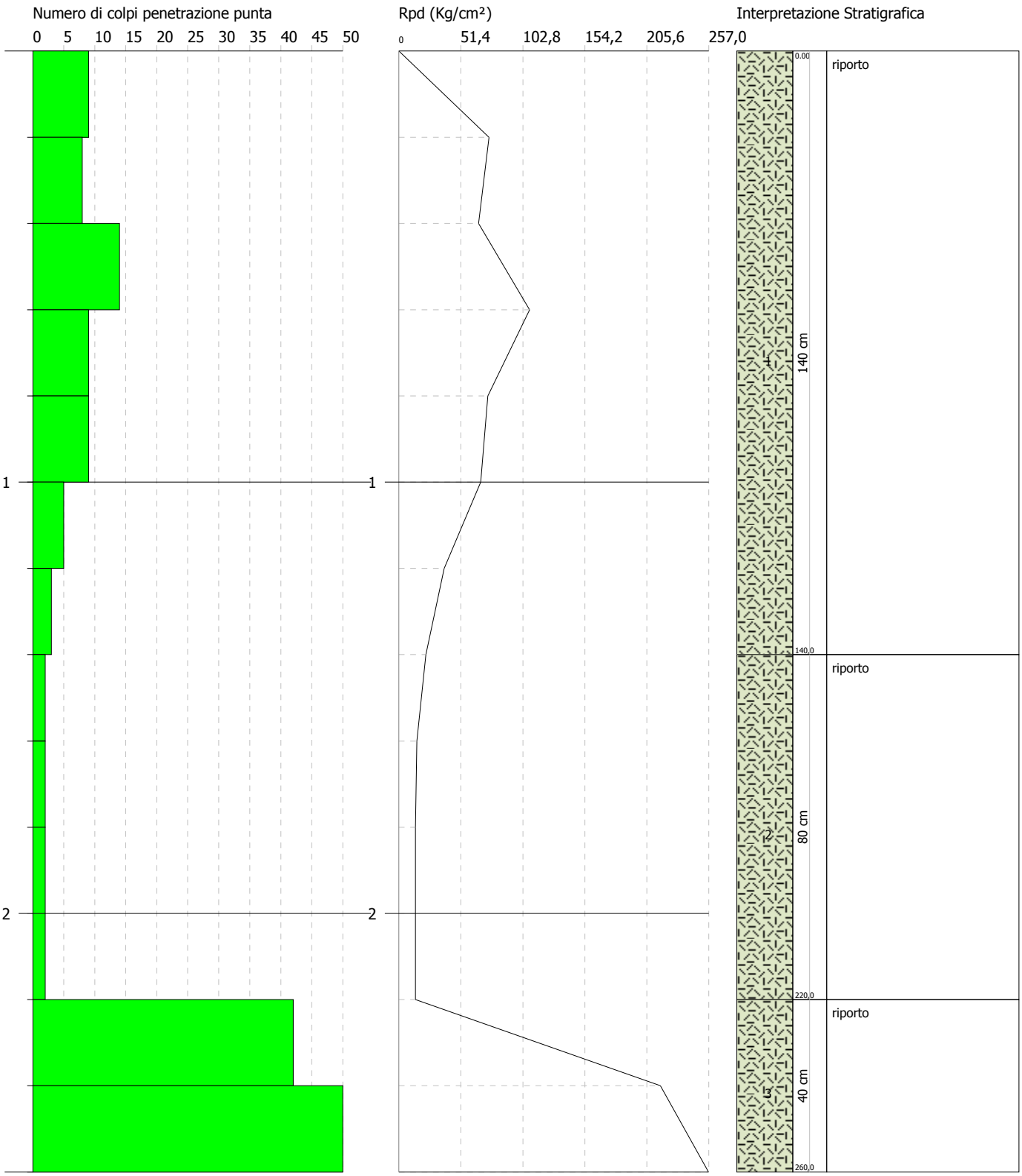
S.P.I.R.A.
Studio Professionale Indagini Restauro Ambiente
Via Murri. 44 - 40137 BOLOGNA

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH2
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente: Grande Sole srl Budrio
Cantiere: Area Ex Sapaba
Località: Casalecchio di Reno (BO)

Data: 13/07/2017

Scala 1:13



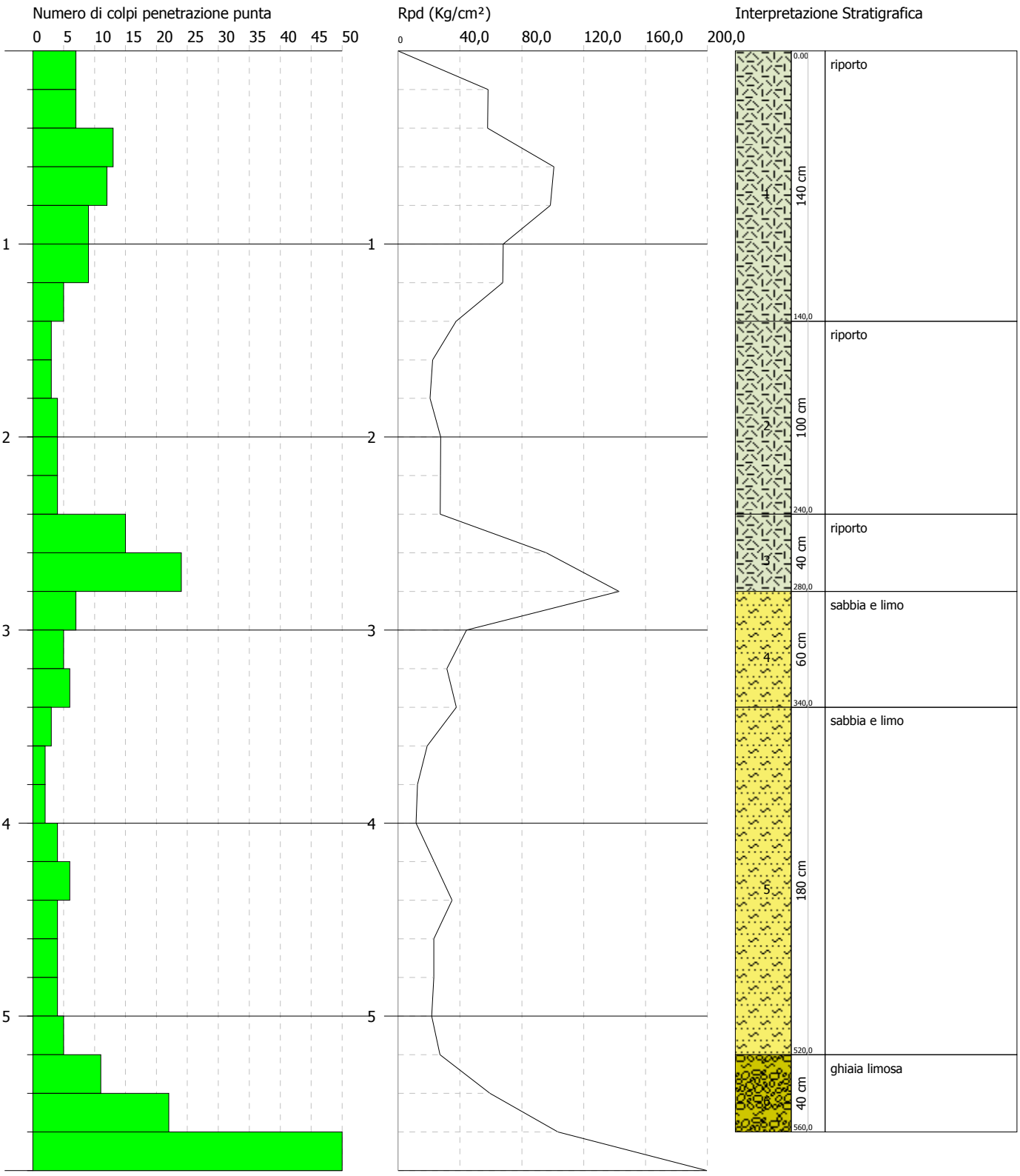
S.P.I.R.A.
Studio Professionale Indagini Restauro Ambiente
Via Murri. 44 - 40137 BOLOGNA

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH3
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente: Grande Sole srl Budrio
Cantiere: Area Ex Sapaba
Località: Casalecchio di Reno (BO)

Data: 13/07/2017

Scala 1:29



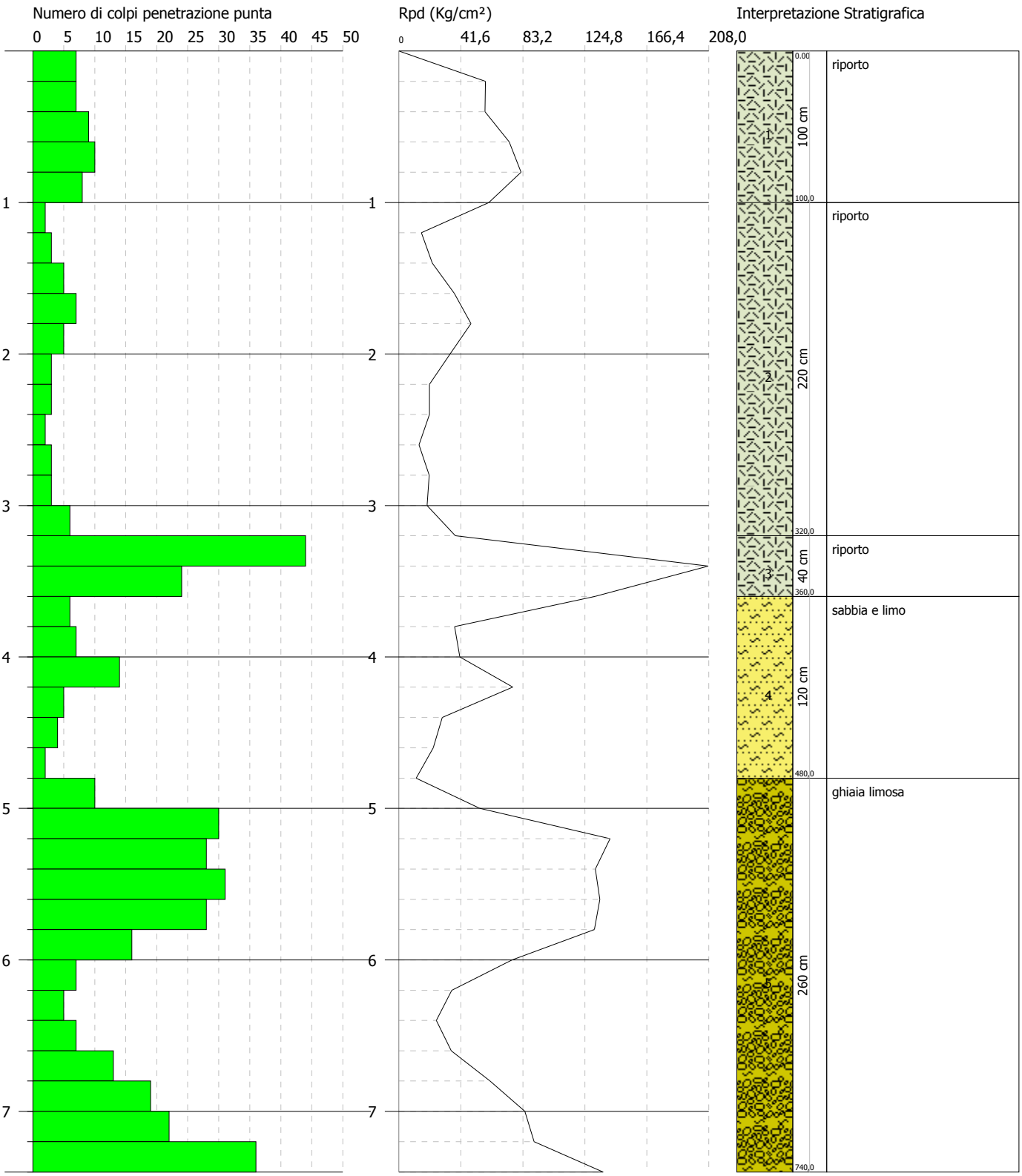
S.P.I.R.A.
Studio Professionale Indagini Restauro Ambiente
Via Murri. 44 - 40137 BOLOGNA

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH4
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente: Grande Sole srl Budrio
Cantiere: Area Ex Sapaba
Località: Casalecchio di Reno (BO)

Data: 13/07/2017

Scala 1:37



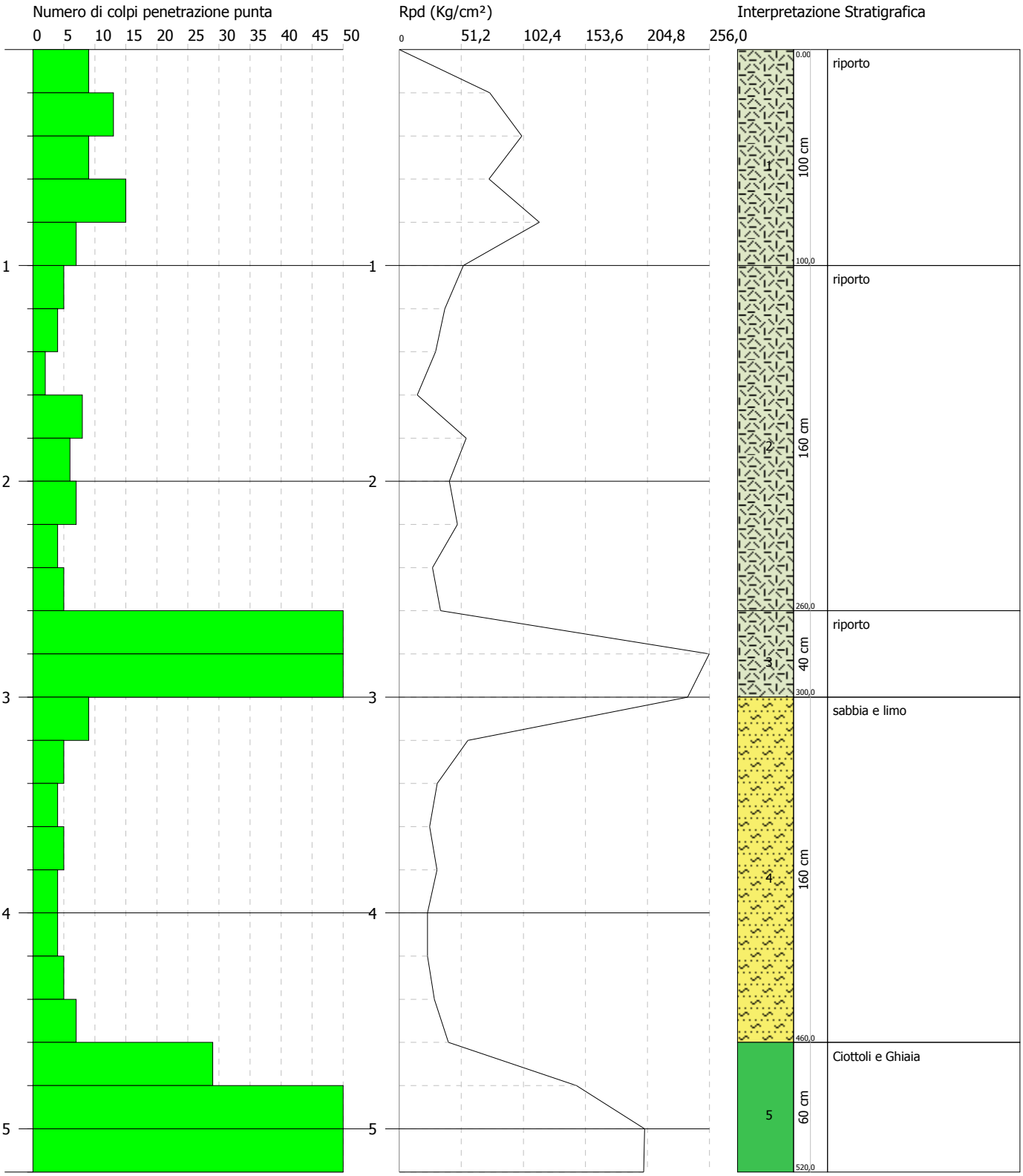
S.P.I.R.A.
Studio Professionale Indagini Restauro Ambiente
Via Murri. 44 - 40137 BOLOGNA

