

entro-Giunta - Prot. 30/04/2025. 0424340-E Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PIAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Presidenza del Consiglio dei Ministri
IL COMMISSARIO STRAORDINARIO ALLA RICOSTRUZIONE
NEI TERRITORI DELLE REGIONI EMILIA-ROMAGNA, TOSCANA E MARCHE



COMUNE DI MELDOLA

Provincia di Forlì-Cesena

PNRR MISURE PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONE E PER
LA RIDUZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO M2C4 INVESTIMENTO 2.1A

SITUAZIONE EMERGENZIALE CONNESSA ALLE CONDIZIONI METEO A
SEGUITO DELLE PRECIPITAZIONI DEL GIORNO 16/05/2023 E SUCCESSIVI.
PIANO DEGLI INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA E RIPRISTINO DELLA
VIABILITÀ DELLE INFRASTRUTTURE STRADALI
VIA SAN GIOVANNI E PIAZZA SAFFI. PRIMI INTERVENTI
DI MESSA IN SICUREZZA TRATTI TOMBINATI RIO CAVALLO
(VIA PUCCINI, VIA SAN GIOVANNI, PIAZZA SAFFI, VIA BUOZZI, VIA MAZZINI)

C.U.P. D45F23000290001

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Oggetto Tavola:

RELAZIONE GEOLOGICA

Tavola:

GEO-RE-01-1

Scala:

Geologo:
Massimiliano Flamigni
Via Fratelli Rosselli 31, 47121 Forlì (FC)



Progettista
Ing. Massimo Plazzi
Via Maceo Casadei 19, 47121 Forlì (FC)
massimo.plazzi@ingpec.eu



Revisione	Data	Descrizione
0	Aprile 2025	Emissione

Indice

1 PREMESSA.....	2
2 PRINCIPALI NORMATIVE DI RIFERIMENTO.....	4
3 ALLEGATI.....	5
4 INDIVIDUAZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO.....	5
5 VINCOLO IDROGEOLOGICO E PIANIFICAZIONE DI BACINO.....	6
6 CARATTERI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI.....	6
7 ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE.....	6
8 INDAGINI ESEGUITE E DISPONIBILI.....	7
8.1 PROVE CPT.....	8
8.2 PROVE DPSH.....	9
8.3 PRELIEVO DI CAMPIONE DISTURBATO ED ESITI ANALISI DI LABORATORIO.....	10
8.4 INDAGINE GEOFISICA.....	10
9 SUCCESSIONE STRATIGRAFICA “LOCALE” E STIMA DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI TERRENI.....	11
9.1 MODELLO GEOLOGICO AREA 1.....	11
9.2 MODELLO GEOLOGICO AREA 2.....	12
10 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO.....	14
10.1 INDAGINE GEOFISICA.....	16
10.2 CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO DI FONDAZIONE.....	16
10.3 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE.....	16
10.4 RISCHIO DI LIQUEFAZIONE CICLICA.....	17
11 CONCLUSIONI.....	17

1 PREMESSA

In prossimità dell'abitato di Meldola (provincia di Forlì-Cesena), immediatamente ad ovest dell'abitato, è presente un fosso (a tratti demaniale) denominato "Rio Cavallo".

Questo corpo idrico è un affluente di sinistra del Fiume Bidente nel quale sfocia dopo aver attraversato, per mezzo di un lungo tombinamento, il centro abitato.

Immediatamente a monte dell'area urbanizzata è presente uno sbarramento in terra, realizzato a scopo irriguo intorno al 1960, che forma un modesto invaso con volume idrico stimato di 8.000-8.500 mc.

Questo invaso, per lungo tempo, non ha manifestato alcun problema anzi ha probabilmente contribuito a mitigare le piene del Rio Cavallo e le sollecitazioni idrauliche nell'area a valle dello sbarramento nella quale il fosso è prevalentemente tombinato.

In occasione degli eventi meteorici estremi che hanno investito la Romagna nel corso del maggio 2023 si è tuttavia assistito ad un importante fenomeno di piena nel tratto di monte del "Rio Cavallo" che l'invaso ha potuto mitigare solo parzialmente.

L'enorme afflusso idrico connesso all'evento ha riempito l'invaso e, una volta superata la portata smaltibile dal dispositivo di "troppo pieno" (costituito da due tubi affiancati in cls da 1000 mm), il livello idrico all'interno del bacino si è progressivamente innalzato fino a sormontare la sommità arginale riversandosi nelle aree sottostanti, lungo la viabilità (vedi Figure 1 e 2) e causando ingenti danni anche a vari tratti dei tombinamenti esistenti lungo il "Rio Cavallo" in parte occludendoli ed in parte facendoli crollare.

Alcuni tratti del "Rio Cavallo" (sia a cielo aperto che tombinati) sono stati sistemati in "somma urgenza" mentre altri, sui quali non è stato possibile intervenire, risultano a tutt'oggi solo parzialmente funzionanti.

In estrema sintesi, il progetto presentato, prevede:

- l'esecuzione di interventi di ripristino e miglioramento della rete di smaltimento delle acque nell'area prossima alla S.P. del Bidente (ripristino della continuità idraulica) nella quale non è stato possibile intervenire in "somma urgenza",
- un intervento sul rilevato arginale finalizzato ad ottimizzare la funzione di laminazione del bacino sotteso.

Il progetto interesserà quindi due aree distinte, corrispondenti ad altrettanti lotti, che saranno realizzati in tempi successivi:

- AREA 1 – nei pressi della S.P. del Bidente,
- AREA 2 – in corrispondenza dell'attuale rilevato arginale.



Figura 1: Evento alluvionale che ha interessato l'area nel maggio 2023.



Figura 2: Evento alluvionale che ha interessato l'area nel maggio 2023.

Per questo lavoro si è proceduto:

- ad un sopralluogo sull'area,
- al reperimento dei dati e delle cartografie di base e tematiche disponibili,
- alla predisposizione e assistenza all'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche e geofisiche specifiche per questo intervento,
- all'organizzazione e analisi dei dati ed alla stesura della presente relazione.

La presente relazione geologica e sismica riassume gli esiti delle indagini e delle analisi svolte per verificare le condizioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche delle aree interessate dal progetto.

2 PRINCIPALI NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- AGI: raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio e sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche. Giugno 1990;
- OPCM n°3274/2003 e successive modifiche - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica";
- OPCM n. 3519/2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone" e successivi aggiornamenti;
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Decreto 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni";
- Circolare NTC 2018 del 11-02-2019.;
- R.D.L. 30 dicembre 1923 n. 3267 e successive integrazioni e modificazioni - "Vincolo Idrogeologico";
- Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico - Autorit- dei Bacini Regionali Romagnoli - Variante di Coordinamento PAI-PGRA.
- D.G.R. 476/2021 - Indicazioni per l'elaborazione della cartografia delle aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento)
- D.G.R. 564/2021 - Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)

3 ALLEGATI

Costituiscono parte integrante della presente relazione i seguenti allegati (presenti in calce):

- Inquadramento corografico dell'area di intervento,
- Inquadramento topografico dell'area di intervento,
- Inquadramento su planimetria catastale,
- Carta geologica dell'area pubblicata dalla Regione Emilia-Romagna,
- Carta della Perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico del Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli – Variante di coordinamento fra il Piano Stralcio ed il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PAI-PGRA),
- Planimetria con individuazione dei punti di esecuzione delle indagini geognostiche, geofisiche e traccia della sezione,
- Sezione geologica schematica,
- Esiti delle prove geognostiche eseguite e disponibili,
- Esito delle analisi di laboratorio eseguite,
- Esito dell'indagine geofisica eseguita.

4 INDIVIDUAZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO

L'area di intervento è quella contermina al tracciato del Rio Cavallo, in parte a cielo aperto ed in parte tombinato, fra le Vie Vincenzo Bellini e Puccini a monte della s.p. del Bidente, nella porzione occidentale dell'abitato di Meldola.

Sulle cartografie ufficiali della Regione Emilia-Romagna (Tavole 1 e 2) l'area di intervento è individuabile:

- sulla tavoletta, in scala 1:25.000, 255 NO - Forlimpopoli,
- sull'elemento, in scala 1:5.000, 255051 – Meldola Nord.

Sulle planimetrie catastali del Comune di Meldola (Tavola 3) l'intervento interesserà particelle presenti sul foglio 9 e precisamente:

- la "striscia demaniale" del Rio Cavallo nel tratto a monte della S.P. del Bidente,
- pro parte le particelle contermini alla striscia del Rio Cavallo individuabili ai mappali 2202, 2200, 2203, 2213, 2201, 6, 2018, 361, 372.

5 VINCOLO IDROGEOLOGICO E PIANIFICAZIONE DI BACINO

L'area di intervento non rientra fra quelle sottoposte a vincolo idrogeologico ai sensi del R.D 3267/1923.

Il Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli - variante di coordinamento con il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PAI-PGRA del 2016), è uno strumento che pone fra i suoi obiettivi primari la riduzione del rischio idrogeologico, il riequilibrio del territorio ed il suo utilizzo nel rispetto del suo stato, della sua tendenza evolutiva e delle sue potenzialità d'uso.

Con tale finalità la cartografia di piano, alla scala 1:25.000, individua le zone in cui insistono rischi di natura idrogeologica (rischio idraulico o rischio di frana) "quantificando" anche l'entità dei rischi stessi.

Come si può verificare sullo stralcio cartografico relativo all'area di indagine (Tavola 4) in quest'area il PAI-PGRA non individua particolari rischi.

6 CARATTERI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

Sulla carta geologica ufficiale della Regione Emilia-Romagna nell'area di intervento è segnalata la presenza di depositi di conoide alluvionale (I2).

Si tratta di prevalenti limi e limi-argillosi, talora sovrastanti a sabbie o ghiaie in matrice sabbiosa, di origine continentale, riferibili al pleistocene superiore – olocene.

Questi depositi alluvionali sono giustapposti ai sottostanti depositi marini plio-pleistocenici appartenenti alla formazione delle Argille Azzurre (FAA).

Dal punto di vista morfologico l'area di intervento interessa la parte apicale della conoide di un corso d'acqua secondario affluente di sinistra del Bidente/Ronco con una superficie degradante verso est - nord est.

7 ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE

Corso d'acqua principale della zona è il Rio Cavallo, modesto affluente di sinistra del Bidente nel quale sfocia dopo aver attraversato, per mezzo di un lungo tratto tombinato, prima la s.p. del Bidente e poi l'abitato di Meldola.

Nel tratto oggetto del presente studio (fra l'invaso sul Rio Cavallo e la S.P. del Bidente) il fosso è nella parte iniziale a cielo aperto e poi tombinato al di sotto della corte di fabbricati

privati.

Per quanto concerne le acque sotterranee in occasione delle indagini, fino alle profondità investigate, non è stata rilevata la presenza di acque di falda.

8 INDAGINI ESEGUITE E DISPONIBILI

Sulla tavola 6 in allegato sono rappresentati i punti di esecuzione delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite e disponibili considerate nell'ambito di questo studio.

Le prove disponibili derivano dalla documentazione messa a disposizione dal Comune di Meldola e sono state realizzate in occasione di passati studi sul rilevato arginale presente lungo il Rio Cavallo.

Le indagini disponibili sono state integrate con nuove indagini consistenti in:

- una prova penetrometrica statica con punta meccanica tipo Begemann (CPT1-2023),
- una prova penetrometrica dinamica super pesante (DPSH1),
- una misura di rumore ambientale a stazione singola con tromografo sismico e metodologia HVSR.

In corrispondenza del punto di esecuzione della prova CPT1-2023 si è proceduto al prelievo di un campione disturbato di terreno sul quale effettuare analisi fisiche e meccaniche.

Le prove CPT e DPSH sono state effettuate con un penetrometro semovente Pagani da 200 kN attrezzabile, alternativamente, per effettuare prove statiche con punta meccanica o dinamiche superpesanti.

8.1 PROVE CPT

Le prove statiche (CPT) con punta meccanica tipo *Begemann* si eseguono infiggendo nel terreno, attraverso un martinetto, una punta conica telescopica dotata di manicotto per la misura dell'attrito laterale (punta meccanica tipo Begemann) rilevando, ad intervalli regolari di 20 cm, i dati di resistenza all'avanzamento della punta (R_p) e dell'insieme punta più manicotto di attrito ($R_t = P_p + R_l$ con R_l resistenza sul manicotto di attrito), attraverso una cella di carico a lettura digitale. Per la regolarità della prova la velocità di infissione è fissata a 2 cm/sec.

La stratigrafia dei terreni attraversati da una prova CPT può essere ottenuta, secondo quanto proposto da Schmertmann (1978), per mezzo del diagramma di figura 2 utilizzando i parametri R_p e R_l .

Anche i parametri geotecnici (cu per terreni coesivi e phi per terreni granulari) dei materiali attraversati possono essere ottenuti attraverso varie correlazioni riportate in letteratura.