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DPSH5
Strumento utilizzato... DPSH (Dinamic Probing Super Heavy)

Committente: Grande Sole srl Budrio
Cantiere: Area Ex Sapaba
Località: Casalecchio di Reno (BO)

Data: 13/07/2017

Scala 1:26



**SINERGEA** srl LABORATORIO GEOTECNICO

Autorizzato ad effettuare e certificare prove sulle terre con decreto n° 10323 del 29/10/2012 (settore A Circ. 08/09/2010 n° 7618/STC)

40057 Granarolo dell'Emilia (BO) – Loc. Quarto Inf. – via Badini, 6/6 - Tel. +39-051768869 - Fax +39-0516058949



# CERTIFICATO n° : CSP_17/0298-01

**COMMESSA :** 17/110 **VERBALE DI ACCETTAZIONE n° :** 17/0298_CSP

**RICHIEDENTE :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**CONSEGNATARIO :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**COMMITTENTE :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**LOCALITA' :** CASALECCHIO DI RENO ( BO )

**CANTIERE :** VIA RONZANI - EX SAPABA

**DATA DI ACCETTAZIONE :** 04/07/17 **DATA DI EMISSIONE :** 07/07/17

**DESCRIZIONE CONTENITORE DEL CAMPIONE :** sacchetto PET

**Sondaggio :** S 1 **Campione :** C1 **Profondità :** 5.10 - 5.50 m

**DATA PRELIEVO :** -

**PRELIEVO EFFETTUATO :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**DATI FORNITI da :** Committenza

**OSSERVAZIONI :** -

**IL PRESENTE CERTIFICATO DI PROVA HA PER OGGETTO LE SEGUENTI PROVE e/o DETERMINAZIONI :**

| CODICE | DESCRIZIONE PROVA | n° prove | NORMATIVA DI RIFERIMENTO |
|---|---|---|---|
| GRT02a | Analisi granulometrica | 1 | ASTM D 422 |

DATA INIZIO PROVA: 05/07/2017

DATA TERMINE PROVA: 07/07/2017

È VIETATA LA RIPRODUZIONE PARZIALE DEL PRESENTE RAPPORTO DI PROVA SENZA L' AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA SINERGEA srl.

SINERGEA s.r.l. - AUTORIZZATO SETTORE "a" CIRC. 08/09/2010 n° 7618/STC - LABORATORIO GEOTECNICO

TIMBRO BLU SUL L' ORIGINALE

SPERIMENTATORE
Dott. Enrico BERTOCCHI

Il Direttore di Laboratorio
Dott. Geol. Dario GRUNDLER

**CERTIFICATO n°** **CSP_17/0298-01** DATA EMISSIONE: 07/07/2017



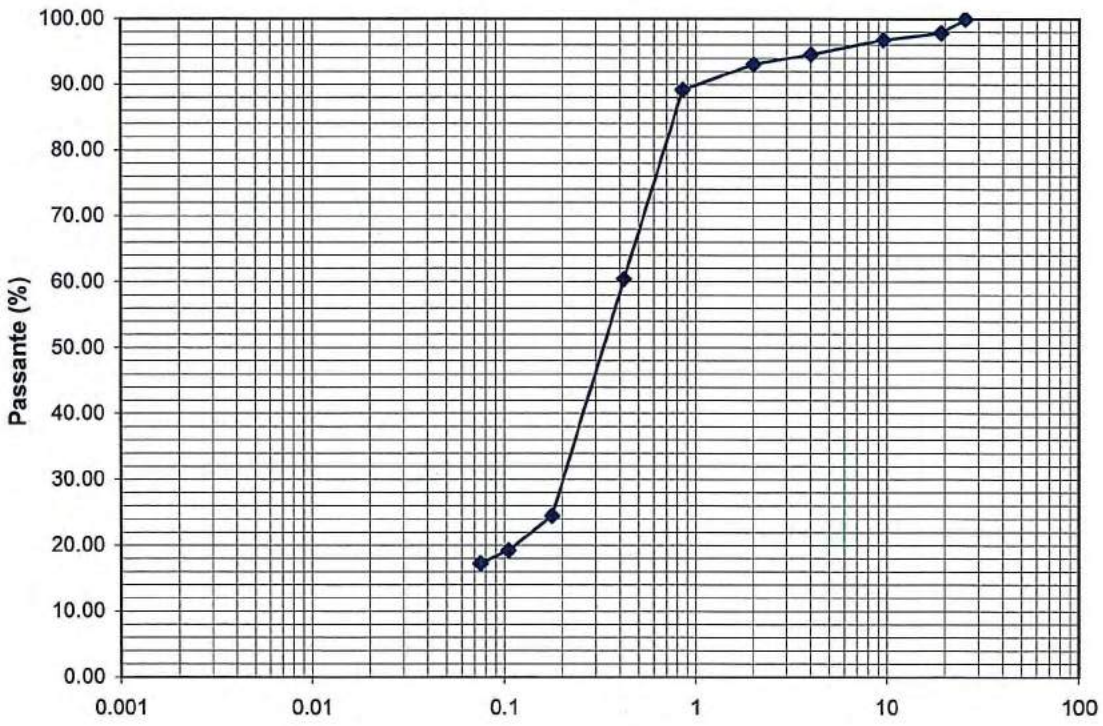
**ANALISI GRANULOMETRICA** - **ASTM D 422** -

**SONDAGGIO :** S 1 **CAMPIONE:** C1 **PROFONDITA':** 5.10 ÷ 5.50 m

| ANALISI PER VAGLIATURA | | | |
|---|---|---|---|
| massa provino - 369.22 g | | | |
| profondità provino - ÷ - m | | | |
| **VAGLI** | **APERTURA** mm | **PASSANTE** % in peso | **TRATTENUTO** % in peso |
| 1 1/2 " | 38.1 | - | - |
| 1 " | 25.4 | 100.00 | 0.00 |
| 3/4 " | 19.05 | 97.91 | 2.09 |
| 3/8 " | 9.525 | 96.86 | 1.05 |
| 5 | 4 | 94.61 | 2.25 |
| 10 | 2 | 93.10 | 1.51 |
| 20 | 0.85 | 89.21 | 3.89 |
| 30 | 0.59 | - | - |
| 40 | 0.42 | 60.48 | 28.73 |
| 50 | 0.297 | - | - |
| 80 | 0.177 | 24.53 | 35.95 |
| 100 | 0.149 | - | - |
| 140 | 0.105 | 19.28 | 5.25 |
| 200 | 0.075 | 17.28 | 1.99 |

| ANALISI PER SEDIMENTAZIONE | | |
|---|---|---|
| massa provino - g | | |
| profondità provino - ÷ - m | | |
| $G_s$ 2.750 - assunto | | |
| *Riferimento:* - | | |
| eseguita sul passante al vaglio 200 | | |
| aerometro ASTM 151H | | |
| **DIAMETRO EQUIVALENTE** D (mm) | **% IN PESO PIU' FINE DI D** | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |
| - | - | |

| ARGILLA | LIMO | | | SABBIA | | | GHIAIA | | | CIOTTOLI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fine | Medio | Gross. | Fine | Media | Gross. | Fine | Media | Gross | |




DIRETTORE DI LABORATORIO

SINERGEA s.r.l. - AUTORIZZATO SETTORE "a" CIRC. 08/09/2010 n° 7618/STC - LABORATORIO GEOTECNICO

Sperimentatore

È VIETATA LA RIPRODUZIONE PARZIALE DEL PRESENTE RAPPORTO DI PROVA SENZA L'AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA SINERGEA srl.

**SINERGEA** srl LABORATORIO GEOTECNICO

Autorizzato ad effettuare e certificare prove sulle terre con decreto n° 10323 del 29/10/2012 (settore A Circ. 08/09/2010 n° 7618/STC)

40057 Granarolo dell'Emilia (BO) – Loc. Quarto Inf. – via Badini, 6/6 - Tel. +39-051768869 - Fax +39-0516058949



# CERTIFICATO n° : CSP_17/0299-01

**COMMESSA :** 17/110 **VERBALE DI ACCETTAZIONE n° :** 17/0299_CSP

**RICHIEDENTE :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**CONSEGNATARIO :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**COMMITTENTE :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**LOCALITA' :** CASALECCHIO DI RENO ( BO )

**CANTIERE :** VIA RONZANI - EX SAPABA

**DATA DI ACCETTAZIONE :** 04/07/17 **DATA DI EMISSIONE :** 07/07/17

**DESCRIZIONE CONTENITORE DEL CAMPIONE :** sacchetto PET

**Sondaggio :** S 2 **Campione :** C1 **Profondità :** 3.20 - 3.40 m

**DATA PRELIEVO :** -

**PRELIEVO EFFETTUATO :** CAVAROCCHI Dott. Geol. Piero

**DATI FORNITI da :** Committenza

**OSSERVAZIONI :** -

**IL PRESENTE CERTIFICATO DI PROVA HA PER OGGETTO LE SEGUENTI PROVE e/o DETERMINAZIONI :**

| CODICE | DESCRIZIONE PROVA | n° prove | NORMATIVA DI RIFERIMENTO |
|---|---|---|---|
| GRT04 | Analisi granulometrica | 1 | ASTM D 422 |

DATA INIZIO PROVA: 05/07/2017

DATA TERMINE PROVA: 07/07/2017

È VIETATA LA RIPRODUZIONE PARZIALE DEL PRESENTE RAPPORTO DI PROVA SENZA L' AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA SINERGEA srl.

SINERGEA s.r.l. - AUTORIZZATO SETTORE "a" CIRC. 08/09/2010 n° 7618/STC - LABORATORIO GEOTECNICO

TIMBRO BLU SULL'ORIGINALE

SPERIMENTATORE
Dott. Enrico BERTOCCHI

Il Direttore di Laboratorio
Dott. Geol. Dario GRUNDLER

**CERTIFICATO n°** **CSP_17/0299-01** DATA EMISSIONE: 07/07/2017



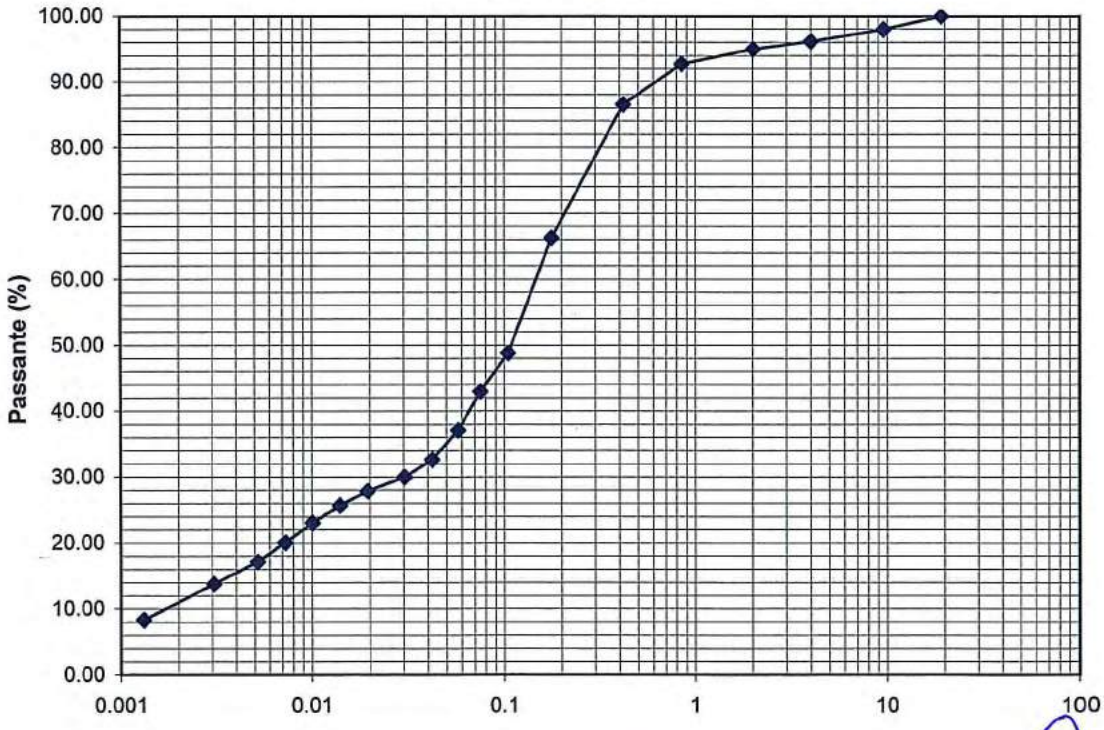
**ANALISI GRANULOMETRICA** - **ASTM D 422** -

**SONDAGGIO :** S 2 **CAMPIONE:** C1 **PROFONDITA':** 3.20 ÷ 3.40 m

| ANALISI PER VAGLIATURA | | | |
|---|---|---|---|
| massa provino - | 403.68 g | | |
| profondità provino | - ÷ - m | | |
| **VAGLI** | **APERTURA** mm | **PASSANTE** % in peso | **TRATTENUTO** % in peso |
| 1 1/2 " | 38.1 | - | - |
| 1 " | 25.4 | - | - |
| 3/4 " | 19.05 | 100.00 | 0.00 |
| 3/8 " | 9.525 | 97.99 | 2.01 |
| 5 | 4 | 96.18 | 1.81 |
| 10 | 2 | 94.98 | 1.20 |
| 20 | 0.85 | 92.79 | 2.20 |
| 30 | 0.59 | - | - |
| 40 | 0.42 | 86.61 | 6.18 |
| 50 | 0.297 | - | - |
| 80 | 0.177 | 66.31 | 20.30 |
| 100 | 0.149 | - | - |
| 140 | 0.105 | 48.84 | 17.47 |
| 200 | 0.075 | 43.04 | 5.80 |

| ANALISI PER SEDIMENTAZIONE | |
|---|---|
| massa provino | 46.73 g |
| profondità provino | - ÷ - m |
| $G_s$ | 2.750 - assunto |
| *Riferimento:* | - |
| eseguita sul passante al vaglio | 200 |
| aerometro ASTM | 151H |
| **DIAMETRO EQUIVALENTE** D (mm) | **% IN PESO PIU' FINE DI** D |
| 0.05754 | 37.16 |
| 0.04209 | 32.68 |
| 0.03033 | 30.07 |
| 0.01947 | 27.90 |
| 0.01397 | 25.73 |
| 0.01005 | 23.13 |
| 0.00724 | 20.09 |
| 0.00521 | 17.19 |
| 0.00306 | 13.86 |
| 0.00131 | 8.36 |

| ARGILLA | LIMO | | | SABBIA | | | GHIAIA | | | CIOTTOLI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Fine | Medio | Gross. | Fine | Media | Gross. | Fine | Media | Gross | |




DIRETTORE DI LABORATORIO

SINERGEA s.r.l. - LABORATORIO GEOTECNICO - AUTORIZZATO SETTORE "a" CIRC. 08/09/2010 n° 7618/STC

Sperimentatore

È VIETATA LA RIPRODUZIONE PARZIALE DEL PRESENTE RAPPORTO DI PROVA SENZA L' AUTORIZZAZIONE SCRITTA DELLA SINERGEA srl.

**PROVINCIA DI BOLOGNA**

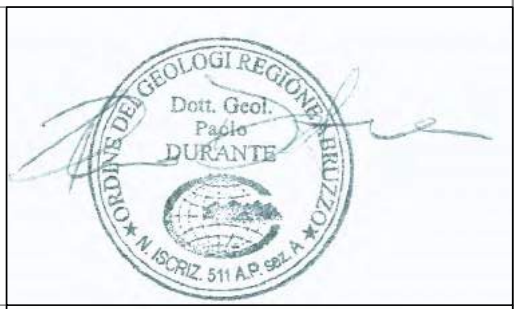
# COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO
# via Camillo Ronzani

**COMMITTENTE:**
Dott. Geol. Piero Cavarocchi
via Murri, 44
40137 - Bologna

**PROGETTO:**
Indagine sismica
Rifrazione in onde P, HVSR e MASW

# RELAZIONE GEOFISICA


dott. geol. Paolo Durante
Ordine dei Geologi della Regione
Abruzzo n.511




dott. geol. Giulio Dal Forno
Ordine dei Geologi della Regione
Emilia Romagna n.1294

envìa

**Envia Studio Associato di Geologia e Geofisica**
di Durante, Dal Forno e Rispoli
via G.P. da Palestrina 1/4 - 40141 Bologna
www.envia.it


| Data:17/07/2017 | Rif. Commessa: C078-2017 | Ed.: Finale |
|---|---|---|

TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI - Questo documento è di proprietà esclusiva di ENVIA Studio Associato, non può essere copiato, riprodotto o divulgato ad altri senza autorizzazione

## INDICE

**1. Premessa ..... 2**

**2. Indagine sismica a rifrazione ..... 2**

2.1. Principi e considerazioni generali ..... 2

2.2. Caratteristiche delle attrezzature impiegate ..... 4

2.3. Descrizione delle fasi di acquisizione ..... 4

2.4. Analisi dei dati e risultati dell'indagine ..... 5

**Indagine sismica integrata MASW+HVSR ..... 6**

2.5. Normativa di riferimento ..... 6

2.6. Il metodo MASW ..... 7

2.7. Il metodo HVSR ..... 9

2.8. Risultati dell'indagine sismica integrata ..... 9

**3. Bibliografia ..... 12**

3.1. Riferimenti normativi ..... 12

3.2. Riferimenti bibliografici ..... 12

## ELENCO ALLEGATI

Allegato 1 – Documentazione fotografica

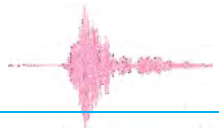
Allegato 2 – Sismogrammi indagine sismica a rifrazione in onde P

Allegato 3 – Sismogrammi indagine MASW

Allegato 4 – Spettro di dispersione e curva H/V

Allegato 5 – Velocità onde S in funzione della profondità

Tavola 1 – Sezione Tomografica in onde P





## 1. Premessa

Su richiesta del Dott. Geol. Piero Cavarocchi, sono state realizzate due sezioni di sismica a rifrazione in onde P e una prova sismica integrata *MASW+HVSR* in un'area verde sita in via Camillo Ronzani nel Comune di Casalecchio di Reno (BO), a supporto di una relazione geologica.

## 2. Indagine sismica a rifrazione

### *2.1. Principi e considerazioni generali*

I metodi di prospezione sismica a rifrazione sono i più utilizzati per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni. Il parametro geofisico che si deriva è comunemente la velocità delle onde sismiche, da cui si possono estrapolare una serie di parametri geotecnici importanti. Oltre alle classiche applicazioni ingegneristiche negli studi sulle fondazioni, la sismica a rifrazione viene utilizzata frequentemente in studi idrogeologici per determinare lo spessore dell'acquifero d'interesse, in studi geologici per derivare la profondità del basamento, la stratigrafia, la presenza di faglie e si è dimostrata molto utile anche come tecnica di indagine in zone di frana (Charles e Owen, 2002). In campo ambientale è regolarmente impiegata per la valutazione qualitativa di siti candidati alla realizzazione di impianti di discarica (Reynolds, 1997).

La tecnica di base, comune a tutte le metodologie di sismica attiva, consiste nel generare artificialmente delle onde sismiche e nel misurare il tempo impiegato da tali onde per percorrere lo spazio compreso tra il punto di energizzazione, o *sorgente*, e una serie di ricevitori, *geofoni*, allineati lungo la zona da indagare. Le onde d'interesse per il metodo a rifrazione sono le onde di volume (P o SH a seconda dell'utilizzo di geofoni verticali o geofoni orizzontali), rifratte criticamente alle interfacce mostranti differenti proprietà fisiche.

Dal punto di vista operativo, l'indagine sul terreno viene realizzata con un gruppo di geofoni distribuiti lungo un profilo a distanza ravvicinata (generalmente qualche metro) e collegati a un sismografo attraverso un cavo multipolare. Quando il terreno su cui si trovano i geofoni viene sollecitato, questi trasmettono un segnale analogico in forma di impulso elettrico al sismografo, il quale gestisce contemporaneamente più geofoni su canali di ascolto differenti, converte gli impulsi elettrici per tutti i geofoni in formato digitale, li amplifica, li filtra e li immagazzina in un disco rigido o in una memoria allo stato solido.

La sorgente impiegata può essere di tipo impattante (mazza battente, massa in caduta), impulsivo (cannoncino sismico) o vibrazionale (autocarri Vibroseis, vibratori *Mini-Sosie*). La scelta della sorgente deve essere un adeguato compromesso tra la risoluzione e la profondità d'indagine richieste. Infatti, sorgenti a bassa frequenza, hanno un maggior potenziale di penetrazione, ma

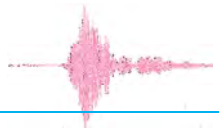
forniscono una risoluzione più scadente. Operativamente, per garantire una buona copertura lungo tutto il tratto relativo alla linea sismica, vengono generalmente realizzate due energizzazioni agli estremi dell'allineamento di geofoni, due all'esterno e da una a tre all'interno della linea stessa.

I dati raccolti durante un esperimento di sismica a rifrazione sono i sismogrammi registrati sui canali disponibili nel sismografo utilizzato, ciascuno riferito a un particolare geofono della linea sismica. Su questi sismogrammi è necessario scegliere il tempo in cui le onde prodotte nei vari punti di energizzazione raggiungono i sensori. Tali tempi, indicati come *primi arrivi* o *tempi di tragitto*, si riferiscono a onde che si propagano direttamente dalla sorgente ai ricevitori per i geofoni vicini alla sorgente stessa e invece, a partire da una certa distanza (distanza di *cross-over*), sono relativi alle onde rifratte criticamente alle discontinuità di impedenza acustica (dove per impedenza acustica si intende il prodotto tra velocità sismica all'interno di un mezzo e la sua densità). I primi arrivi presi per tutti i ricevitori vengono diagrammati in funzione della distanza dalla sorgente per tutte le sorgenti, ottenendo così un unico grafico che riporta tutte le curve dei tempi di tragitto o dromocrone. Tale grafico è molto utile per l'identificazione dei principali rifrattori individuati dall'indagine, dato che per ciascuna sorgente i cambi di pendenza nella curva dei tempi di tragitto indicano uno specifico rifrattore; inoltre gli arrivi dallo stesso rifrattore, per sorgenti differenti, mostrano un buon grado di parallelismo (Reynolds, 1997).

Esistono diversi metodi di interpretazione dei tempi di tragitto. I più utilizzati sono il metodo del "*plus-minus*" (Hagedoorn, 1959) e il "*generalized reciprocal method* (*GRM*)" (Palmer, 1980). Entrambi utilizzano i tempi di arrivo per gli stessi geofoni da scoppi in direzione sia diretta che inversa, assumono un modello stratificato e rifrattori lateralmente continui. Pertanto sono in genere utilizzati per situazioni stratigrafiche semplici, con rifrattori inclinati a basso angolo. Per situazioni molto complesse, ad esempio presenza di discontinuità, eterogeneità laterali e forti gradienti, tali metodi spesso producono interpretazioni meno rigorose.

Per le situazioni più complicate, il metodo di elaborazione più attendibile è rappresentato dalla tomografia sismica. Nel caso della tomografia sismica, come in ogni inversione geofisica, si cerca di trovare un modello che riproduca i dati sperimentali disponibili. Tale modello è una rappresentazione idealizzata di una sezione del sottosuolo e presenta una serie di parametri che sono le grandezze fisiche da stimare a partire dai dati raccolti in fase di misura. La risposta del modello è rappresentata dai dati sintetici che possono essere calcolati dalle relazioni matematiche che definiscono il modello stesso per un dato insieme di parametri. Nel caso della tomografia sismica, i parametri del modello sono rappresentati dalle velocità delle celle in cui viene suddivisa la porzione di sottosuolo da indagare.

Un primo modello viene utilizzato per riprodurre le curve di tragitto sperimentali. Questi valori sintetici vengono confrontati con quelli reali e la loro discrepanza viene espressa come radice della





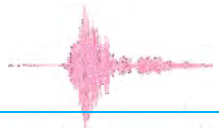
media dell'errore quadratico, dove per errore si intende la differenza tra il valore misurato e quello sintetico. Attraverso una procedura di ottimizzazione (minimi quadrati, minimi quadrati pesati, ecc.), la velocità all'interno delle singole celle viene variata così da ottenere un nuovo modello; ad ogni variazione vengono determinati i valori sintetici e confrontati con i reali finché non si arriva ad una convergenza statisticamente accettabile tra il dato reale e quello sintetico. Naturalmente il modello finale, cioè quello che ottiene la prestazione migliore dal punto di vista statistico, rappresenta soltanto una possibile immagine della realtà. Come tutti i metodi geofisici, infatti, la tomografia sismica è soggetta alla non-unicità della soluzione e deve essere quindi integrata, per una corretta interpretazione, da altre metodologie geofisiche o da metodi diretti di indagine.

### *2.2. Caratteristiche delle attrezzature impiegate*

Le indagini di sismica a rifrazione in onde P sono state realizzate con sismografo "*Echo 24/2002*" a 24 canali prodotto da *Ambrogeo* (Piacenza) connesso a 24 geofoni verticali con frequenza propria pari a 14 Hz. I dati sono stati acquisiti e salvati da un PC portatile alimentato a batteria. La sorgente sismica utilizzata per l'energizzazione nell'acquisizione del profilo di sismica a rifrazione in onde P è stata una mazza battente di 8-10 kg con piastra in ferro.
Sismografo, geofoni e sistemi per energizzazione rispondono ai requisiti riportati nelle ASTM D 5777-95.

### *2.3. Descrizione delle fasi di acquisizione*

Le indagini di sismica a rifrazione in onde P sono state ubicata su indicazioni della Committenza nella figura del Dott. Geol. Piero Cavarocchi. Le due indagini (L1-L2) sono state poste in allineamento con sovrapposizione tra il geofono 24 della linea L1 e il geofono 1 della linea L2, in modo da garantire la continuità tra i due stendimenti. La lunghezza di ciascun profilo sismico è pari a 80.5 m con distanza intergeofonica di 3,5 m. Sono state realizzate otto energizzazioni per ogni profilo sismico, cinque interne allo stendimento e tre esterne. Questa configurazione ha permesso di realizzare una sezione tomografica avente lunghezza complessiva pari alla somma dei profili L1 e L2, 161 m, ed ha permesso di raggiungere una profondità massima di 19 m da p.c..
Una documentazione fotografica in allegato alla presente è riportata in Allegato 1.
In Allegato 2 sono rappresentati i sismogrammi acquisiti per il profilo sismico realizzato con indicati i punti scelti nell'operazione di *picking*.





### *2.4. Analisi dei dati e risultati dell'indagine*

L'elaborazione delle curve dei tempi di tragitto è stata realizzata secondo il metodo della tomografia attraverso il programma ***SeisImager/2D*** (Geometrics, 2006); questo utilizza il metodo di propagazione dei fronti d'onda per la fase di sintesi dei tempi di tragitto e un approccio ai minimi quadrati non lineari per la fase di inversione.

I risultati dell'indagine di sismica a rifrazione realizzata sono presentati in Tavola 1. Questa contiene una sezione tomografica della velocità delle onde P a isolinee/campiture di colore. Alla base della sezione è indicata la quota relativa e la progressiva (in m) lungo il profilo di ognuno dei 24 geofoni. Questi sono rappresentati direttamente sulla sezione tomografica e numerati da 1 a 24. È riportata la posizione indicativa della prova HVSR e della prova MASW, la prima realizzata lateralmente alla sezione ad una distanza di 4-5 metri e la seconda realizzata sulla stessa linea del profilo di sismica a rifrazione L1.