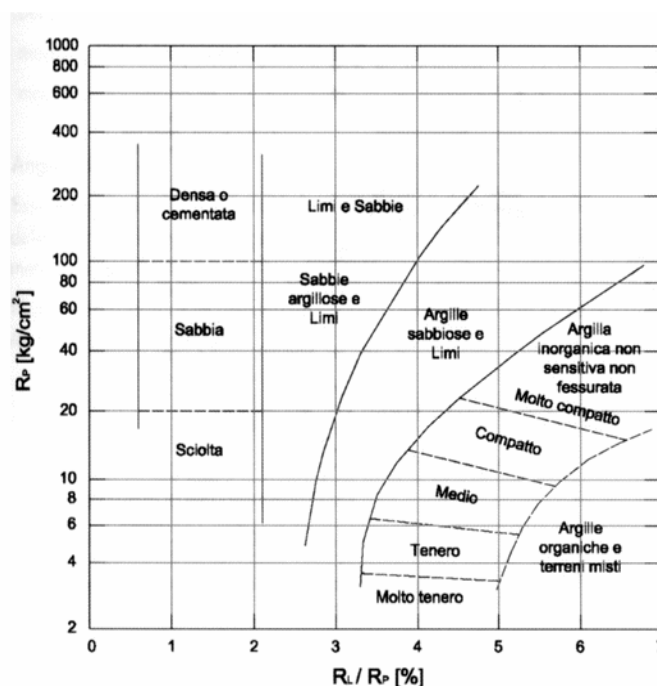


Figura 3: Interpretazione della stratigrafia da una prova CPT secondo Schmertmann (1978)

A titolo di esempio per la coesione non drenata dei livelli argillosi viene utilizzata la relazione empirica:

$$cu = (Rp - yd)/Nc$$

con Nc variabile da 14 a 22.

Gli esiti delle prove penetrometriche statiche CPT sono trasmessi in forma grafica e numerica in allegato.

8.2 PROVE DPSH

Le prove dinamiche superpesanti (DPSH) consistono nell'infiggere nel terreno una punta conica metallica, di area pari a 20 cmq, posta all'estremità di un'asta d'acciaio prolungabile con l'aggiunta di successive aste di peso pari a 6,2 Kg/ml.

L'infissione avviene “per battitura” facendo cadere, da un'altezza di 75 cm (volata), un maglio di 63,5 Kg.

La resistenza del terreno viene determinata sulla base del numero di colpi necessari per ottenere 20 cm di penetrazione.

Un parametro rappresentativo del terreno che è possibile ottenere dalla prova DPSH è la Resistenza Dinamica (R_d) calcolata con la “Formula degli Olandesi”:

$$R_d = M \times g \times H / (A \times e)$$

con:

- M = peso del maglio (massa battente)
- g = accelerazione di gravità
- H = altezza di caduta del maglio
- A = area della sezione della punta
- e = penetrazione media per colpo.

Questo parametro era utilizzato nella pratica professionale per ottenere informazioni utili sul carico ammissibile del terreno di fondazione che veniva “stimato” imponendo un “fattore di sicurezza” pari a 20:

$Q_d = R_d/20$.

Gli esiti della prova DPSH sono trasmessi in forma grafica e numerica in allegato.

8.3 PRELIEVO DI CAMPIONE DISTURBATO ED ESITI ANALISI DI LABORATORIO

Dal livello superiore (profondità da 1,1 a 1,5 m dal p.c.) di limi argillosi e argille limose presenti nell'area in cui si è effettuata la prova CPT1-2023, in corrispondenza del piede del paramento esterno dell'argine del lago, è stato prelevato un campione disturbato di terreno sul quale si è provveduto alla determinazione della distribuzione granulometrica, delle caratteristiche fisiche, dei parametri indice e della determinazione dei parametri meccanici sul campione ricostruito (parametri assimilabili ai valori residui).

Gli esiti delle analisi di laboratorio effettuate sono trasmessi in allegato.

Come si vede dagli elaborati si tratta (classificazione AGI) di un un "*limo argilloso debolmente sabbioso*" ($s = 13\%$, $l = 70\%$, $a = 17\%$), plastico (I_p compreso fra 15 e 40) caratterizzato dai seguenti parametri meccanici (assimilabili ai valori residui):

- $\phi'(r) = 19,5^\circ$
- $c'(r) = 0 \text{ kg/cmq.}$

8.4 INDAGINE GEOFISICA

All'interno del sito, nel punto individuato come HVSR sulla Tavola 6 in allegato, è stata effettuata una misura di rumore ambientale a stazione singola con tromografo sismico (TROMINO®).

L'esito dell'indagine, unitamente ad una breve descrizione della metodologia utilizzata, è trasmesso in allegato nell'elaborato "Indagine sismica passiva a stazione singola HVSR".

9 SUCCESSIONE STRATIGRAFICA “LOCALE” E STIMA DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI TERRENI

L'assetto stratigrafico locale e le principali caratteristiche meccaniche dei terreni presenti nel sottosuolo delle due aree di intervento sono stati ricavati dagli esiti delle indagini eseguite e disponibili.

9.1 MODELLO GEOLOGICO AREA 1

Sulla figura 4 della pagina seguente è rappresentata la successione stratigrafica rilevata in corrispondenza dell'area della prova DPSH1.

La prova è stata effettuata lungo la banchina di una strada “bianca” e in superficie è presente un orizzonte di materiale di riporto estremamente compatto di circa 40-50 cm di spessore. Più in profondità, fino a circa quattro metri dal p.c., sono presenti limi argillosi compatti seguiti da un orizzonte di circa un metro di ghiaie in matrice limoso-sabbiosa.

A partire da circa 5,0 m dal p.c. sono nuovamente presenti terreni prevalentemente argillosi compatti ed estremamente compatti appartenenti alla formazione della Argille Azzurre (FAA). Sulla seguente tabella vengono riassunti i valori nominali dei principali parametri meccanici che è possibile attribuire ai vari livelli di terreno attraversati (cu – coesione non drenata espressa in kg/cm², c' – coesione drenata espressa in kg/cm², phi' – angolo di attrito espresso in gradi (°), y – peso di volume naturale espresso in kg/mc, EEd – modulo edometrico è espresso in kg/cm²) ottenuti dall'interpretazione dei dati delle verticali di prova disponibili e, in assenza di correlazioni dirette (es: c' e phi' dei terreni coesivi) da dati di letteratura.

Denominazione	Cu (kg/cm ²)	C' (kg/cm ²)	Phi' (°)	y (kg/mc)	Modulo edometrico (kg/cm ²)
Riporto	-	-	40°	1800	-
Limi argillosi e argille limose	0,85	0,05	22°	1750-1800	57,4
Ghiaie e sabbie	-	-	41,1°	1800	-
Argille molto compatte (FAA)	1,92	0,25	28°	1900 - 2000	150

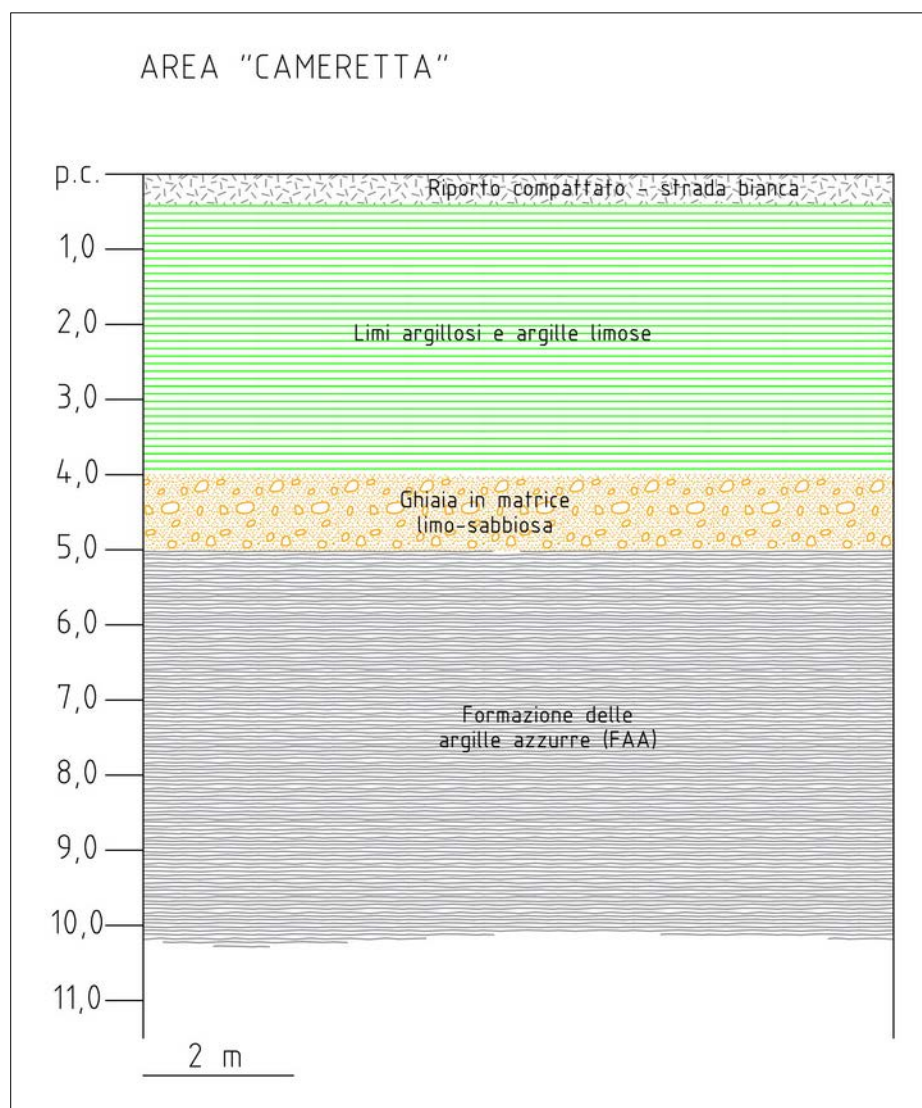


Figura 4: Successione stratigrafica in corrispondenza della prova DPSH1

In occasione delle indagini del 2023 non è stata riscontrata la presenza di falda.

9.2 MODELLO GEOLOGICO AREA 2

Correlando tra loro gli esiti delle indagini si è ricostruita la sezione geologica schematica trasversale al rilevato arginale rappresentata sulla Tavola 7.

Come si vede nel primo sottosuolo dell'area si rinvenivano prevalenti limi argillosi, da molli (in corrispondenza del rilevato arginale attuale) a compatti (al piede dell'argine stesso), cui fanno seguito, un sottile orizzonte di argille limose e sabbiose. La successione termina con argille compatte o estremamente compatte appartenenti alla formazione delle argille

azzurre prima alterate e poi integre.

Sulla seguente tabella vengono sinteticamente riassunti i valori nominali dei principali parametri meccanici che è possibile attribuire ai vari livelli di terreno attraversati (cu – coesione non drenata espressa in kg/cmq, c' – coesione drenata espressa in kg/cmq, phi' – angolo di attrito espresso in gradi (°), y – peso di volume naturale espresso in kg/mc, EEd – modulo edometrico è espresso in kg/cmq) ottenuti dall'interpretazione dei dati delle verticali di prova disponibili e, in assenza di correlazioni dirette (es: c' e phi' dei terreni coesivi) da dati di letteratura.

Denominazione	Cu (kg/cmq)	C' (kg/cmq)	Phi' (°)	y (kg/mc)	Modulo edometrico (kg/cmq)
Riporto	-	-	30-34	1700	-
Limi argillosi da molli a compatti	0,4 - 0,5 (argine) 1,5 (piede)	0,05	19,5°	1750 - 1800	50
Argille limose e sabbiose	1,2	0,05	20°-22°	1750 - 1800	75
Argille molto compatte (FAA)	1,92	0,25	28°	1900 - 2000	150

In occasione delle indagini del 2023 non è stata riscontrata la presenza di falda.

Anche nel corso delle indagini eseguite nel 2009 in corrispondenza della sommità arginale non era stata individuata (misurata) la falda freatica tuttavia i fori di prova si erano chiusi rispettivamente a 5,7 (CPT1-2009) e 4,5 (CPT2-2009) metri dal p.c. Questo lascia ipotizzare che, almeno localmente, possa essere presente una falda connessa al livello idrico all'interno dell'invaso.

10 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

Il territorio del Comune di Meldola è riconosciuto sismico di II categoria fino dal 1983 ed è stato riconfermato sismico e classificato in Zona 2 dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20 marzo 2003 (OPCM 3274/2003 e s.m.i.). In tale occasione al territorio comunale era stata associata un'accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (di progetto) pari a 0,25g.

Con le NTC 2008 per la definizione dell'azione sismica si è passati da un approccio "zona dipendente" (dove ogni zona [e quindi ogni Comune] era caratterizzato da un'accelerazione predefinita) ad un approccio "sito dipendente" in cui l'accelerazione di riferimento "propria" del sito viene individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera.

Oggi, con le NTC 2018, per la definizione delle azioni sismiche di sito ci si dovrebbe in generale riferire a specifiche analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) definendo, sulla base dei dati accelerometrici di terremoti reali adeguatamente selezionati, dapprima l'azione sismica al *bedrock* (suolo rigido di tipo A) e modificando poi il segnale in ragione delle condizioni geologiche e topografiche del sito per determinare l'entità dell'azione sismica in superficie.

Questo è possibile utilizzando opportuni *software* di modellazione (in genere 1D o 2D) del segnale sismico.

Qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni presenti in un dato sito siano tuttavia chiaramente riconducibili a specifiche categorie (definite nella Tab. 3.2.II delle NTC 2018 sotto riportata) si potrà fare riferimento a un approccio semplificato che, partendo da un'azione sismica di base definita su tutto il territorio nazionale da studi del INGV, comunque considera sia l'amplificazione stratigrafica che quella topografica del sito.

L'amplificazione stratigrafica si ricava in base alla classificazione del terreno di fondazione in funzione della velocità (velocità equivalente) di propagazione delle onde di taglio ($V_{s,eq}$) all'interno dell'orizzonte di terreno sovrastante al *bedrock* sismico (orizzonte rigido caratterizzato da una velocità di propagazione delle onde di taglio superiore agli 800 m/s) calcolata mediante la formula:

$$V_{s,eq} = H / \sum_{i=1,N} (h_i / V_{s,i}) \quad (1)$$

dove:

- h_i = spessore dello strato i -esimo in metri
- $V_{s,i}$ = velocità dell'onda di taglio i -esima
- N = numero di strati
- H = profondità del substrato "sismico", cioè quella formazione o terreno, molto rigido, caratterizzato da $V_s > 800$ m/sec.

Se il substrato (*bedrock sismico*) è più profondo di 30 metri per la classificazione sismica del terreno si utilizza la "vecchia" V_{s30} (ponendo $H = 30$ m).

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Le condizioni topografiche possono essere tenute in conto sulla base di quanto riportato sulla Tabella 3.2.III. delle NTC 2018:

Tabella 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $> 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

La norma impone inoltre di valutare gli eventuali effetti cosismici che possono avere

influenza sul progetto.

10.1 INDAGINE GEOFISICA

Il profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo dell'ambito è stato determinato attraverso l'elaborazione dei dati desunti da una misura di rumore ambientale a stazione singola (vedi elaborato "Indagine sismica passiva a stazione singola HVSR" in allegato) con tromografo sismico (TROMINO) eseguita in occasione del presente studio nel punto indicato sulla Tavola 6.

La prova ha consentito di ricostruire il seguente profilo di velocità :

Da m:	A m:	Velocità onde S (m/sec)
0	0,6	85
0,6	1,2	130
1,2	12,2	180
12,2	35,2	310
35,2	80,2	450
Inf.		520

Da tali valori, tramite l'equazione (1) è possibile ricavare i seguenti valori di velocità equivalente delle onde di taglio per differenti profondità di imposta delle opere fondali:

Profondità di calcolo da metri a metri	Vs30 (m/s)
0,0 – 30,0	230
1,0 – 31,0	243
2,0 – 32,0	249
3,0 – 33,0	254

10.2 CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO DI FONDAZIONE

In base alle velocità equivalenti delle onde di taglio di cui al paragrafo precedente il terreno di fondazione potrà essere classificato come di tipo:

C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
---	--

10.3 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

L'area di intervento è debolmente inclinata pertanto le condizioni topografiche saranno:

T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $\leq 15^\circ$
----	--

10.4 RISCHIO DI LIQUEFAZIONE CICLICA

Data la natura coesiva dei terreni presenti e l'assenza di falda stabile si escludono fenomeni di liquefazione ciclica in condizioni sismiche.

11 CONCLUSIONI

Nella presente relazione si sono analizzate le condizioni geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche che caratterizzano due aree, individuabili nella porzione occidentale del Comune di Meldola, a monte della S.P. del Bidente, in occasione di interventi di riassetto della rete locale di smaltimento delle acque meteoriche, che avviene attraverso il "Rio Cavallo", un piccolo corso d'acqua a regime torrentizio in parte a cielo aperto ed in parte tombinato al di sotto delle aree urbanizzate.

Gli interventi previsti in due aree distinte comporteranno il ripristino di un tratto di tombinamento ancora lesionato in conseguenza degli eventi meteorici del maggio 2023 e alcuni lavori di miglioria sull'argine esistente lungo il "Rio Cavallo" per potenziare l'effetto di laminazione dell'invaso oggi esistente.

Per quanto concerne l'area più prossima alla S.P. del Bidente (AREA 1) dove è prevista la sistemazione di un tratto tombinato del fosso, l'indagine geologica ha messo in evidenza che i terreni presenti nel primo sottosuolo, al di sotto di un orizzonte superficiale di materiale di riporto, sono di natura prevalentemente limoso-argillosa, generalmente compatti o estremamente compatti. In occasione delle indagini non è stata rilevata la presenza di falda idrica.

Gli interventi di ripristino della condotta prevedono scavi, localmente piuttosto "importanti", all'interno di un'area intensamente antropizzata caratterizzata dalla presenza di corti private esistenti, recinzioni, strade private e alcuni fabbricati.

In tale contesto è evidente che tutte le operazioni di scavo dovranno essere effettuate con particolare attenzione adottando, qualora necessario, tutti gli accorgimenti necessari (ivi comprese eventuali opere provvisorie) volte a tutelare le strutture esistenti.

Per quanto concerne l'area contermina all'argine dell'invaso sul "Rio Cavallo" (AREA 2) nella quale sono previsti lavori sul rilevato arginale accompagnati dalla realizzazione di uno scarico di fondo, che di fatto trasformerà l'invaso in un vero e proprio dispositivo di laminazione, l'indagine geologica ha messo in evidenza che i terreni presenti nel primo sottosuolo, al di sotto di un sottile orizzonte superficiale di suolo agrario / materiale di riporto, sono di natura prevalentemente limoso-argillosa.

I terreni sono prevalentemente molli in corrispondenza dell'argine (CPT2-2009) mentre sono compatti o estremamente compatti al piede dello stesso (CPT1-2023). Tali terreni sono inoltre piuttosto plastici ($I_p = 20\%$) e potrebbero risentire fortemente delle variazioni del contenuto d'acqua. In occasione delle indagini del 2023, entro il foro di prova, non è stata rilevata la presenza di falda freatica. Nel corso delle indagini del 2009, effettuate sulla sommità arginale, i fori di prova si erano chiusi rispettivamente a 5,7 (CPT1-2009) e 4,5 (CPT2-2009) metri dal p.c. e questo lascia ipotizzare che, almeno localmente, possa essere stata presente una falda connessa al livello idrico all'interno dell'invaso.

I lavori che comportano movimentazione di terreno dovranno essere effettuati obbligatoriamente in periodo stagionale favorevole. I riporti di terreno dovranno avvenire, previa adeguata preparazione del piano di ammorsamento, posando il materiale per piccoli strati successivi e compattando adeguatamente con idoneo mezzo d'opera.

Dal punto di vista geomorfologico le aree di intervento sono in generale stabili.

Dal punto di vista sismico non vi sono problematiche di liquefazione ciclica. Il terreno può essere classificato come di tipo C: *"Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s."* La categoria topografica può essere assunta pari a T1.

A parte quanto detto sopra, nel corso delle analisi, non sono emersi elementi osativi alla realizzazione di un intervento come quello proposto che quindi risulta, dal punto di vista geologico, idrogeologico, geomorfologico e sismico, sicuramente fattibile.

Qualora, durante l'esecuzione delle opere emergessero situazioni particolari che non è stato possibile prevedere nel corso di questa indagine prego di essere contattato per concordare, anche in seguito a sopralluogo e eventuali approfondimenti, gli interventi necessari al prosieguo dei lavori.



**ALLEGATO:
TAVOLE CARTOGRAFICHE E SEZIONI**

r_emi.ro.Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

TAVOLA 1: INQUADRAMENTO COROGRAFICO 1:25.000 -
TAVOLETTA 255 NO - FORLIMPOPOLI

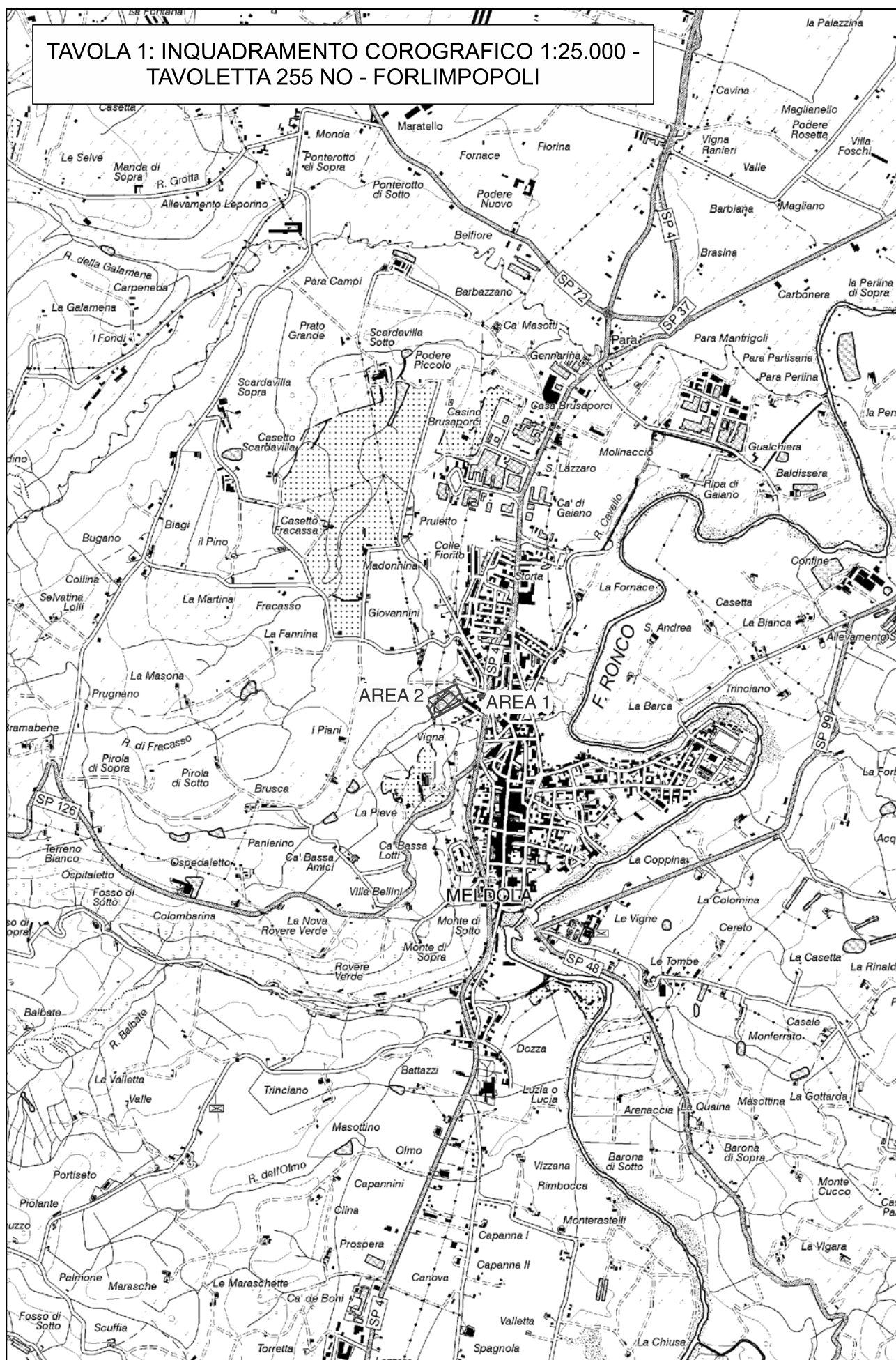


TAVOLA 2: INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO 1:5.000 -
ELEMENTO255051 - MELDOLA NORD



TAVOLA 3: INQUADRAMENTO SU PLANIMETRIA CATASTALE DEL
COMUNE DI MELDOLA - FOGLIO 9 - SCALA 1:2000.