Per l'interpretazione si è proceduto al riconoscimento sulla sezione tomografica di zone con variazione graduale di velocità separate da fasce sottili con forte gradiente (infittimento delle isolinee), attribuibili a transizioni fisiche e/o litologiche nel mezzo indagato. Ciascuna zona presenta dei caratteri geometrici correlabili all'assetto stratigrafico dell'area in esame ed è indicata con il termine di unità sismo-stratigrafica (US). Sulla sezione i limiti interpretati tra unità sismo-stratigrafiche sono indicati con un tratteggio in bianco e la loro profondità in metri dalla superficie è sovraimposta al tratteggio a passo regolare.

Sono state individuate tre unità sismo-stratigrafiche, che sulla base dei dati relativi ad indagini geognostiche dirette forniti dalla committenza, sono ascrivibili a:

- unità US-A, terreno di riporto e terreno granulare insaturo;
- unità US-B, terreno granulare saturo;
- unità US-C, substrato.

L'unità US-B presenta dei valori medi di spessore compresi tra 6-7 m, tuttavia si evidenzia la presenza di un inspessimento tra i geofoni 18 e 26, non direttamente attribuibile ad un inspessimento del terreno granulare saturo, data la compresenza di opere drenanti sotterranee di origine antropica lungo le medesime progressive. Inoltre è presente tra i geofoni 26 e 40 una diminuzione dello spessore della medesima unità.

**Indagine sismica integrata MASW+HVSR**

### *2.5. Normativa di riferimento*

Il D.M. 14 gennaio 2008 prevede che, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si renda necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi (art. 7.11.3). In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può far riferimento a un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (cfr. Tabelle 1-2). Ai fini dell'identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente *Vs30* di propagazione delle onde di taglio S entro i primi 30 metri di profondità. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per i muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione. La stima della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata. Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, il sito può essere classificato sulla base dei valori di $N_{SPT}$ o della $C_u$. Le tabelle sotto riportate, oltre a una breve descrizione delle classi di sottosuolo, indicano gli intervalli dei tre parametri che individuano ciascuna di esse.

| | ***Descrizione del profilo stratigrafico*** | ***Parametri*** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $Vs30$ (m/s) | $N_{SPT,30}$(colpi /30 cm) | $C_{u,30}$ (kPa) |
| **A** | *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi*, caratterizzati da valori di *Vs30* superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m. | > 800 | - | - |
| **B** | *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di *Vs30* compresi tra 360 e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30}$>50 nei terreni a grana grossa e $cu_{,30}$>250 kPa nei terreni a grana fina) | 360-800 | > 50 | > 250 |
| **C** | *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di *Vs30* compresi tra 180 e 360 m/s (ovvero 15<$N_{SPT,30}$<50 nei terreni a grana grossa e 70<$cu_{,30}$<250 kPa nei terreni a grana fina) | 180–360 | 15-50 | 70–250 |
| **D** | *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà | < 180 | < 15 | < 70 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | meccaniche con la profondità e da valori di *Vs30* inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30}$<15 nei terreni a grana grossa e $cu_{,30}$<70 kPa nei terreni a grana fina) | | | |
| **E** | *Terreni dei sottosuoli tipo C o D per spessore non superiore a 20 m*, posti sul substrato di riferimento (con Vs> 800m/s) | | | |

***Tabella 1** – Classificazione dei suoli secondo il D.M. 14 gennaio 2008 (Tabella 3.2.II).*

| | ***Descrizione del profilo stratigrafico*** | ***Parametri*** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | *Vs30* (m/s) | $N_{SPT,30}$(colpi /30 cm) | $C_{u,30}$ (kPa) |
| **S 1** | Depositi di terreni caratterizzati da valori di Vs30 inferiori a 100 m/s (ovvero 10< $cu_{,30}$<20 kPa) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche. | < 100 | - | 10-20 |
| **S 2** | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o di qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti. | | | |

***Tabella 2** – Categorie aggiuntive di sottosuolo(Tabella 3.2.III- D.M. 14 gennaio 2008).*

Il valore del parametro *Vs30*, secondo la normativa, è calcolato mediante la seguente espressione:

$$Vs30 = \frac{30}{\sum_{i=1}^{n} h_i / v_i} \text{ m/s} \qquad (1)$$

Dove hi e vi indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo per un totale di n strati presenti nei 30 metri al di sotto del piano fondale. Tale velocità equivalente è ottenuta imponendo l'equivalenza tra i tempi di arrivo delle onde di taglio in un terreno omogeneo equivalente, di spessore pari a 30 m, e nel terreno stratificato in esame, di spessore complessivo ancora pari a 30 m. Essa assume quindi valori differenti da quelli ottenuti dalla media delle velocità dei singoli strati pesata sui relativi spessori, soprattutto in presenza di strati molto deformabili di limitato spessore. Lo scopo della definizione è quello di privilegiare il contributo degli strati più deformabili (C3.2.2 Circ. Min. 617 del 2 febbraio 2009).

### *2.6.* Il metodo MASW

Per mezzo della tecnica *MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves)*, Park et al., (1999), e quindi dello studio delle onde superficiali che comunemente dominano una porzione considerevole dei sismogrammi nelle indagini sismiche (sia per ampiezza relativa che per durata del segnale), è possibile ottenere delle stime del profilo di velocità delle onde S.

Le onde superficiali sono onde sismiche che si propagano parallelamente alla superficie del terreno, la cui ampiezza diminuisce esponenzialmente con la profondità e la cui energia si propaga in una fascia superficiale corrispondente a circa una lunghezza d'onda $\lambda$. In un mezzo reale, caratterizzato da proprietà meccaniche variabili con la profondità, le onde superficiali, in funzione di $\lambda$, penetrano strati con diverse caratteristiche e quindi la loro propagazione ne risulta influenzata in termini di velocità e tempi di arrivo: onde con $\lambda$ differente si propagano a velocità di fase *cf* differente e pertanto si separano lungo il loro tragitto. Tale fenomeno è noto come dispersione.

L'idea su cui si fonda il metodo *MASW*, come altre metodologie che analizzano le onde superficiali, è quella di utilizzare il fenomeno della dispersione per derivare informazioni indirette sulle proprietà fisiche e reologiche del terreno, tra cui la densità, i parametri elastici e le velocità delle onde di taglio. A partire dall'intero campo d'onda, acquisito in campagna utilizzando un numero variabile di geofoni (di solito 12-24) allineati a spaziatura regolare (similmente a un classico esperimento di sismica a rifrazione), l'obbiettivo del metodo è di derivare una curva di dispersione sperimentale velocità di fase – frequenza (*cf -f*), la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare. Tale curva si può ottenere seguendo differenti metodologie di elaborazione del campo d'onda (trasformata tempo di ritardo-*slowness*$\tau$-*p*, trasformata *f-k*). Il risultato è una nuova rappresentazione del campo d'onda dal dominio spazio-tempo a quello frequenza-*slowness* o frequenza-velocità di fase (la *slowness* è infatti il reciproco della velocità). Dato che le onde superficiali mostrano le ampiezze e le durate maggiori nel dominio spazio-tempo, anche nel dominio frequenza-velocità di fase, i massimi dello spettro saranno relativi alle differenti frequenze con cui si propagano le onde superficiali stesse. Dall'estrazione delle coppie frequenza-velocità di fase corrispondenti ai massimi d'intensità dello spettro si deriva la curva di dispersione sperimentale. In realtà, l'interpretazione degli spettri risulta spesso complicata dall'intrecciarsi dei modi superiori rispetto a quello fondamentale e/o alla generazione e propagazione di onde guidate. Un miglioramento nell'interpretazione degli spettri può essere ottenuto dalla comparazione tra spettro osservato e, in sovrapposizione, le curve di dispersione teoriche per i diversi modi di un modello ritenuto plausibile per l'area in esame (Dal Moro, 2008). Generalmente quando la rigidezza degli strati aumenta gradualmente con la profondità il modo fondamentale risulta predominante a tutte le frequenze. Tuttavia esistono diverse stratigrafie, con strati rigidi compresi tra strati soffici o strati soffici compresi tra strati rigidi o con variazioni brusche di rigidezza con la profondità, in cui i modi superiori al primo diventano predominanti in certi intervalli di frequenza (Roma, 2006). Per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio è poi necessario procedere alla fase d'inversione della curva di dispersione per ottenere un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo.

### *2.7.* Il metodo *HVSR*

Il metodo *HVSR* (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) proposto da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente modificato da Nakamura (1989), si basa sull'analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (*H*) e verticale (*V*) del rumore sismico registrato in un sito. Il rumore sismico è presente ovunque ed è generato sia da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) che dall'attività antropica. Il rumore sismico è indicato spesso come microtremore poiché è caratterizzato da oscillazioni molto deboli (dell'ordine dei *μm/s*). I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma soprattutto da onde superficiali, la cui velocità è comunque prossima a quella delle onde S (Mulargia et al., 2007). Esiste un consenso generale sull'efficacia del metodo *HVSR* di fornire stime sulla frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo, almeno nel caso di un modello semplice unidimensionale con strato soffice al di sopra di uno strato rigido (Lachet and Bard, 1994; Lermo and Chavez-Garcia, 1994; Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999). In questo caso semplice, tale frequenza $f_0$ è legata allo spessore *h* dello strato soffice attraverso la seguente relazione:

$$f_0 = \frac{Vs}{4h} \text{ Hz} \qquad (2)$$

Naturalmente, la complessità stratigrafica del sottosuolo produce curve *H/V* sperimentali con svariati picchi, per le quali non è possibile applicare un modello semplice. Tuttavia, attraverso il confronto delle curve sperimentali con curve *H/V* sintetiche, è possibile derivare profili di velocità delle onde di taglio *S* nel sottosuolo, in presenza di adeguati vincoli, ottenuti da prove geognostiche dirette o da altre indagini geofisiche (Fäh et al., 2001; Castellaro and Mulargia, 2009).

La tecnica di misura del rumore sismico richiede tempi di registrazione pari a 15-20 minuti e necessita di sensori tridirezionali da sismologia con messa in bolla, digitalizzatore 24 bit con elevata dinamica, elevato guadagno ed elevata frequenza di campionamento nativo, con minimizzazione del rumore elettro/meccanico.

### 2.8. Risultati dell'indagine sismica integrata

Le indagini *MASW* sono state realizzate con *sismografo "Echo 24/2002" a 24 canali* prodotto da *Ambrogeo* (Piacenza) connesso a 12 geofoni verticali con frequenza propria pari a 4,5 Hz, interspaziati tra loro di 4 m per un totale di 44 m (allegato 1). I dati sono stati acquisiti e salvati da

un PC portatile alimentato a batteria. La sorgente sismica utilizzata è una mazza battente di 8 kg, posta ad una distanza di 5 m dal geofono 1.

Le misure di rumore sismico sono state effettuate a una distanza ridotta dal profilo *MASW* per un tempo di registrazione pari a 20 minuti. La strumentazione utilizzata è un *tromografo digitale "TrominoEngy"* della *Micromed* S.p.A.

In allegato 3 sono riportati i sismogrammi registrati da ognuno dei geofoni durante l'indagine *MASW*.

Lo spettro frequenza-velocità di fase, ottenuto attraverso il software *Geopsy* (Progetto *SESAME*), è riportato in allegato 4 assieme alla curva *H/V* e al grafico delle componenti dei canali velocimetrici relativi alla misura di rumore sismico; per l'elaborazione sono state considerate le componenti (N-S, E-W e Up-Down). Allo spettro frequenza-velocità di fase sono sovrimposti il *picking* del modo fondamentale (crocette nere) e le curve di dispersione sintetiche del modo fondamentale e di alcuni modi superiori (pallini bianchi) per il modello statisticamente migliore ottenuto dall'inversione. Questo modello è il risultato dell'inversione della curva di dispersione sperimentale ottenuta dall'indagine *MASW* ed eseguita attraverso due software differenti, *WaveEq (Geometrics)* e *SWAMI (Georgia Institute of Technology).* La minima frequenza scelta nell'operazione di picking è pari a circa 7,5 Hz e presenta una velocità di fase di 434,8 m/s, valori corrispondenti indicativamente ad una profondità compresa tra 19 e 29 m. Oltre tali profondità il profilo delle velocità viene inoltre stimato attraverso fit della curva H/V ottenuta dall'acquisizione del rumore sismico.

La curva H/V **presenta il suo massimo a circa 5,4 Hz**.

In allegato 5 sono riportati il grafico dell'andamento della velocità delle onde S in funzione della profondità, la tabella con i valori numerici e il grafico della variazione del parametro *Vs30* in funzione della profondità del piano di fondazione della struttura in progetto.

Dal modello di velocità derivato con la tecnica *MASW* è stato stimato il parametro *Vs30* rispetto all'attuale piano campagna, pari a **352,6 m/s**.

Ai sensi dell'art. 3.2.2 del D.M. 14/01/2008, unicamente sulla base del parametro Vs30 relativo all'attuale piano campagna, il sottosuolo ricade in **categoria C**. Tuttavia il geologo incaricato sulla base della conoscenza stratigrafica dell'area, derivata dalla sua esperienza professionale e dalle indagini geognostiche condotte nel sito in oggetto, nonché considerando le caratteristiche dell'opera in progetto e la tipologia di fondazioni, è tenuto a validare l'attribuzione alla suddetta categoria e valutare se approfondire l'indagine per la definizione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica mediante studi specifici sulla risposta sismica locale, come indicato all'art. 7.11.3 del D.M. 14/01/2008.

Bologna, 17 luglio 2017

Dott. Geol. Giulio Dal Forno

Dott. Geol. Paolo Durante

## 3. Bibliografia

### *3.1. Riferimenti normativi*

**ASTM D5777-95** "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation", ASTM International, West Conshohocken, PA.

**NTC08 - D.M. 14 gennaio 2008** "*Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*", Supplemento ordinario alla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008.

**Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 2 febbraio 2009, n. 617 C.S.LL.PP.** (Suppl.Ord. alla G.U. 26.2.2009, n. 47) – *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.*

### *3.2. Riferimenti bibliografici*

**Castellaro S. and Mulargia F., (2009).** The effect of velocity inversions on H/V, *Pure Appl. Geophys.* 166, Issue 4, pp.567-592.

**Charles, F. N. e Owen, W. P., (2002)**- Seismic refraction analysis of landslides, *Proceedings of the Geophysics 2002 conference, April 15-19, 2002, Los Angeles, California.*

**Dal Moro, G., (2008)** – *Tre divagazioni: il mito dell'inversione, MASW in Friuli, esempio di studio congiunto MASW-rifrazione* - Giornata di studio sul "Monitoraggio dinamico per la valutazione della sicurezza sismica dei ponti", Centro Internazione di Scienze Meccaniche (CISM), Udine, 18 aprile 2008.