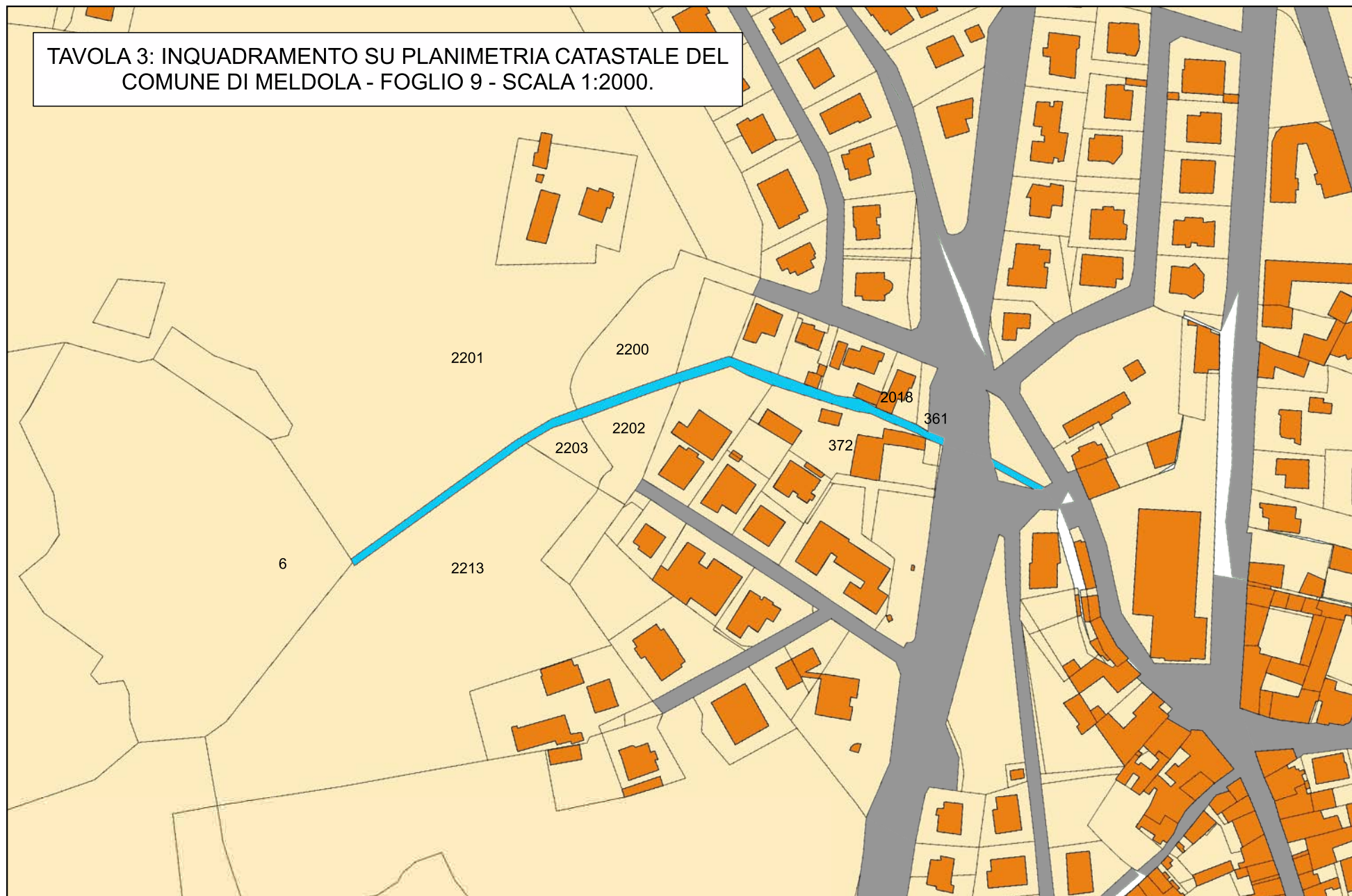


TAVOLA 4: PERIMETRAZIONE DELLE AREE A RISCHIO IDROGEOLOGICO -
VARIANTE DI COORDINAMENTO TRA IL PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO
ALLUVIONI E IL PIANO STRALCIO PER IL RISCHIO IDROGEOLOGICO - SCALA
1:25.000 - INGRANDIMENTO IN SCALA 1:5000

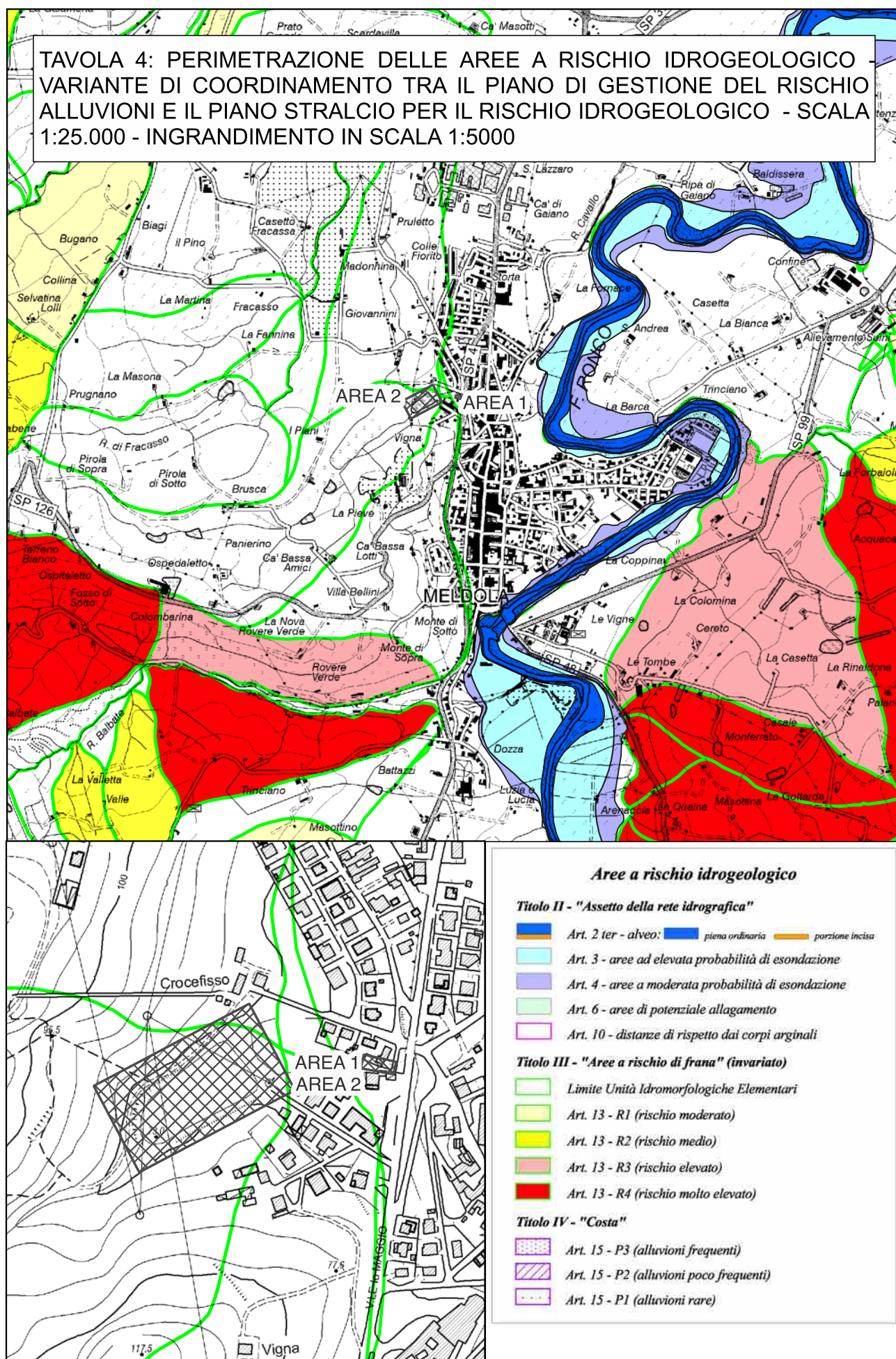


TAVOLA 5: CARTA GEOLOGICA PUBBLICATA DALLA
REGIONE EMILIA-ROMAGNA - SCALA 1:5.000.

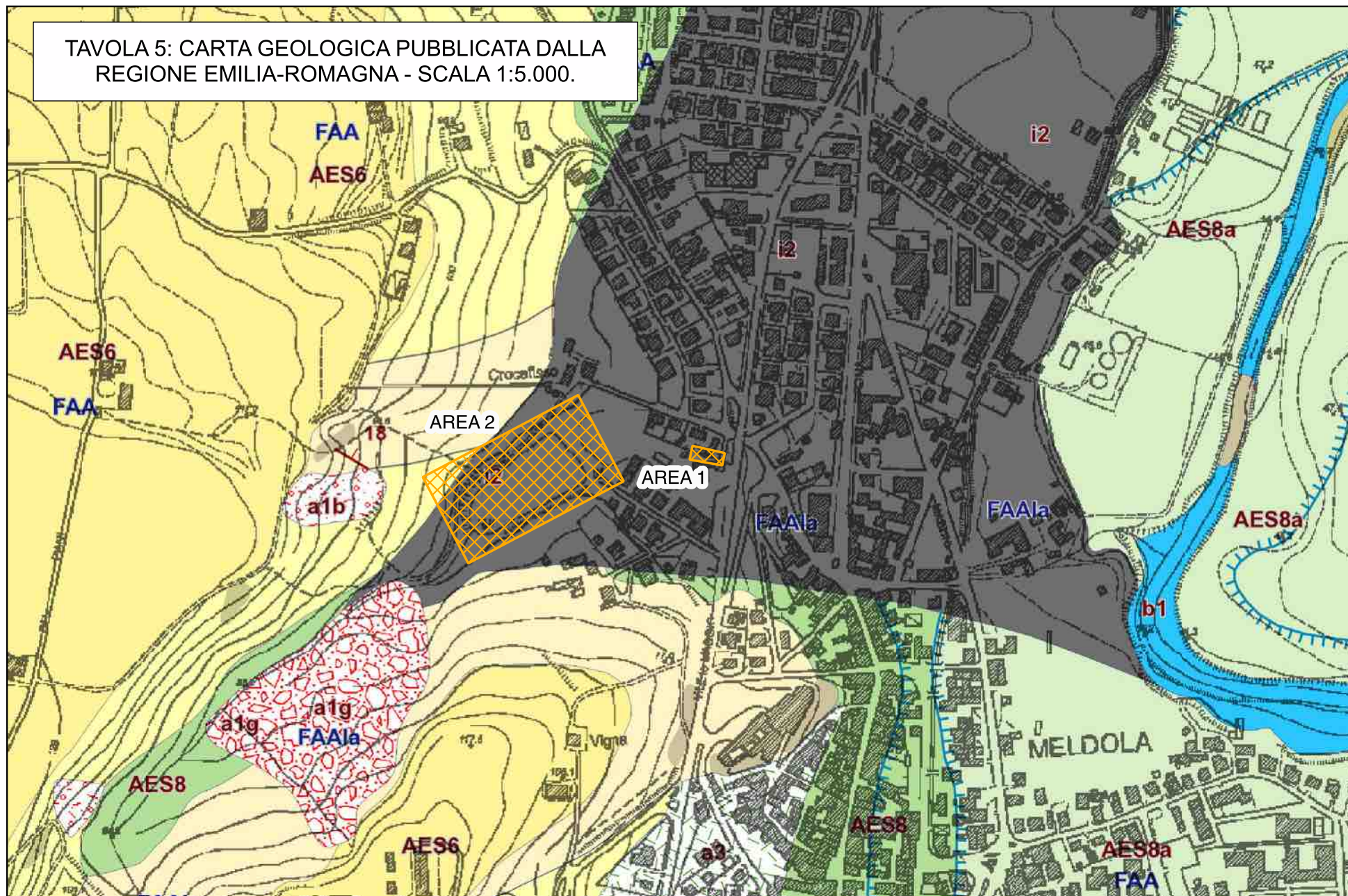
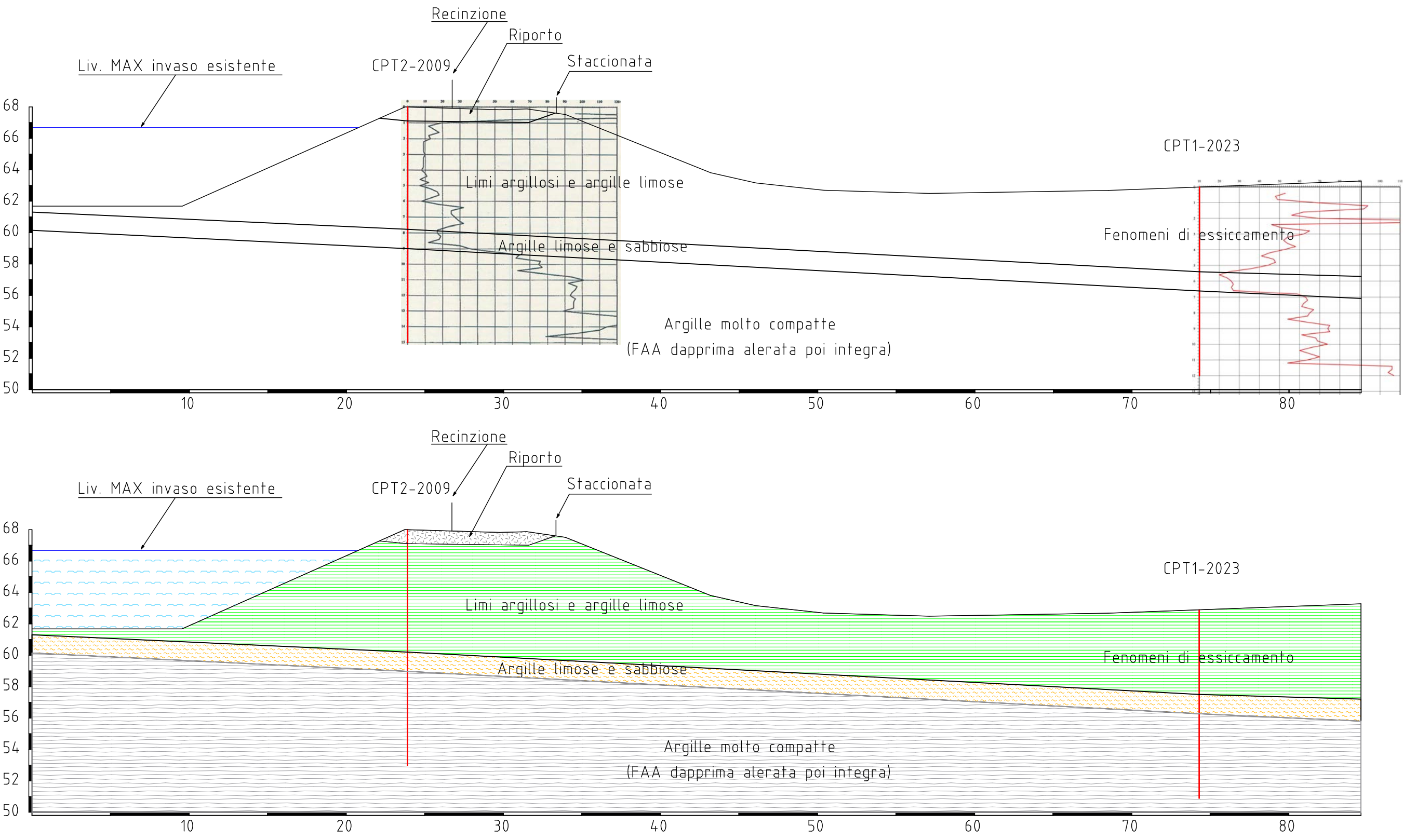


TAVOLA 6: ORTOFOTO EMILIA-ROMAGNA (2020) - SCALA 1:1000 CON INDICAZIONE DEI PUNTI DI ESECUZIONE DELLE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE ESEGUITE E DISPONIBILI E TRACCIA DELLA SEZIONE



TAVOLA 7 - SEZIONE GEOLOGICA SCHEMATICA CON PROIETTATE LE PROVE CPT E CON RAPPRESENTAZIONE DELLA STRATIGRAFIA - SCALA GRAFICA





**ALLEGATO:
PROVE PENETROMETRICHE
ESEGUITE E DISPONIBILI**

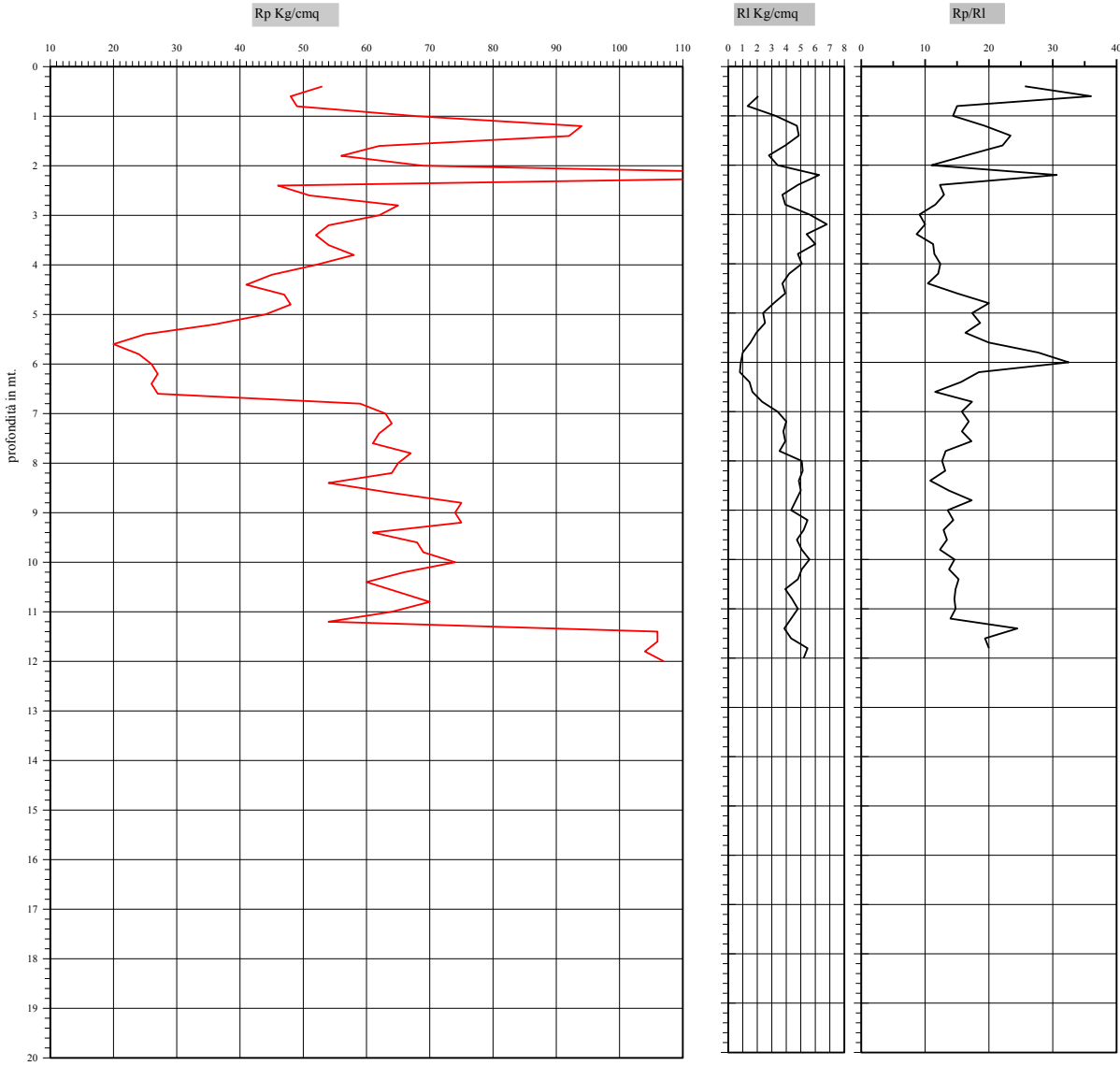
r_emi.ro.Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

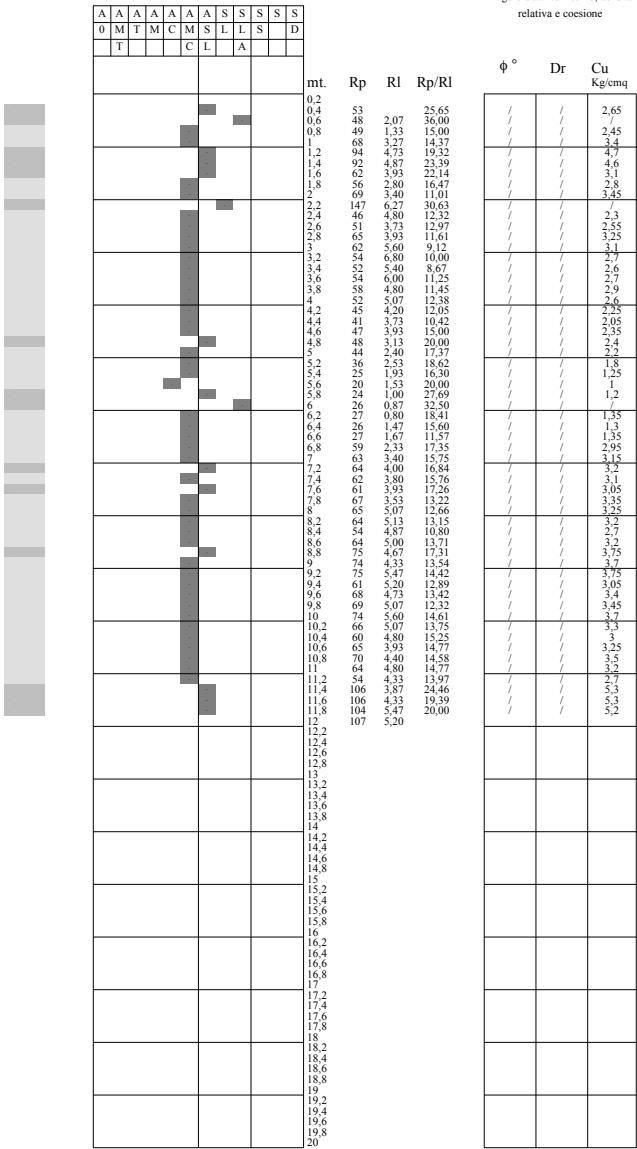
Prova Penetrometrica Statica

Prova n.: CPT 1
Cantiere: Meldola (FC), via Puccini
Data: Ottobre 2023

Quota inizio: piano campagna
Liv.falda: assente
Note:



Classificazione orientativa dei terreni (Schmertmann - 1978)



Legenda:
AO argilla organica e terreni misti; AMT argilla molto tenera;
AT argilla tenera; AM argilla media; AC argilla compatta
AMC argilla molto compatta; ASL argilla sabbiosa limosa;
SL sabbia e limo; SLA sabbia limoso argillosa
SS sabbia sciolta; S sabbia; SD sabbia densa



r_eniro.Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

Prove Penetrometriche Dinamiche
Meldola (FC), via Puccini

Prof.	P1	
mt.	n.colpi	Rd
mt. 0		
0.2	10	108
0.4	7	76
0.6	3	33
0.8	3	33
1	3	30
1.2	3	30
1.4	3	30
1.6	4	40
1.8	2	20
2	2	18
2.2	3	28
2.4	2	18
2.6	2	18
2.8	2	18
3	3	26
3.2	4	34
3.4	3	26
3.6	3	26
3.8	3	26
4	4	32
4.2	8	64
4.4	6	48
4.6	9	72
4.8	10	80
5	10	75
5.2	5	38
5.4	5	38
5.6	7	53
5.8	5	38
6	6	42
6.2	6	42
6.4	7	50
6.6	6	42
6.8	8	57
7	7	47
7.2	9	60
7.4	9	60
7.6	11	74
7.8	11	74
8	12	76
8.2	10	63
8.4	9	57
8.6	9	57
8.8	10	63
9	10	60
9.2	10	60
9.4	11	66
9.6	12	72
9.8	12	72
10	12	69
10.2	14	80
10.4		
10.6		
10.8		
11		
11.2		
11.4		
11.6		
11.8		
12		
12.2		
12.4		
12.6		
12.8		
13		
13.2		
13.4		
13.6		
13.8		
14		



r_eniro.Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA PESANTE

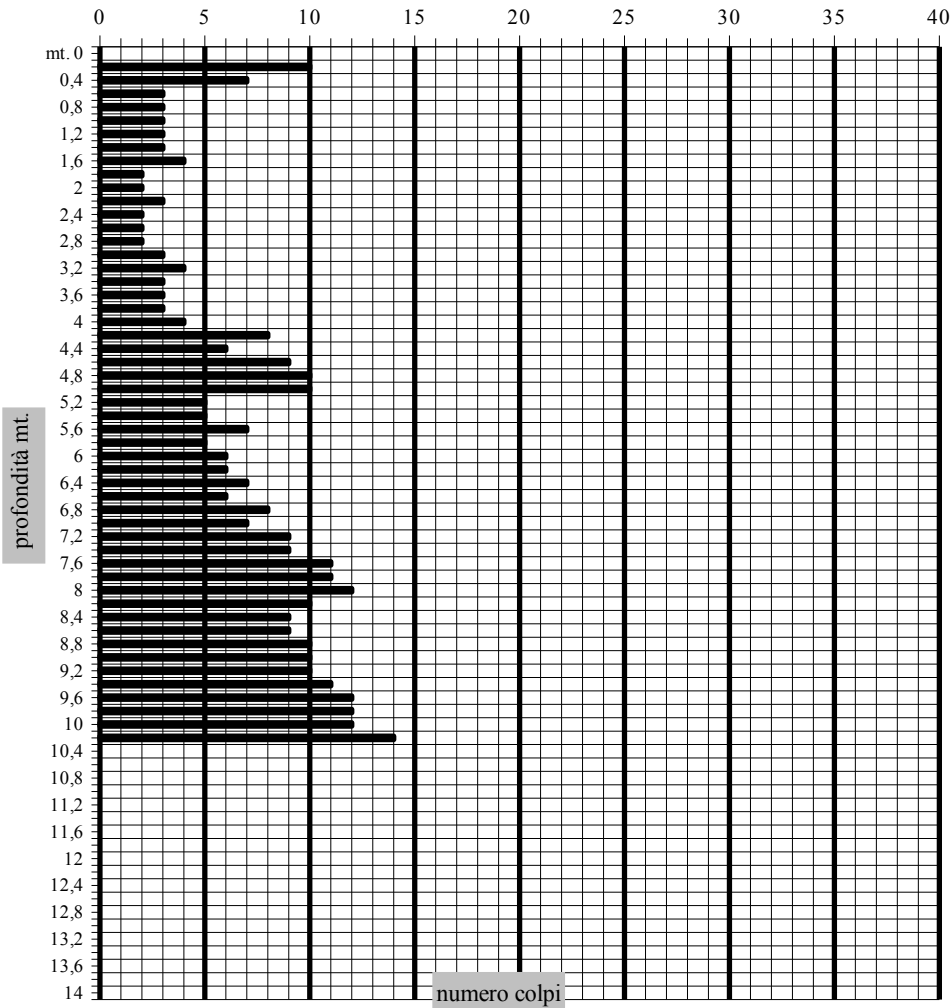
DPSH 1

cantiere: Meldola (FC), via Puccini
quota inizio: piano campagna
prof. falda: assente

data: Ottobre 2023



Penetrometro dinamico pesante Pagani tipo "Emilia" :
Peso maglio: 63.50 Kg. Peso aste: 6.20Kg/ml.
Caduta maglio: 75cm.
Sezione punta: 20cmq.