**Fäh D., Kind F. and Giardini D., (2001).** A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.* ***145****, 535-549.*

**Geometrics Inc., (2006).** *SeisImager Manual Version 3.2.*

Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, *Sesame European Research Project, December 2004.*

**Ibs-von Seht M. and Wohlenberg J., (1999).** Microtremor measurements used to map thikness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. Am.* ***89****, 250-259.*

**Hagedoorn, J. G., (1959).** *The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections*, *Geophys. Prosp., 07, no. 02, 158-182.*

**Lachet C. and Bard P. Y., (1994).** Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitation of Nakamuras thecnique, *J. Phys. Earth* ***42****, 377-397.*

**Lermo J. and Chavez-Garcia F. J., (1994).** Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seismol. Soc. Am.* ***84****, 1350-1364.***Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., (2007).** Effetti di

sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica. *Il Geologo dell'Emilia Romagna Anno VII-2007 N.**25** - Nuova serie*.

**Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., (2007).** Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica. *Il Geologo dell'Emilia Romagna Anno VII-2007 N.**25** - Nuova serie*

**Nakamura Y., (1989).** A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTI, **30**, 25-33.*

**Nogoshi M. e Igarashi T., (1970).** On the propagation characteristics of microtremors, *J. Seism. Soc. Japa, **23**, 264-280.*

**Palmer, D., (1980)**- The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, *Society of Exploration Geophysicists.*

**Park, C.B., Miller, R.D., and Xia J.**, **(1999)**- *Multichannel Analysis of surface waves* - Geophysiscs, **64**, 800-808.

**Reynolds, J. M., (1997)-** *An introduction to Applied and Environmental Geophysics,* John Wiley & Sons Ltd., England.

**Roma, V., (2006)** – *Caratterizzazione sismica dei suoli con Il metodo MASW (Multichannel Analysis of surfacewaves)*- http://www.masw.it/downloads/Opuscolo_MASW_22_Gen_2007.pdf. microtremor on the round surface, *QR of RTI, **30**, 25-33.*