Prova Penetrometrica Statica

Prova n.: CPT1

Cantiere: Meldola (FC) - via Bellini

Data: Settembre 2009

Quota inizio: piano campagna

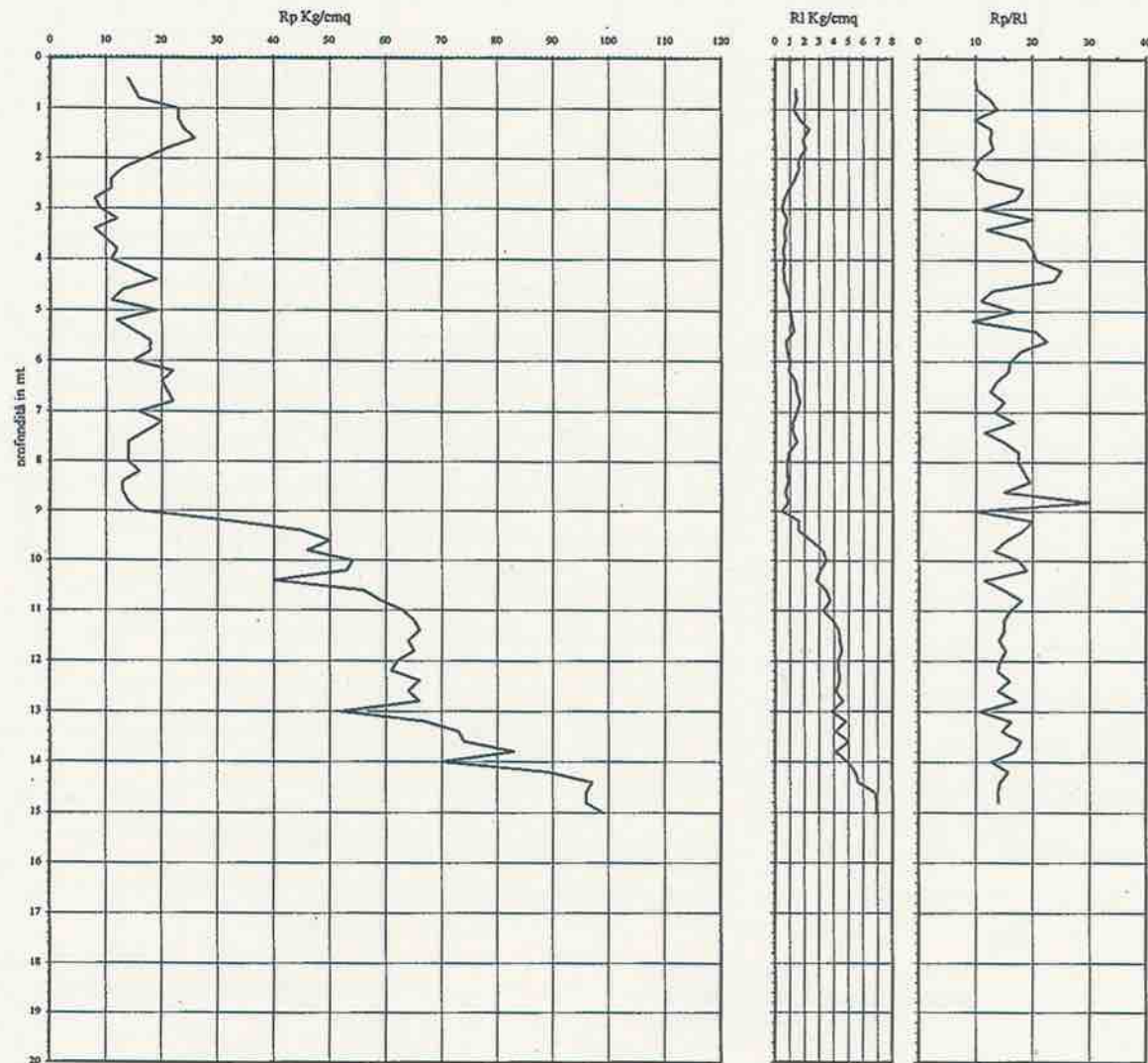
Liv.falda: assente (foro chiuso -5,70 mt.)

Note:

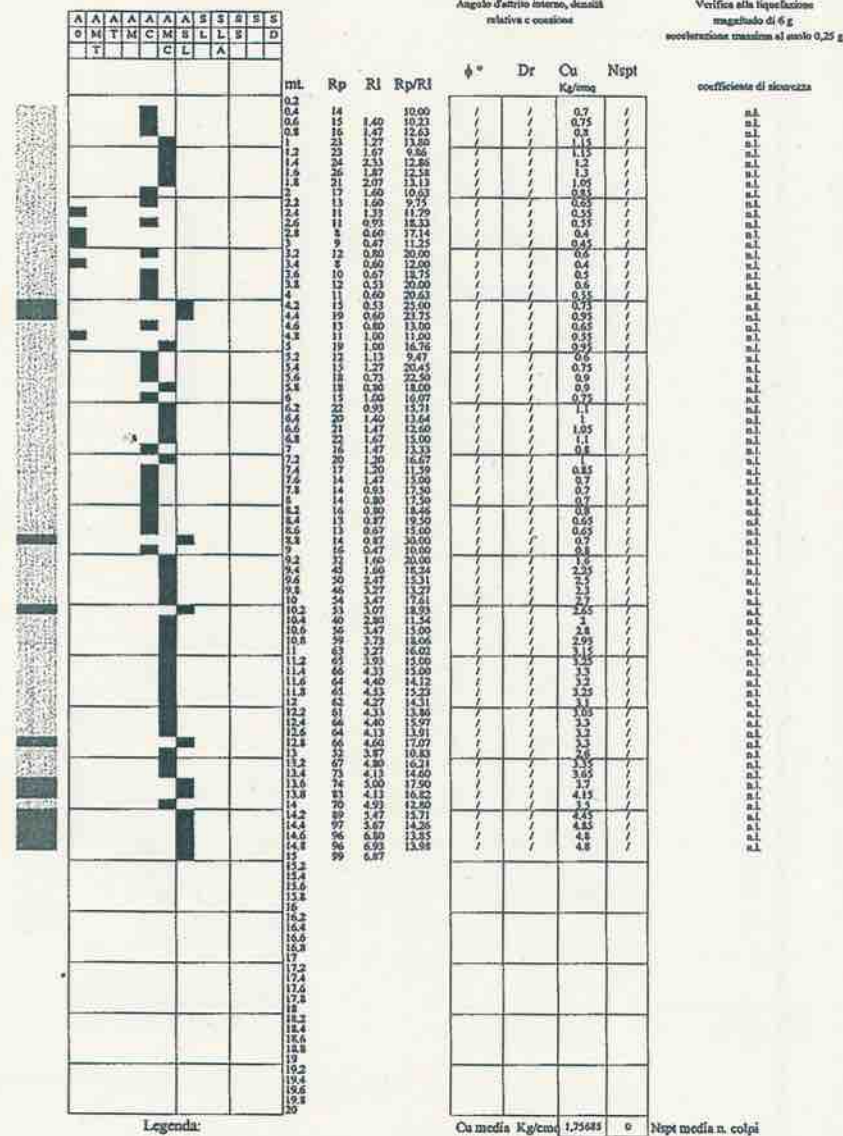
Classificazione orientativa dei terreni (Schnertmann - 1978)

Angolo d'attrito interno, decimili
relativa e coesione

Verifica alla liquefazione
magistrale di 6 g
sovraccarico massimo al suolo 0,25 g



Caratteristiche strumento: penetrometro statico semovente, 200kN spinta
Punta meccanica tipo Begmann - manicotto laterale superficie 150 cmq



Legenda:

Cu media Kg/cm² 1,75688 0 Nsp media n. colpi

argilla
sabbia limosa argillosa
sabbia
AO argilla organica e terreni misti; AMT argilla molto tenera;
AT argilla tenera; AM argilla media; AC argilla compatta
AMC argilla molto compatta; ASL argilla sabbiosa limosa;
SL sabbia e limo; SLA sabbia limosa argillosa
SS sabbia sciolta; S sabbia; SD sabbia densa

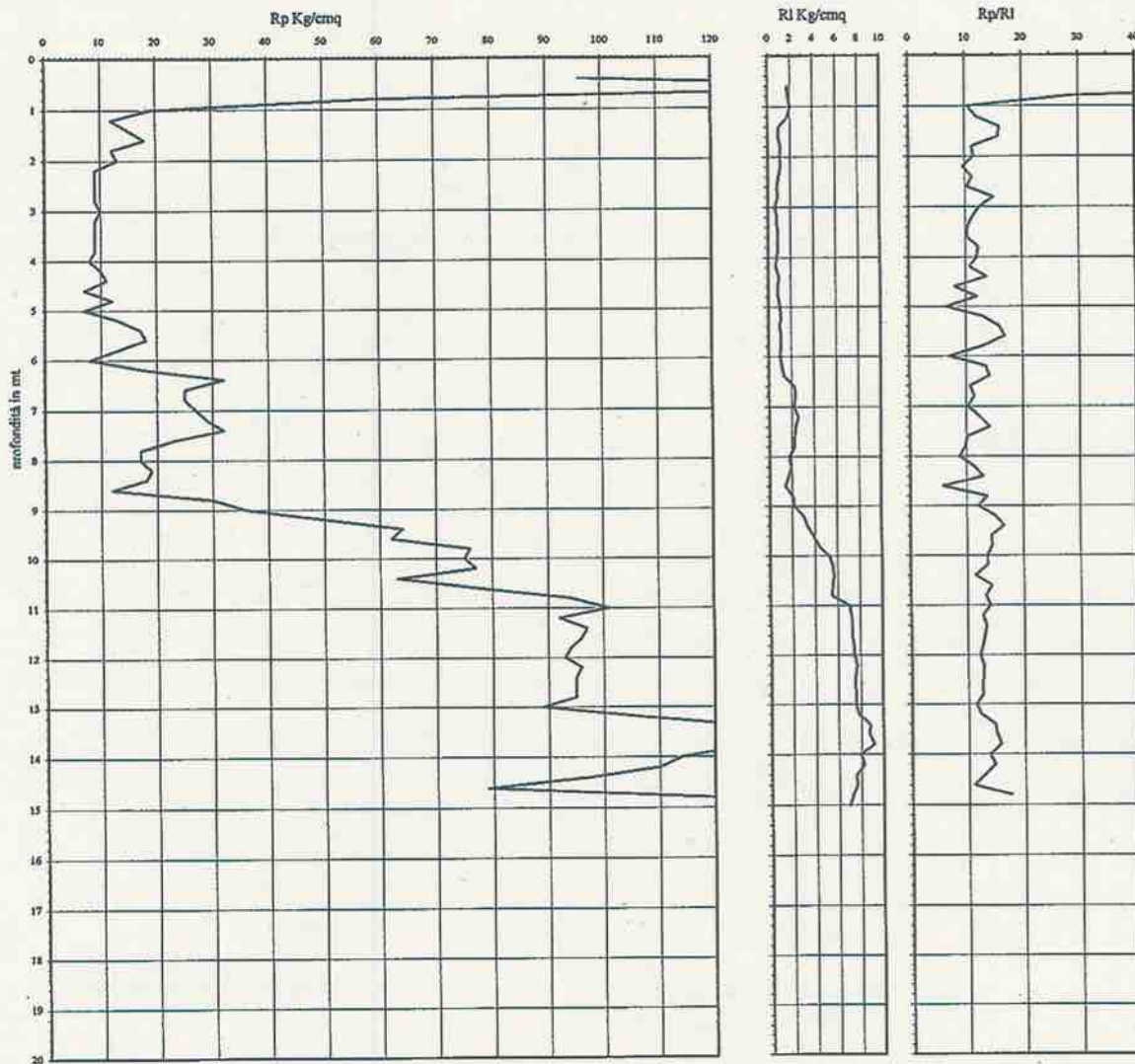
n.l. non liquefacibile

Copia conforme dell'originale sottoscritto da
 L. IANO

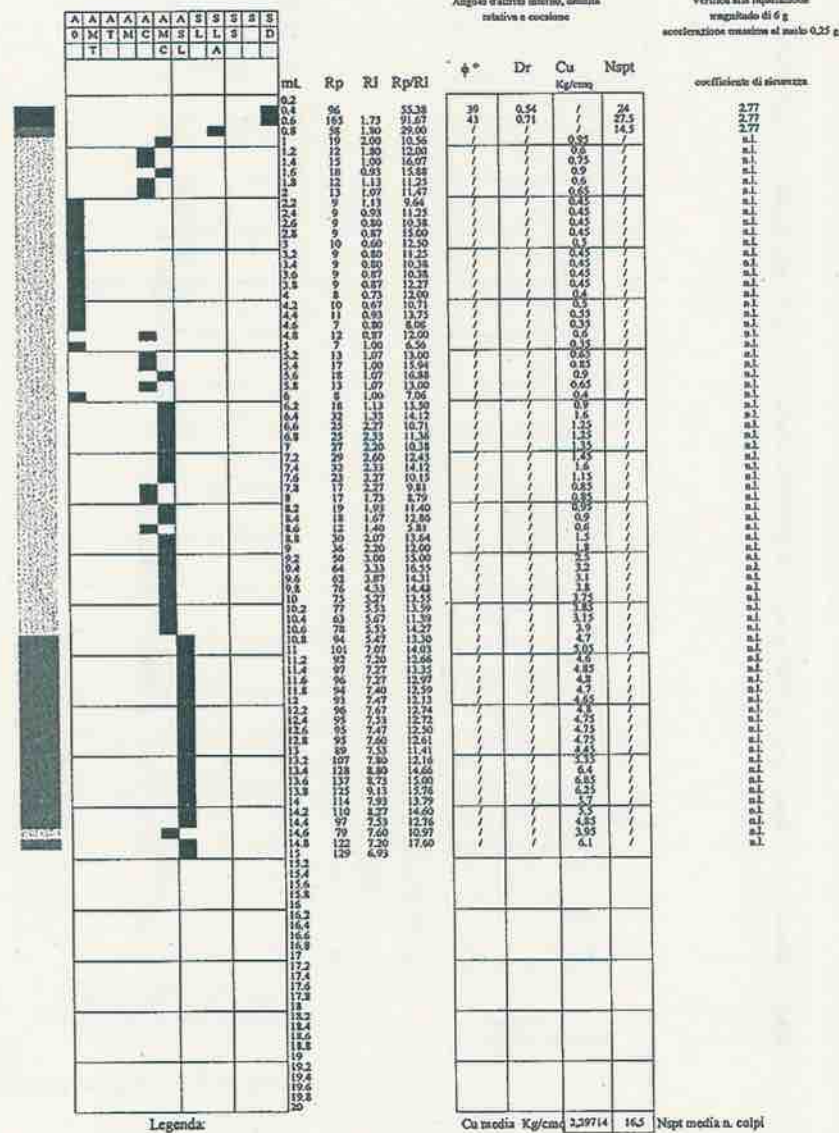
Prova n.: CPT2
Cantiere: Meldola (FC) - via Bellini
Data: Settembre 2009

Quota inizio: piano campagna
Liv.falda: assente (foro chiuso -4,50 mt.)
Note: piezometro

Classificazione orientativa dei terreni (Schmertmann - 1978)



Caratteristiche strumento: penetrometro statico omovente, 200kN spinta
Punta meccanica tipo Begmann - manicotto laterale superficie 150 cmq



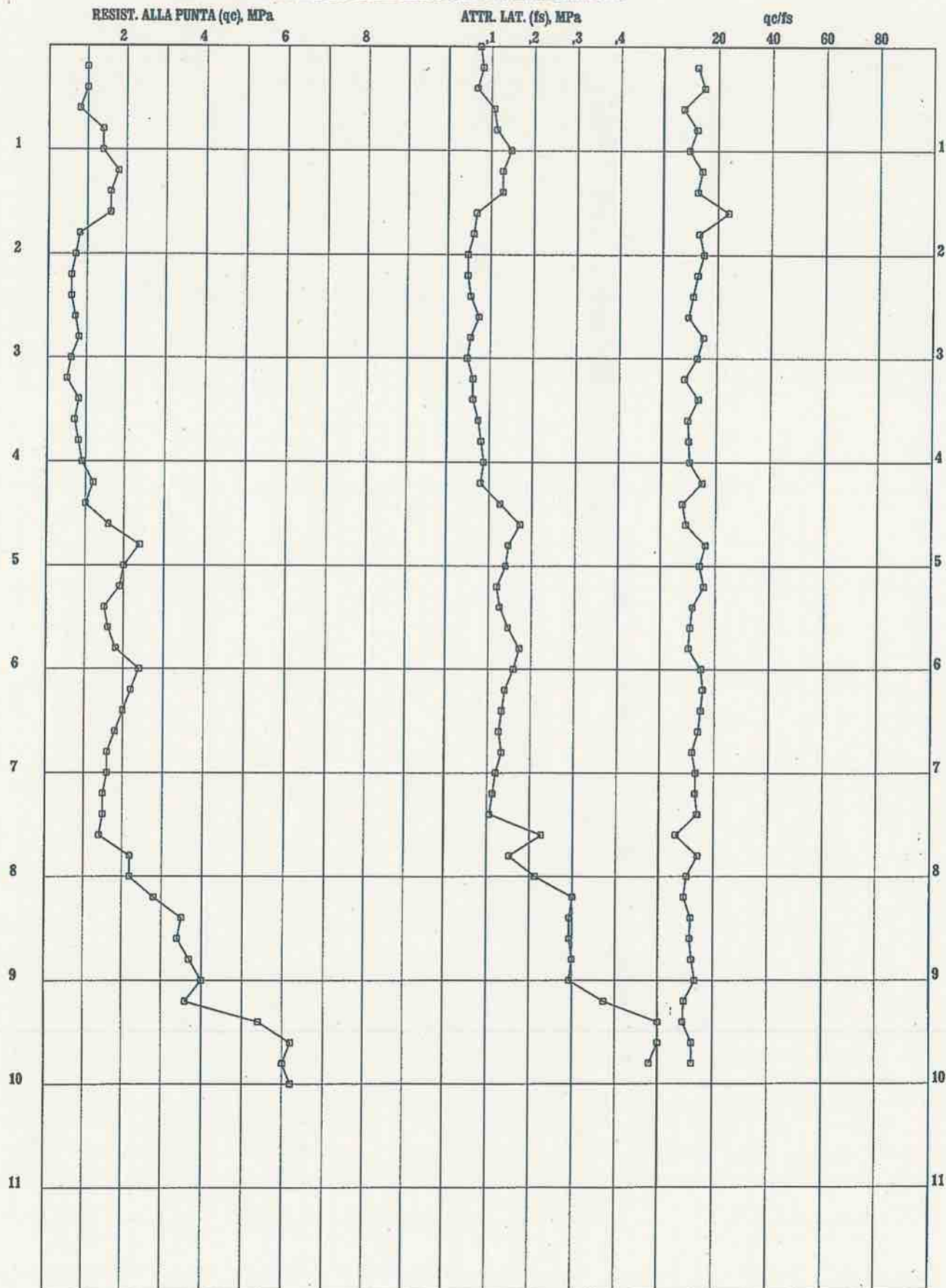
AO argilla organica e terreni misti; AMT argilla molto tenera;
AT argilla tenera; AM argilla media; AC argilla compatta
AMC argilla molto compatta; ASL argilla sabbiosa limosa;
SL sabbia e limo; SLA sabbia limoso argillosa
SS sabbia sciolta; S sabbia; SD sabbia densa

n.l. non liquefacibile

COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI
LOCALITA': MELDOLA

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI
CANTIERE: Via Bellini

PROVA PENETROMETRICA STATICA N. 3



DATA: 21/8/08

FIRMA:

COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI

LOCALITA': MELDOLA

CANTIERE: Via Bellini

PROVA STATICA N. 4

a=Sabbie e rocce carbonatiche

g=Argille sabbiose e limose

b=Sabbia densa o cementata

h=Argilla inorganica

c=Sabbia

i=Argille organiche e terreni misti

d=Sabbia sciolta

e=Limi e sabbie

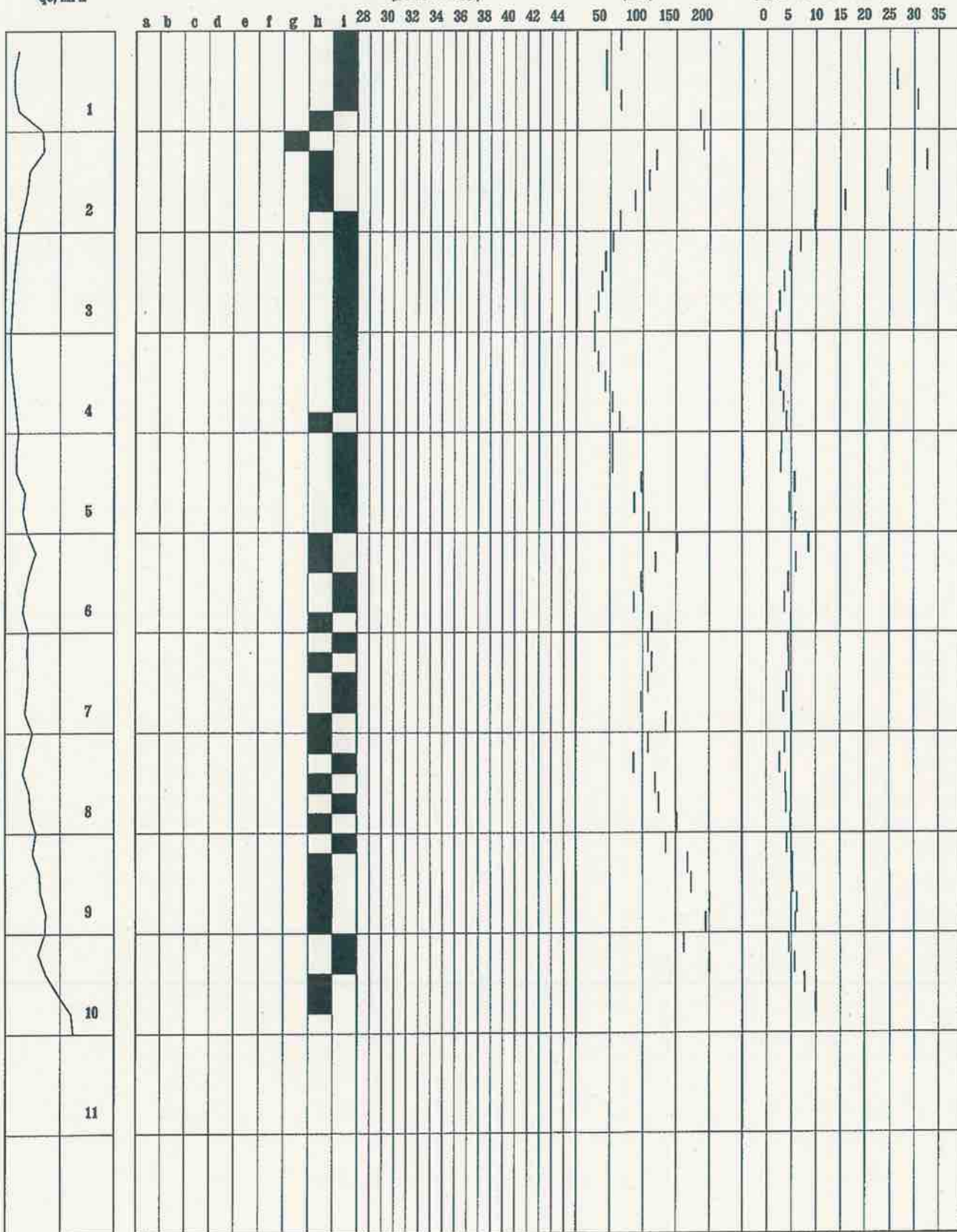
f=Sabbie argillose e limi

qc, MPa

ANGOLO DI ATTRITO
(gradi sessag.)

COESIONE
(kPa)

OCR
(rapp. sovraconsolid.)