**Shearer P.M., (1999)**. Introduction to Seismology, *Cambridge University*.

# Allegato 1 – Documentazione fotografica

**Foto 1 – Ubicazione profilo sismico per indagine MASW.**

**Foto 2 – Ubicazione misura *HVSR***

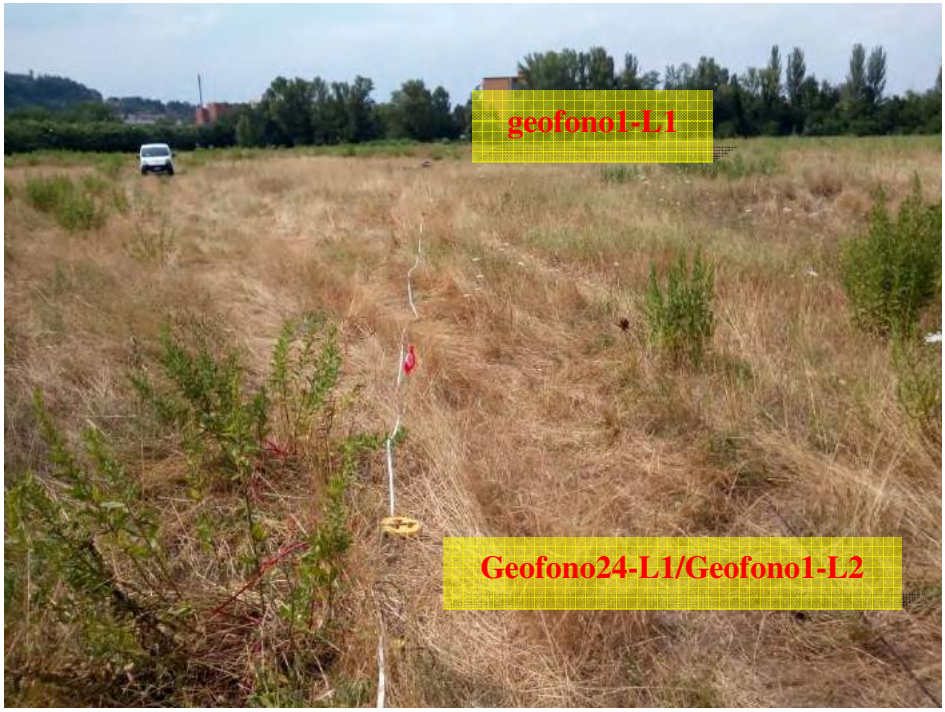



**Foto 3 – Ubicazione dello stendimento L1, indagine di sismica a rifrazione.**

**Foto 4 – Ubicazione dello stendimento L2, indagine di sismica a rifrazione.**

# Allegato 2 – Sismogrammi indagine sismica a rifrazione in onde P

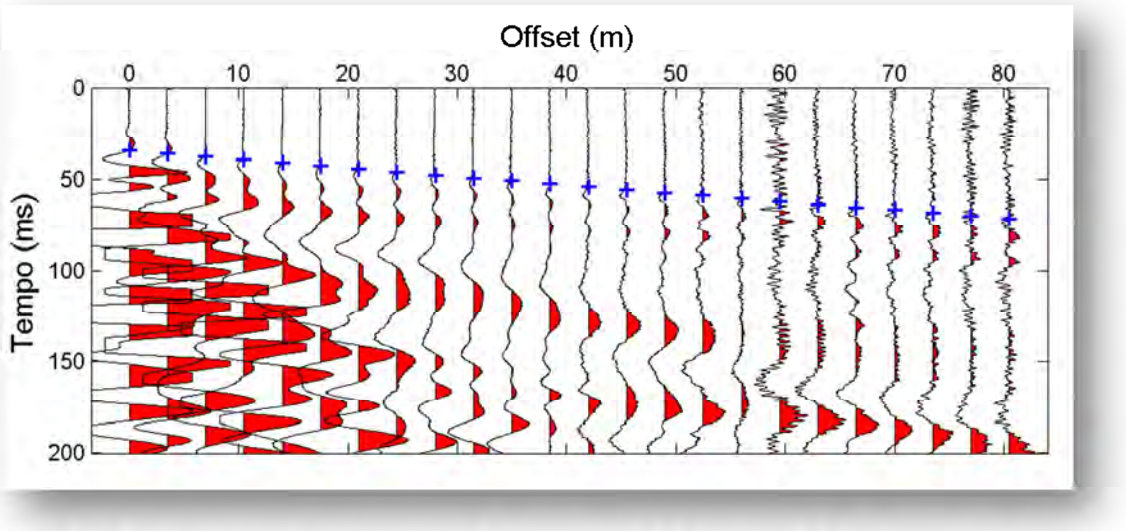



**Fig. 1 – Energizzazione a - 20 m dal geofono L1-1 (scoppio 1, stendimento L1)**

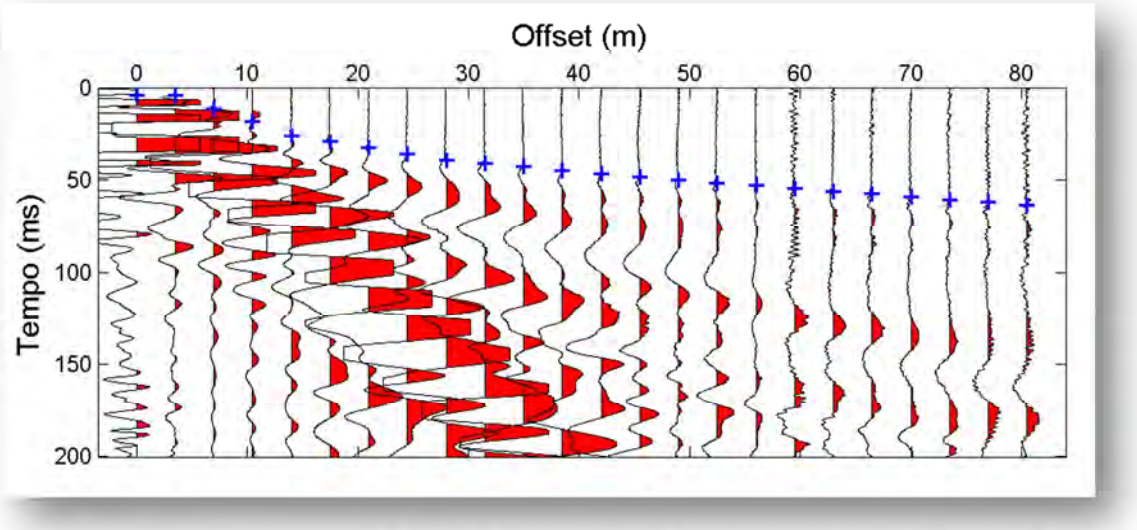



**Fig. 2 – Energizzazione a 1.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 2, stendimento L1)**

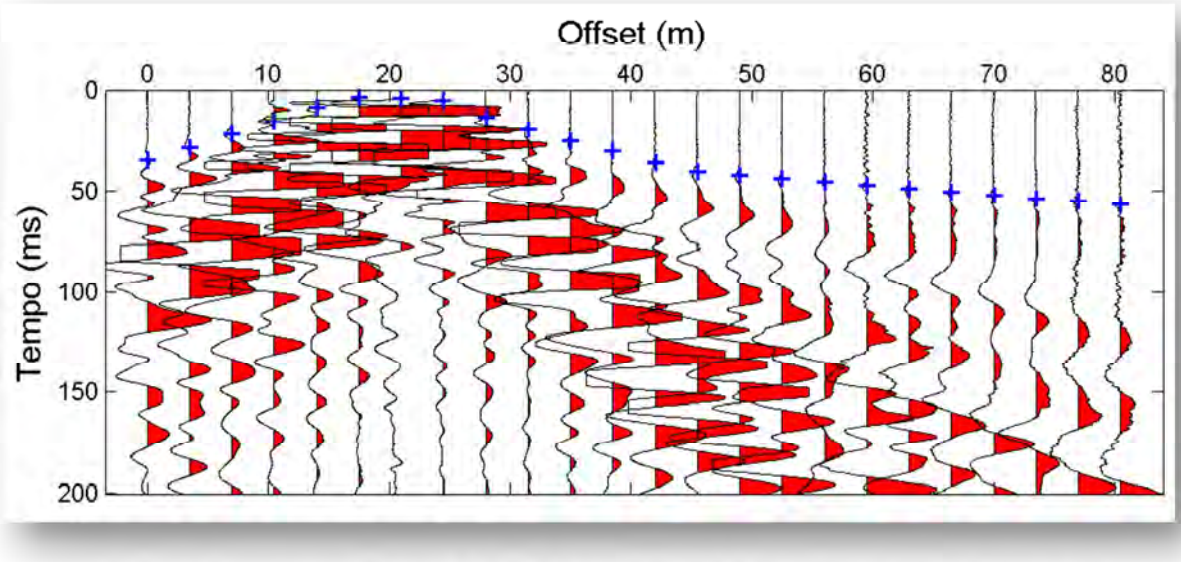



**Fig. 3 – Energizzazione a 19.25 m dal geofono L1-1 (scoppio 3, stendimento L1)**

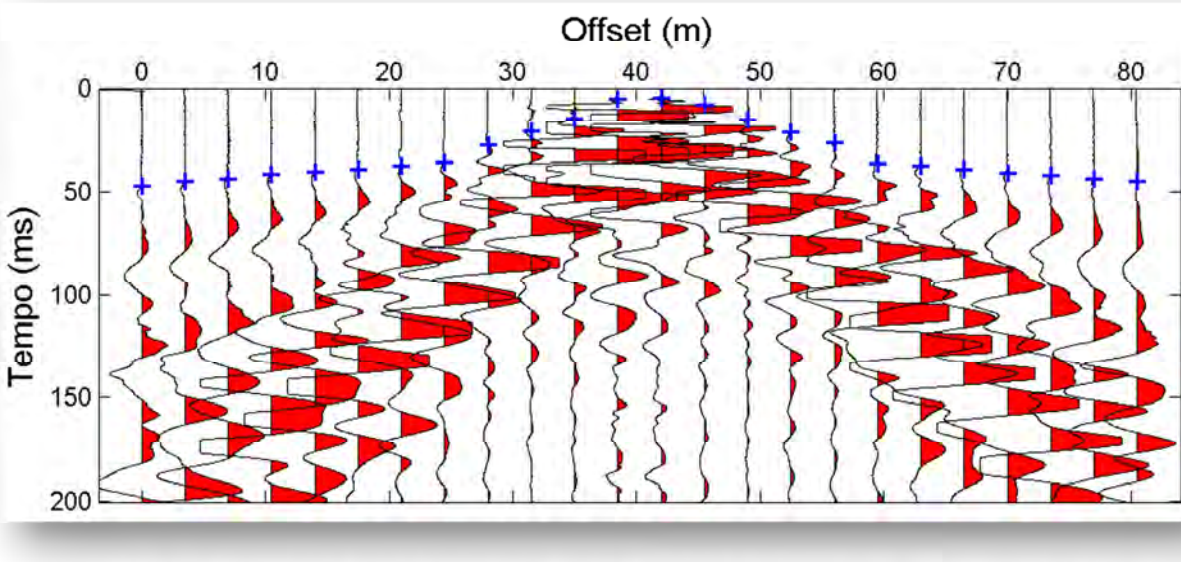



**Fig. 4 – Energizzazione a 40.25 m dal geofono L1-1 (scoppio 4, stendimento L1)**

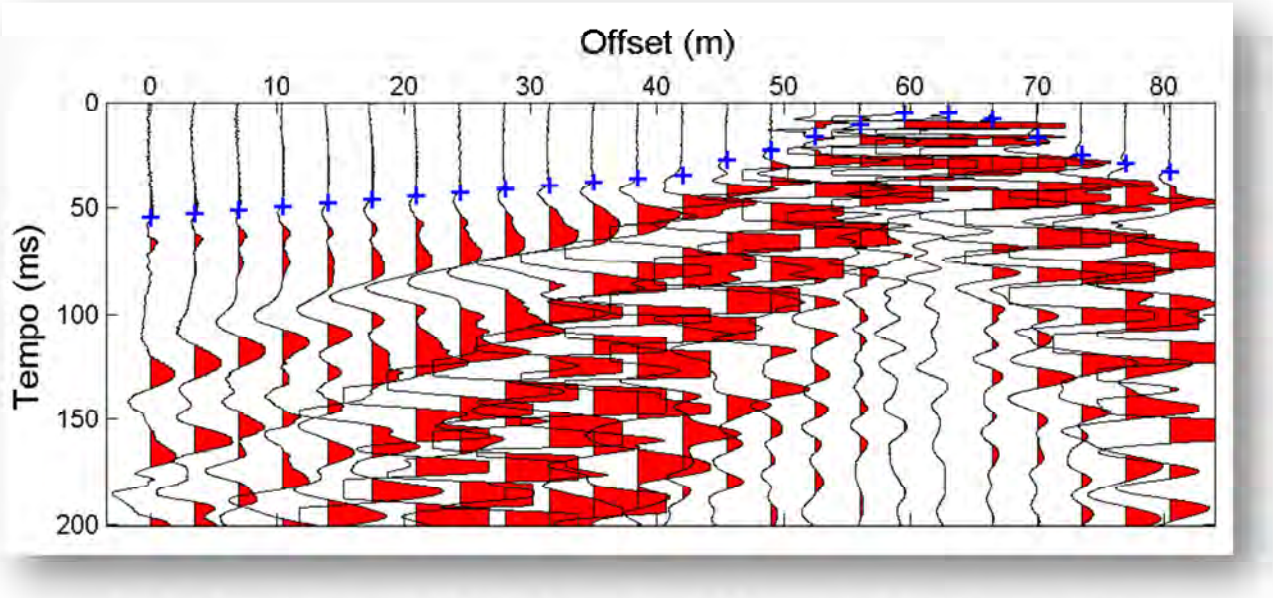



**Fig. 5 – Energizzazione a 61.25 m dal geofono L1-1 (scoppio 5, stendimento L1)**

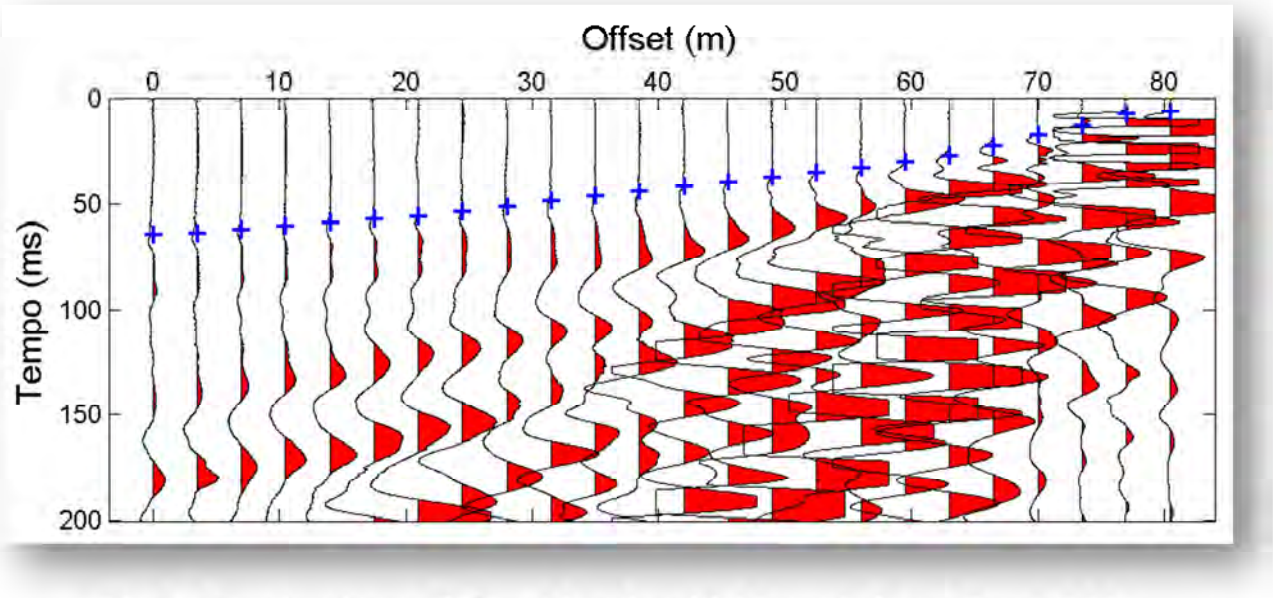



**Fig. 6 – Energizzazione a 78.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 6, stendimento L1 )**

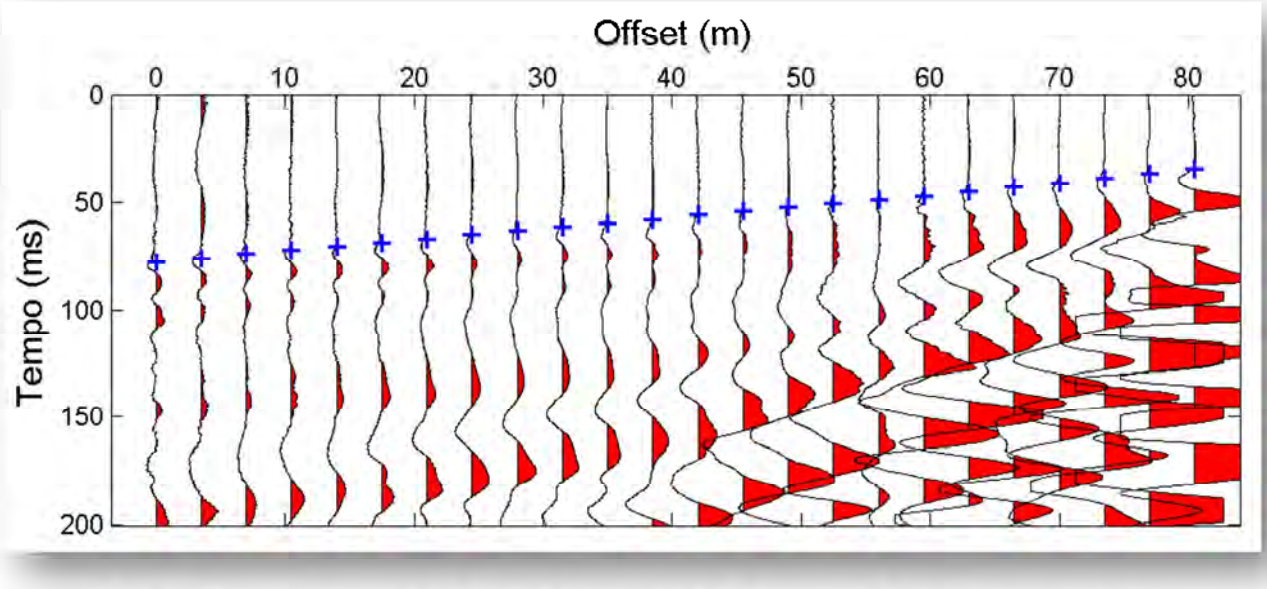



**Fig. 7 – Energizzazione a 99.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 7, stendimento L1)**

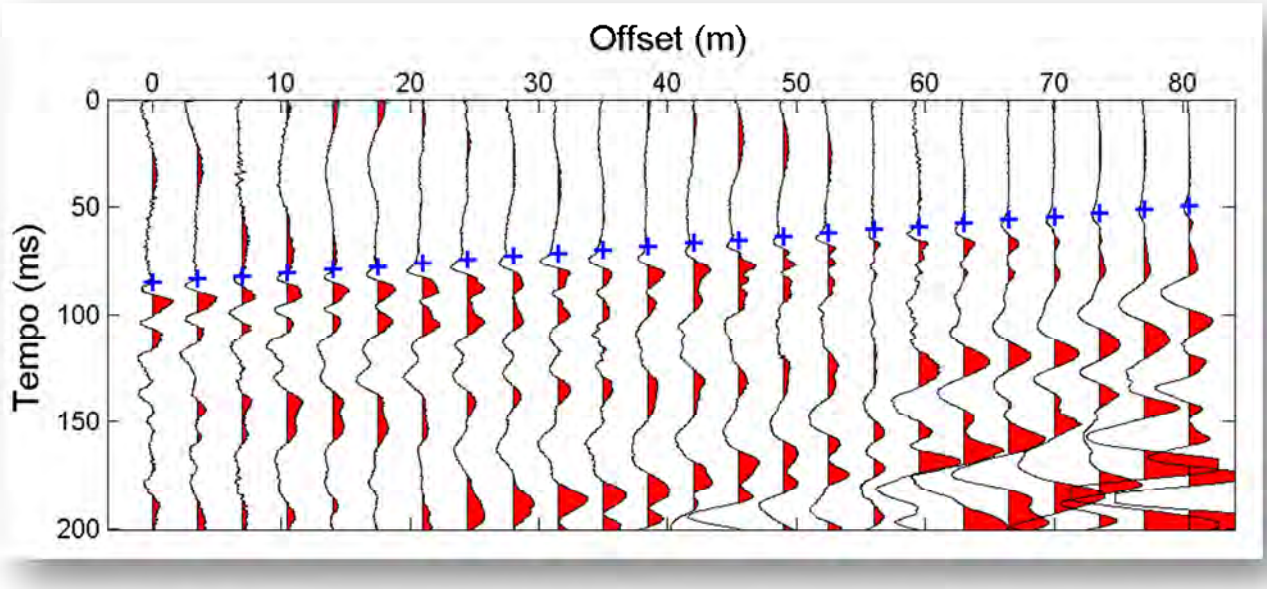



***Fig. 8 – Energizzazione a 120.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 8, stendimento L1)***

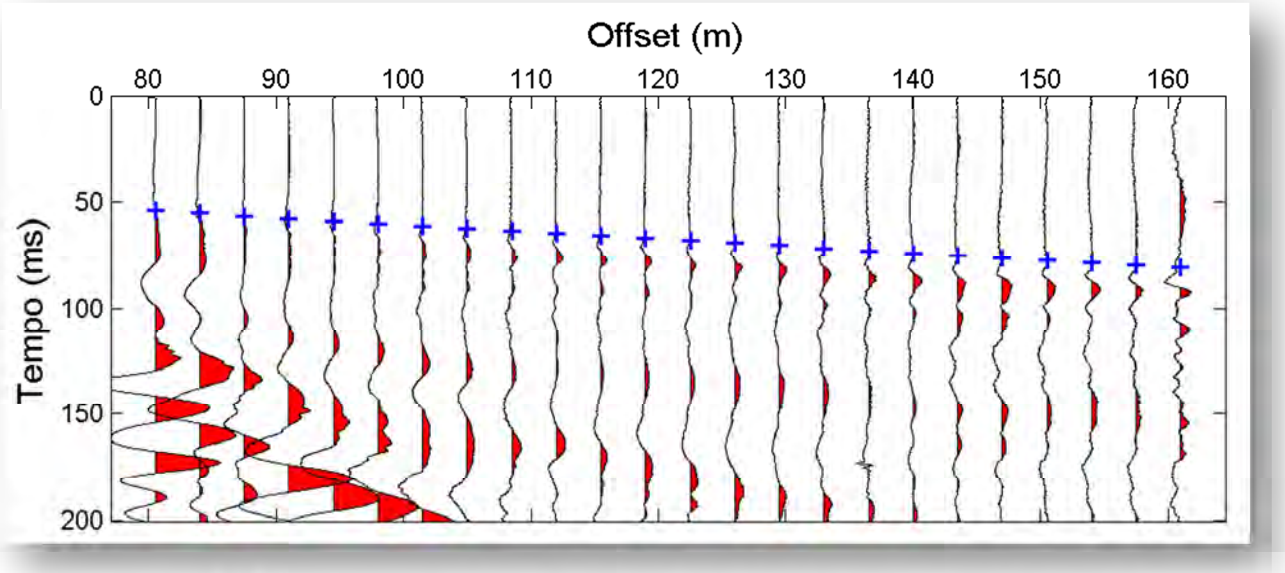



**Fig. 9 – Energizzazione a 40.25 m dal geofono L1-1 (scoppio 1, stendimento L2)**

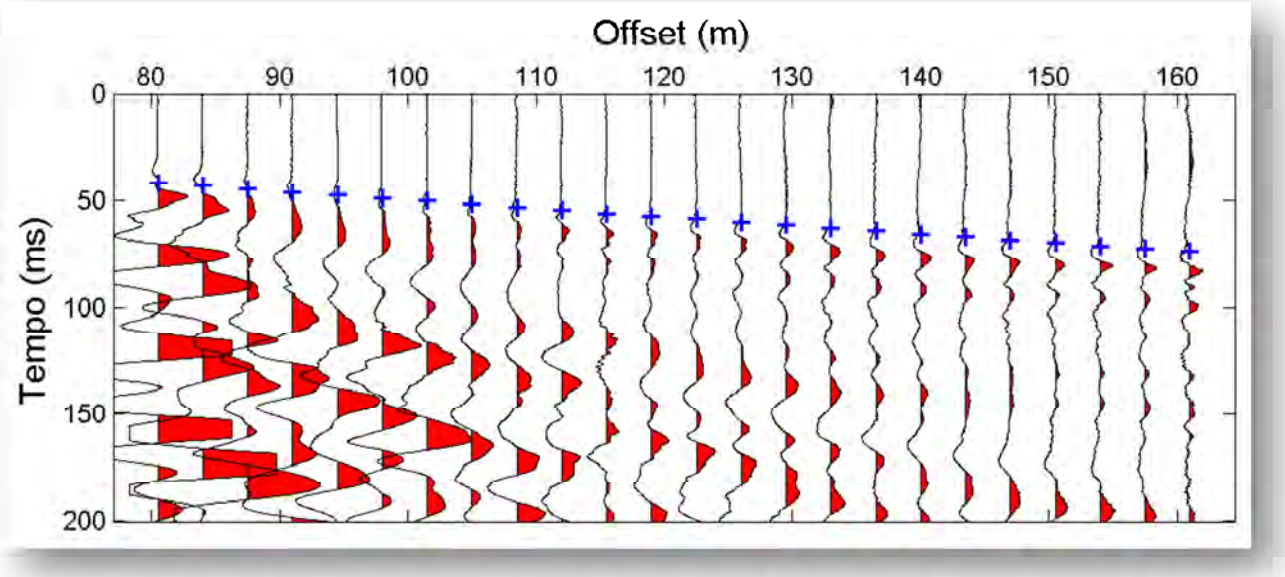



**Fig. 10 – Energizzazione a 61.25 m dal geofono L1-1 (scoppio 2, stendimento L2)**

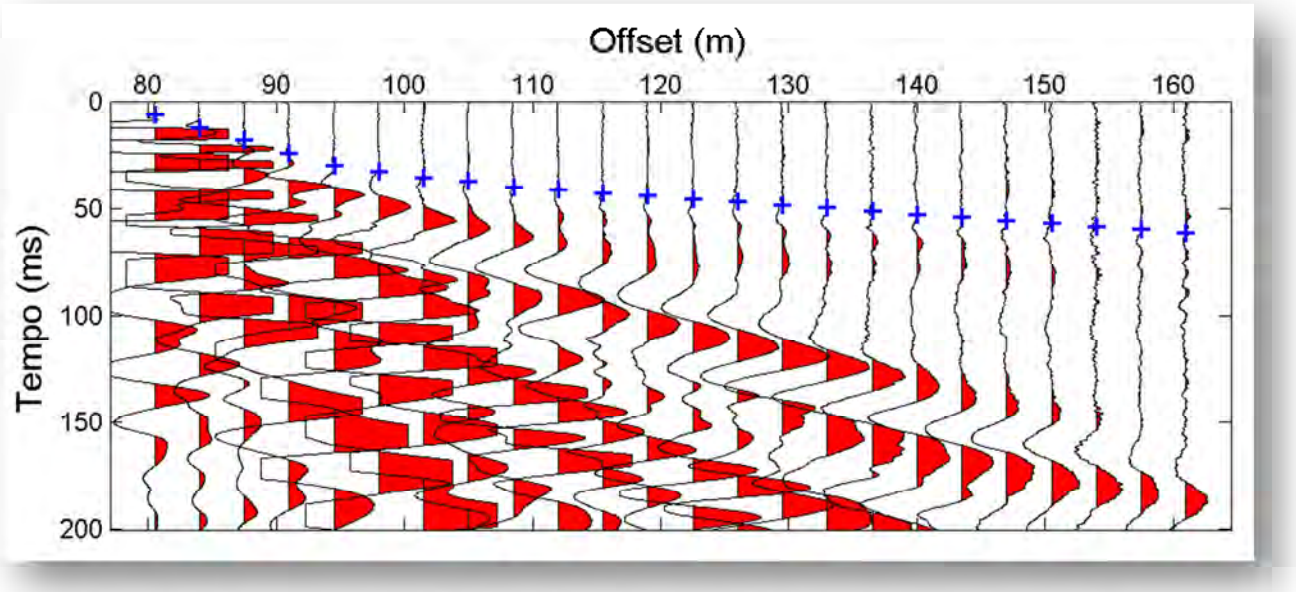



**Fig. 11 – Energizzazione a 78.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 3, stendimento L2)**

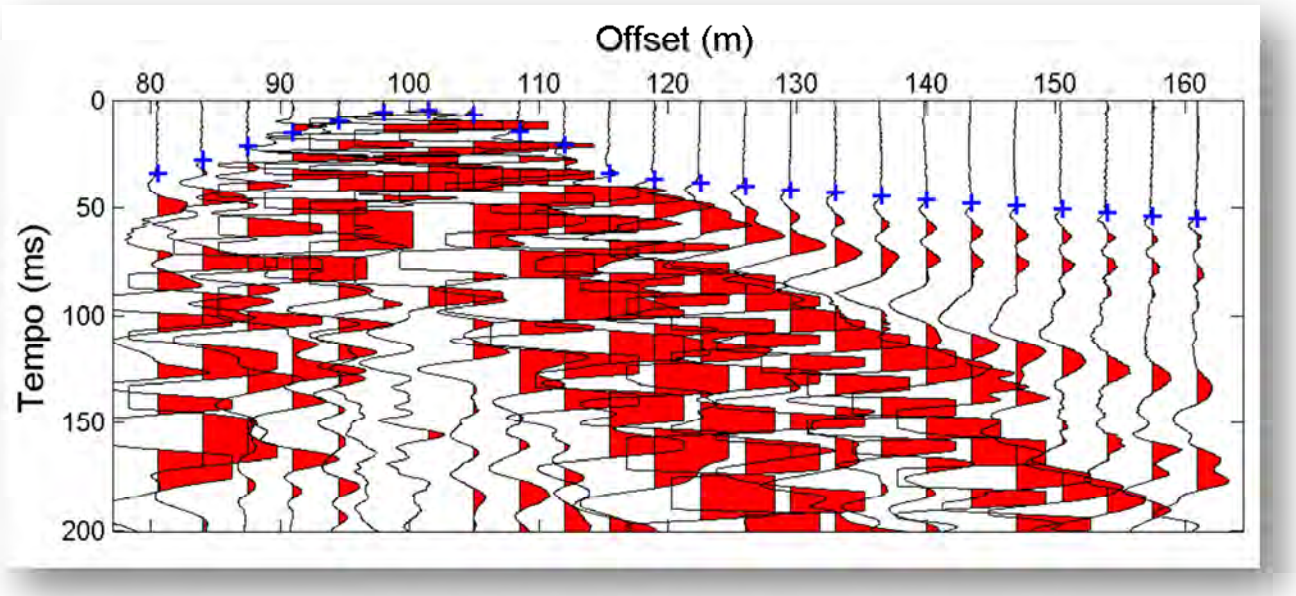



**Fig. 12 – Energizzazione a 99.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 4, stendimento L2)**

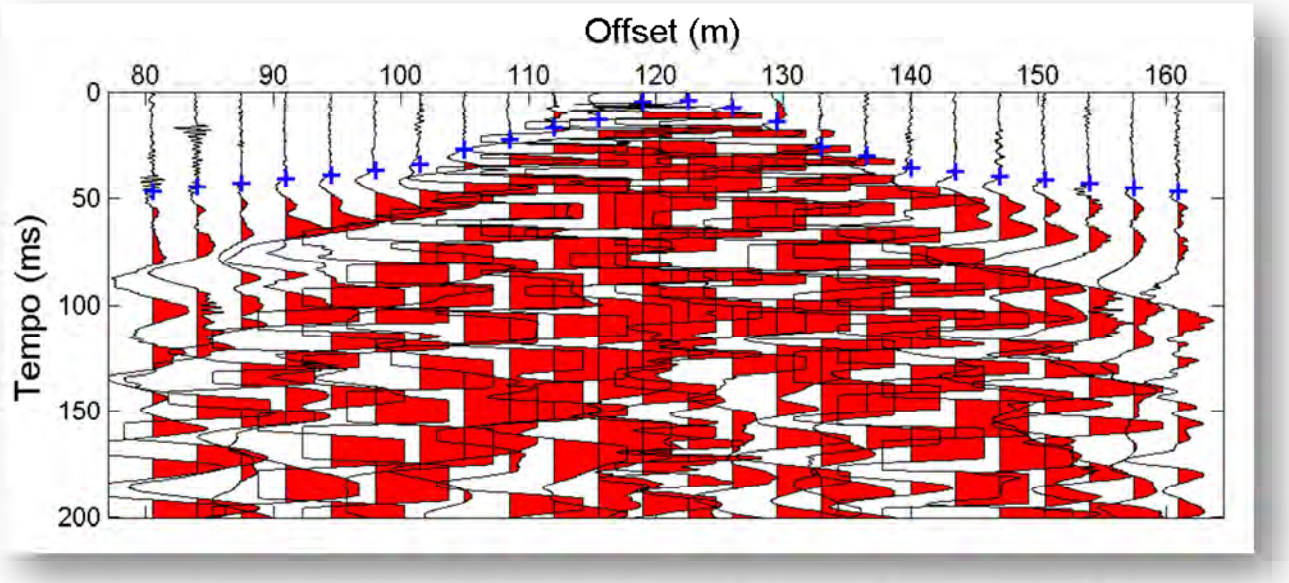



**Fig. 13 – Energizzazione a 120.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 5, stendimento L2)**

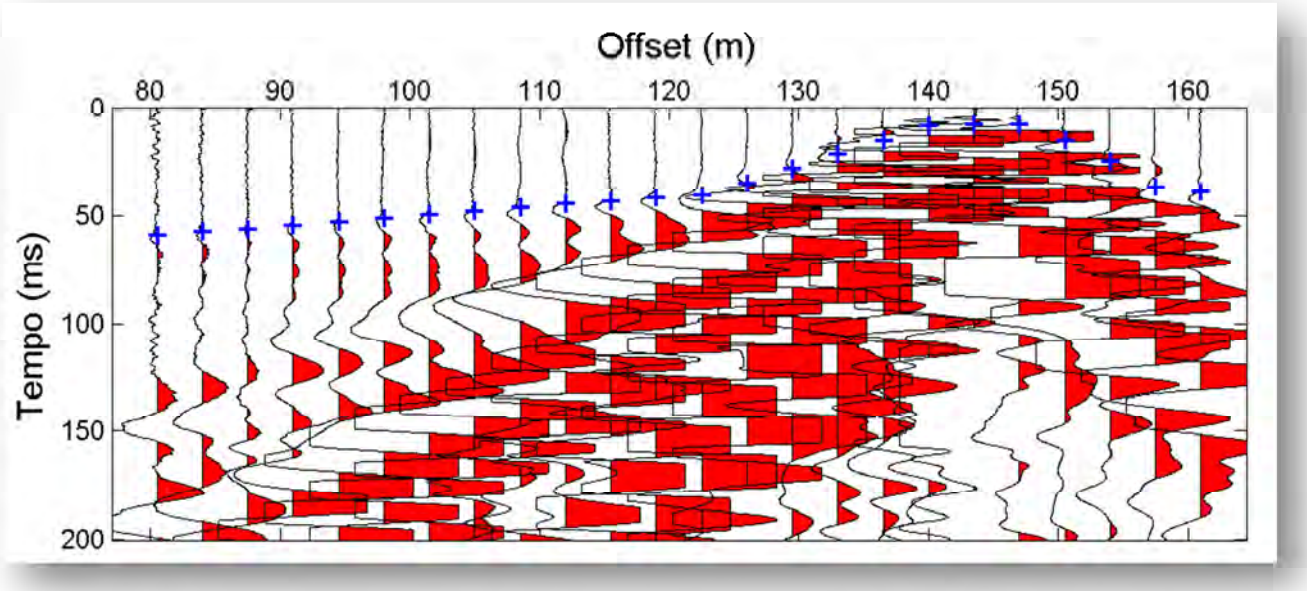



**Fig. 14 – Energizzazione a 141.75 m dal geofono L1-1 (scoppio 6, stendimento L2)**

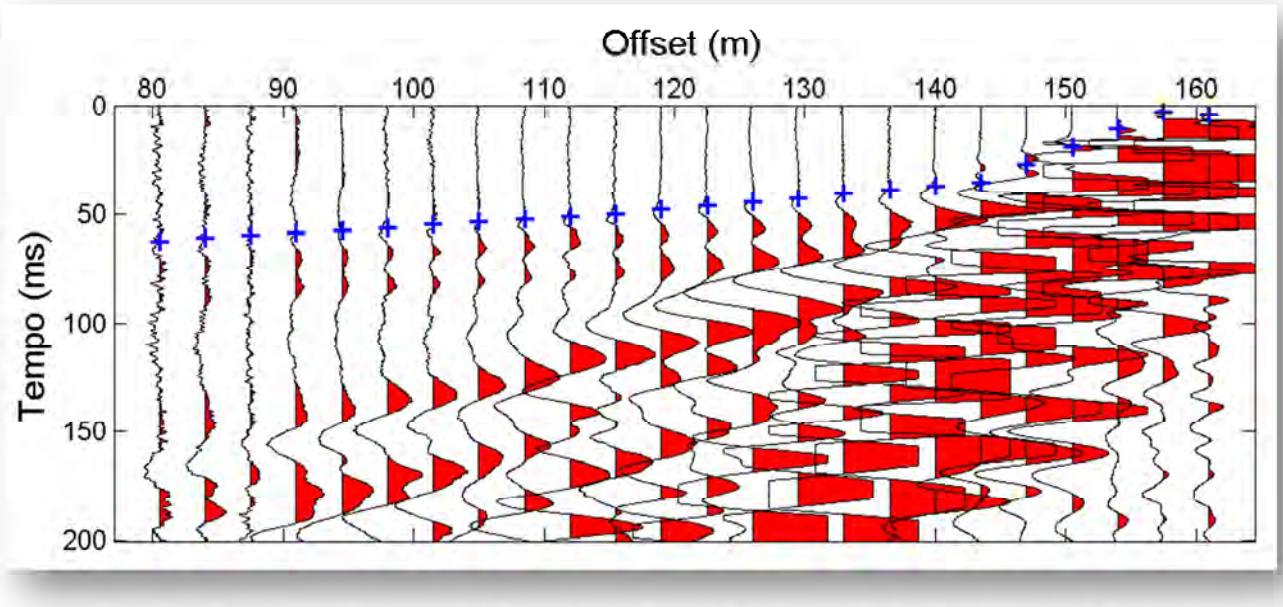



**Fig. 15 – Energizzazione a 159.25 m dal geofono L1-1 (*scoppio* 7, *stendimento* L2)**

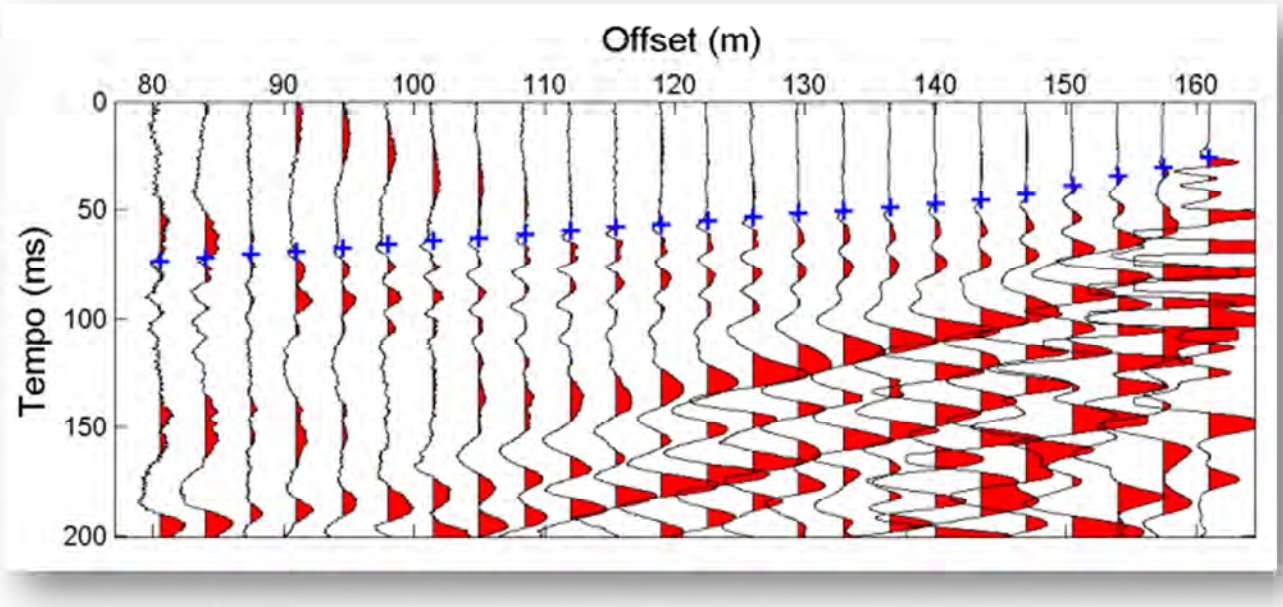
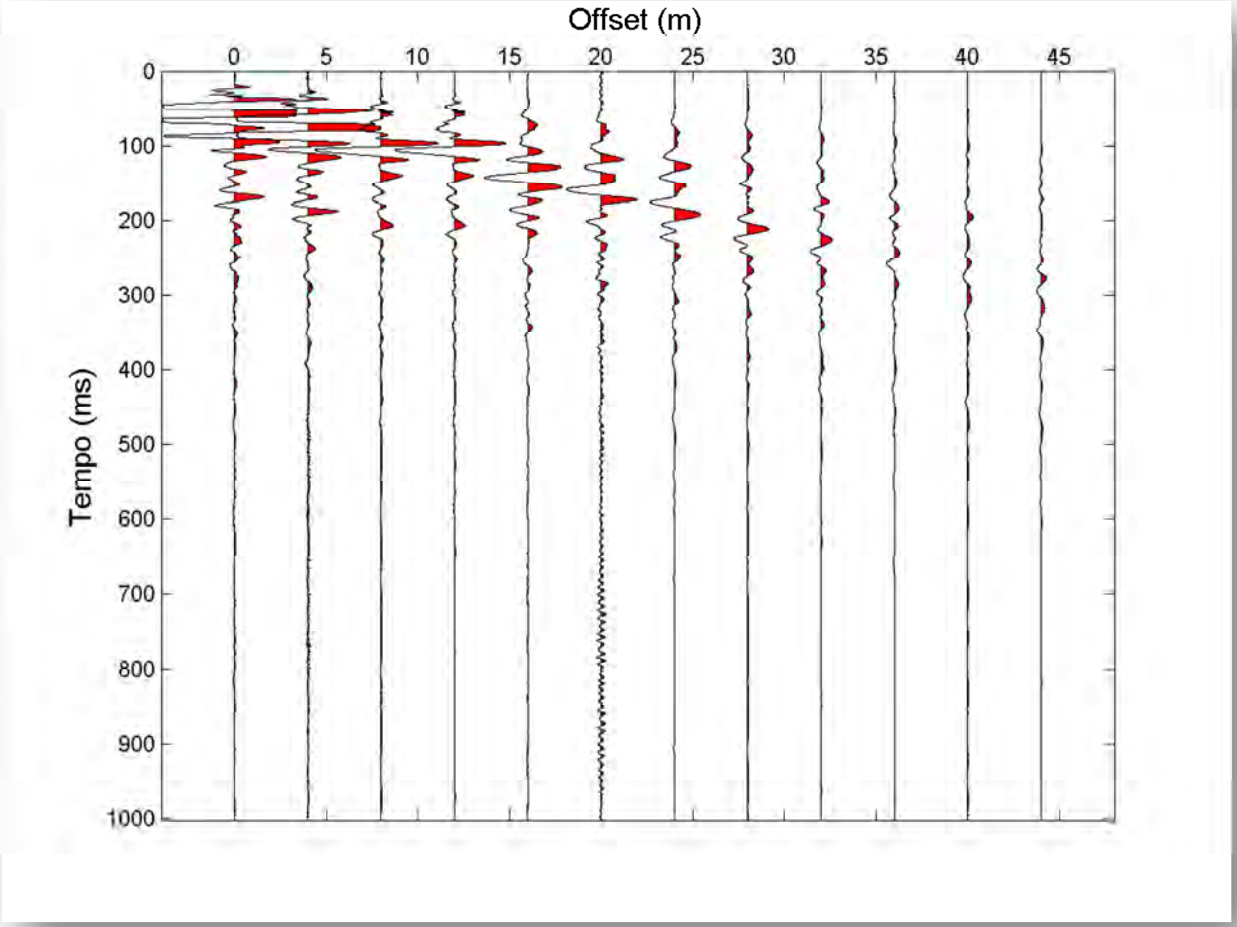



**Fig. 16 – Energizzazione a 179.25 m dal *geofono* L1-1 (*scoppio* 8, *stendimento* L2)**

Comm. **Dott. Geol. Piero Cavarocchi**
Via Murri, 44
40137 - Bologna

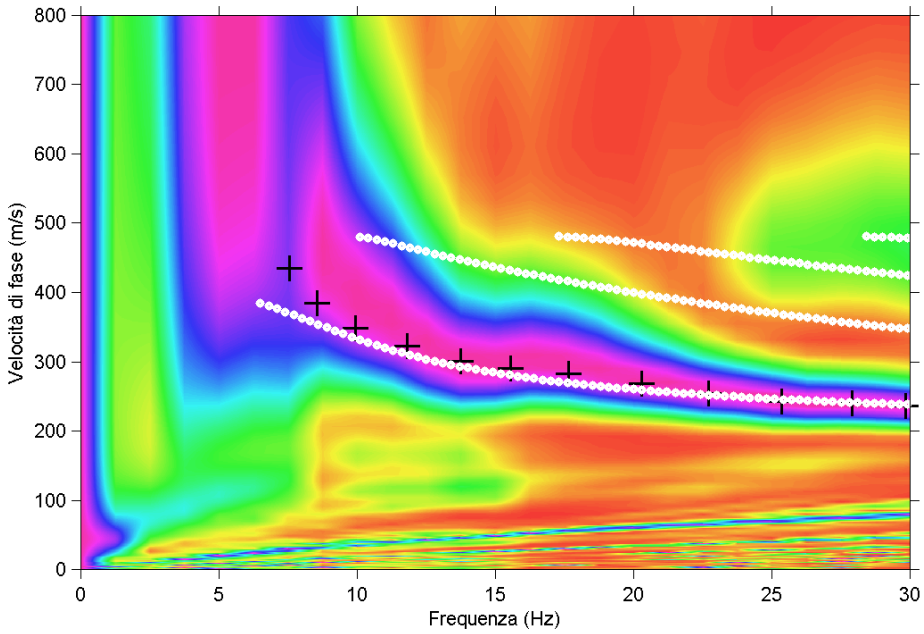


# Allegato 3 – Sismogrammi Indagine MASW



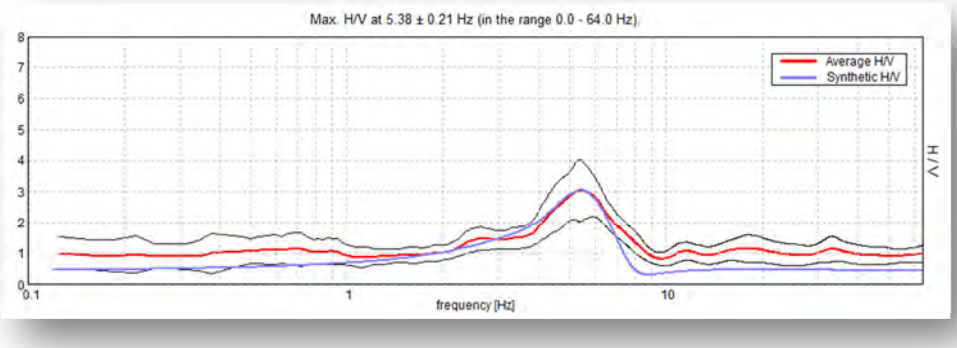

Sismogrammi acquisiti dai 12 geofoni durante l'indagine. La sorgente è posta ad una distanza di 10m dal geofono 1.La spaziatura tra i geofoni è di 4 m.

# Allegato 4 – Spettro di dispersione e curva H/V

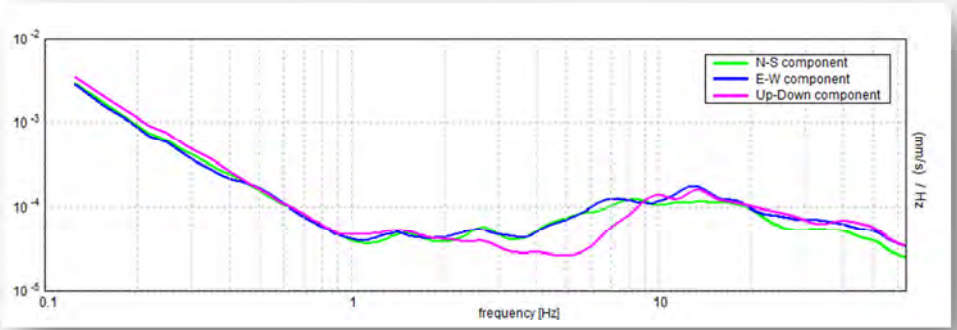



**in alto:** Spettro frequenza-velocità di fase dei dati acquisiti durante l'indagine. Sovrimposti allo spettro sono il picking del modo fondamentale (crocette nere) e le curve di dispersione sintetiche del modo fondamentale e di alcuni modi superiori (pallini bianchi).
**inbasso:** Curva H/V **(A)** e andamento delle tre componenti velocimetriche (N-S, E-W, Up-Down) **(B)**

**A**

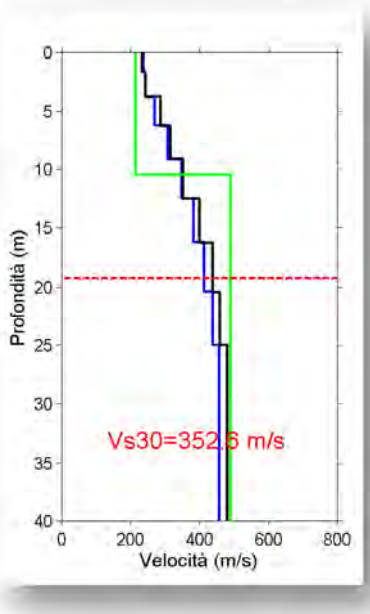



**B**



# Allegato 5 – Velocità onde S in funzione della profondità

**A**



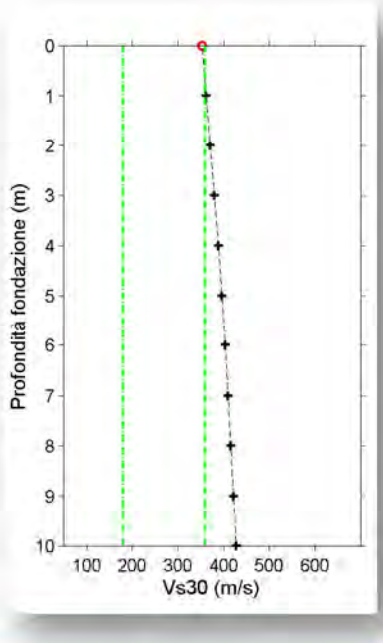

**B**

| Spessore (m) | Vs WaveEq (m/s) | Spessore (m) | Vs SWAMI (m/s) | Spessore (m) | Vs HVSR (m/s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1.7 | 234.1 | 1.7 | 237.4 | 10.5 | 215.0 |
| 2.1 | 243.3 | 2.1 | 243.5 | 36.0 | 490.0 |
| 2.5 | 286.5 | 2.4 | 270.2 | inf | 600.0 |
| 2.9 | 316.6 | 3.0 | 309.0 | | |
| 3.3 | 352.3 | 3.3 | 347.7 | | |
| 3.7 | 399.3 | 3.7 | 383.1 | | |
| 4.2 | 437.4 | 4.2 | 414.0 | | |
| 4.6 | 460.0 | 4.6 | 439.0 | | |
| 15.0 | 480.7 | 15.0 | 457.0 | | |
| inf | 486.4 | inf | 461.4 | | |

**(A)** Andamento della velocità delle onde S in funzione della profondità. Vengono riportati in nero i valori ottenuti con il programma WaveEq (Geometrics) e in blu i valori derivati con il programma SWAMI (Georgia Institute of Technology), relativamente all'indagine MASW; in verde viene indicato l'andamento ottenuto mediante inversione della curva *H/V,* vincolata nella parte superficiale attraverso i valori ottenuti dall'indagine *MASW*. La linea tratteggiata in rosso rappresenta la profondità stimata per la frequenza più bassa scelta durante l'operazione di *picking*. A profondità maggiori l'andamento delle velocità delle onde S è stimato mediante *fit* della curva H/V.

**(B)**La prima, terza e quinta colonna riportano gli spessori degli strati dei modelli ottenuti dall'indagine MASW (colonne 1 e 3) e dall'indagine *HVSR* (colonna 5). La seconda e la quarta colonna contengono le velocità stimate attraverso la tecnica *MASW* utilizzando i programmi WaveEq e SWAMI; la sesta colonna riporta le velocità stimate mediante inversione della curva H/V. Sono evidenziati in azzurro i valori di velocità e i relativi spessori utilizzati per il calcolo del parametro $Vs_{30}$;**(C)**andamento del parametro $Vs_{30}$ in funzione della variazione della profondità del piano fondale della struttura in progetto. Le linee in tratteggio di colore verde indicano i limiti 180 m/s e 360 m/s rispetto alla tabella 1 (crf. §2).

**C**



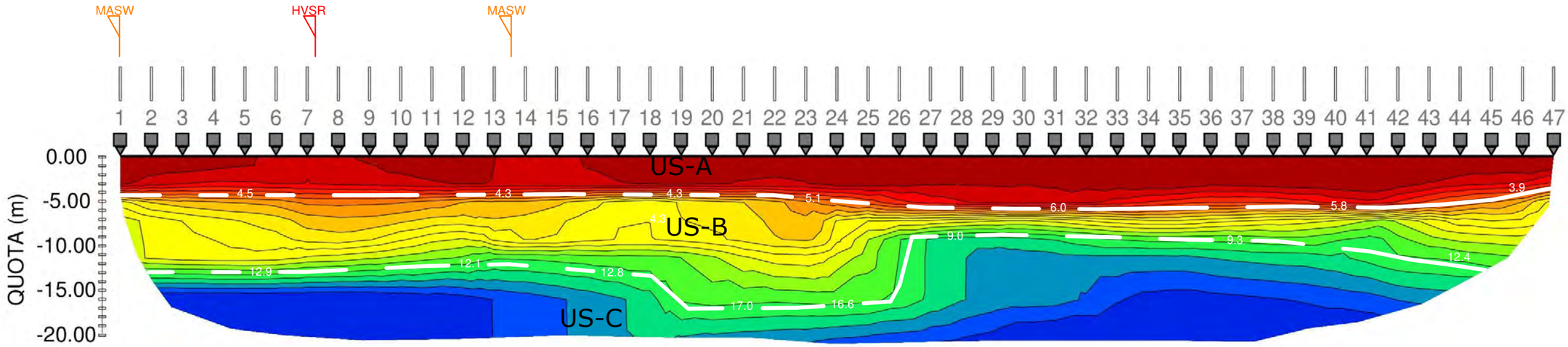
**PROVINCIA DI BOLOGNA**
**COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO**

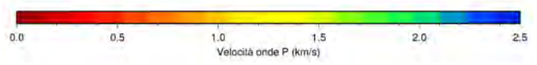
**COMMITTENTE:**
Spett. Dott. Geol. Piero Cavarocchi
via Murri, 44
40137 - BOLOGNA

**PROGETTO:**
Indagine Sismica Casalecchio di Reno (BO),
Via Camillo Ronzani
Sezione Tomografica in onde P

# TAVOLA 1

**Edizione:** Definitiva | **Formato:** A3 | **Scala:** 1:500




## LEGENDA