DATA: 21/8/08

FIRMA:

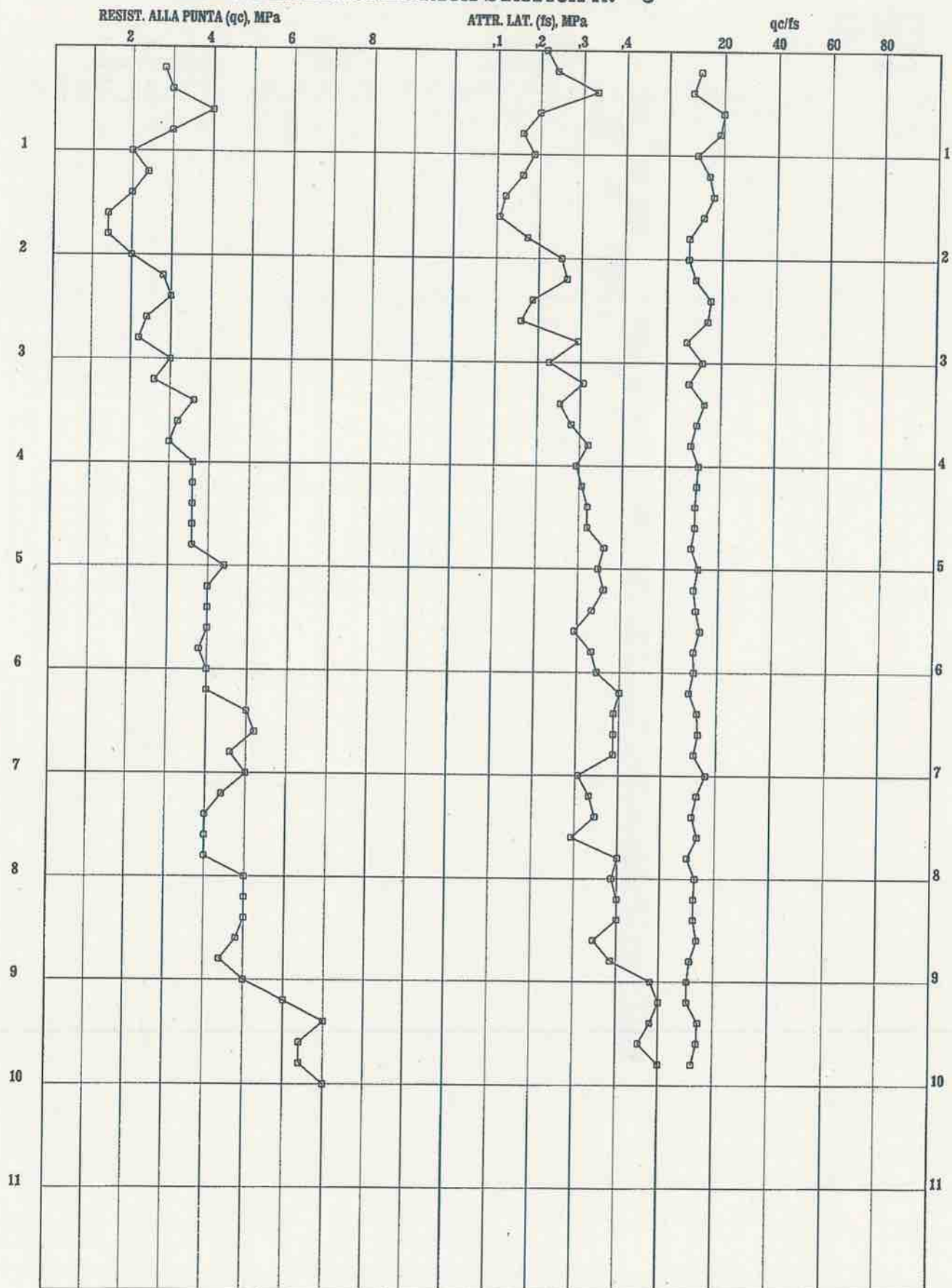
COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI

LOCALITA': MELDOLA

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI

CANTIERE: Via Bellini

PROVA PENETROMETRICA STATICA N. 5



DATA: 21/8/08

FIRMA:

COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI

LOCALITA': MELDOLA

CANTIERE: Via Bellini

a=Sabbie e rocce carbonatiche

g=Argille sabbiose e limose

b=Sabbia densa o cementata

h=Argilla inorganica

c=Sabbia

i=Argille organiche e terreni misti

d=Sabbia sciolta

e=Limf e sabbie

f=Sabbie argillose e limi

qc, MPa

PROVA STATICA N. 5

ANGOLO DI ATTRITO
(gradi sessag.)

COESIONE
(kPa)

OCR
(rapp. sovraconsolid.)

a b c d e f g h i 28 30 32 34 36 38 40 42 44 50 100 150 200 0 5 10 15 20 25 30 35

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	28	30	32	34	36	38	40	42	44	50	100	150	200	0	5	10	15	20	25	30	35
1																														
2																														
3																														
4																														
5																														
6																														
7																														
8																														
9																														
10																														
11																														

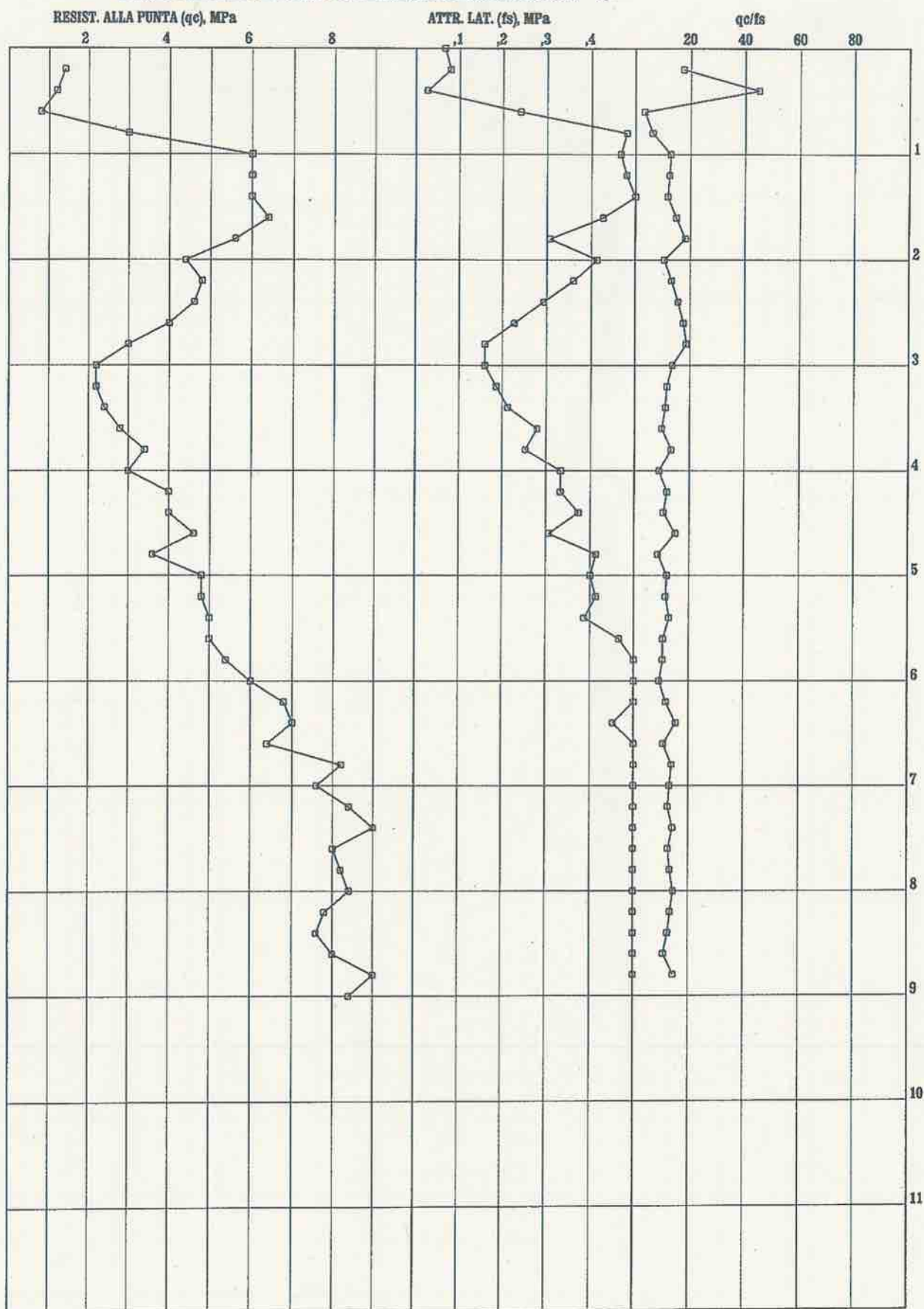
DATA: 21/8/08

FIRMA:

COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI
LOCALITA': MELDOLA

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI
CANTIERE: Via Bellini

PROVA PENETROMETRICA STATICA N. 6



DATA: 21/8/08

FIRMA:

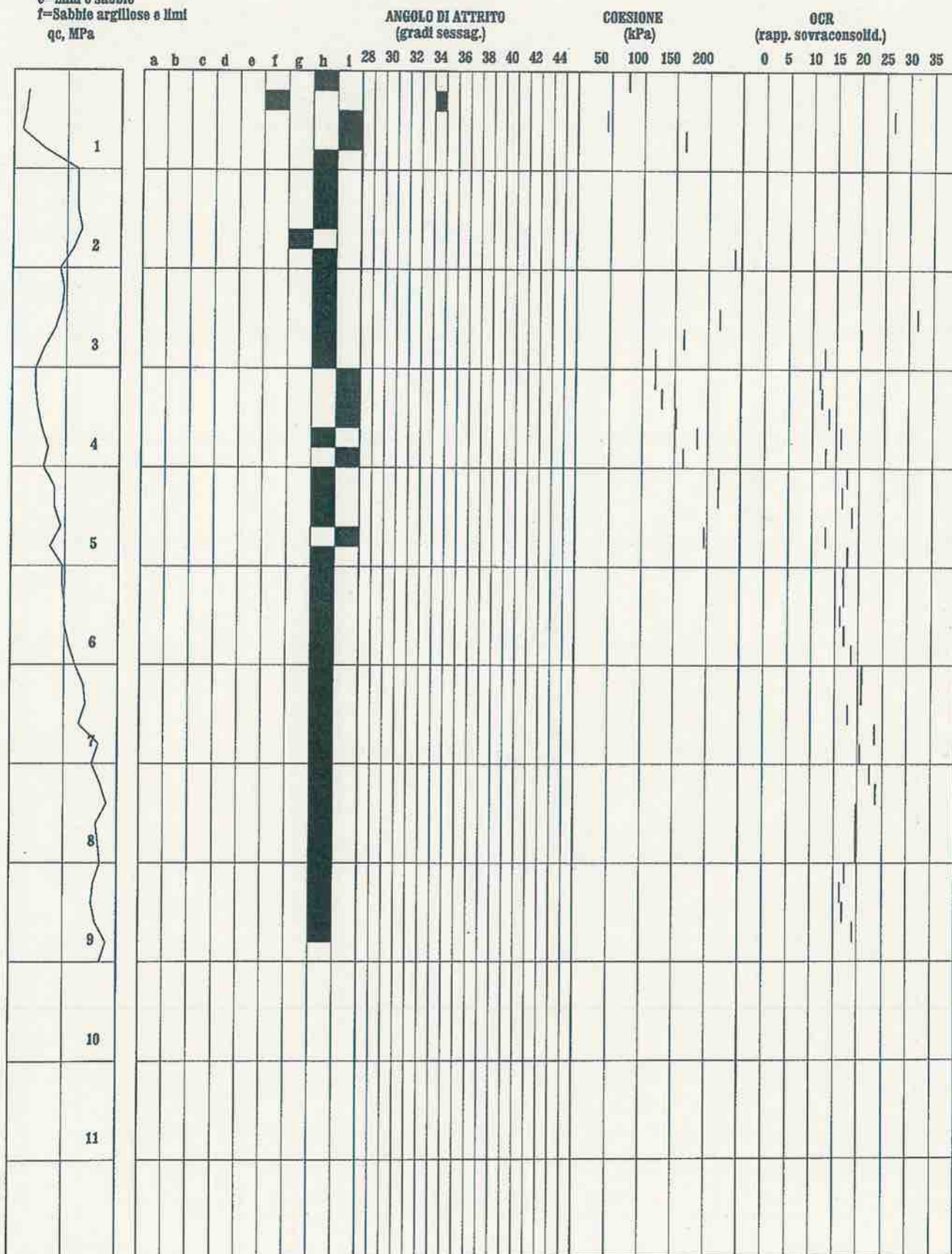
COMMITTENTE: SCHIAVI - MINGOZZI
LOCALITA': MELDOLA

DITTA ESECUTRICE: dott. PIER LUIGI AMADORI
CANTIERE: Via Bellini

a=Sabbie e rocce carbonatiche
b=Sabbia densa o cementata
c=Sabbia
d=Sabbia sciolta
e=Limi e sabbie
f=Sabbie argillose e limi
qc, MPa

g=Argille sabbiose e limose
h=Argilla inorganica
i=Argille organiche e terreni misti

PROVA STATICA N. 6



**ALLEGATO:
ANALISI DI LABORATORIO
GEOTECNICO**



r_etro. Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

Cantiere: Meldola (FC), via Puccini

Data: Ottobre 2023

Sondaggio n. : 1

Campione : 1

Profondità : 1,10÷1,50 mt.

Descrizione del campione : Limo argilloso di colore grigio verde chiaro

Stato del campione: disturbato

Caratteristiche fisico - meccaniche

caratteristiche generali				limiti di consistenza	
Contenuto in acqua	w	=	8 %	Limite di liquidità	Wl = 38 %
Peso di volume umido	y	=	" gr/cmc	Limite di plasticità	Wp = 18 %
Peso di volume secco	yd	=	" gr/cmc	Limite di ritiro	Ws = " %
Peso specifico	Gs	=	2,69 gr/cmc	Ritiro l.	R = " %
Indice dei vuoti	e	=	"	Indice di plasticità	Ip = 20 %
Grado di saturazione	s	=	" %	Indice di consistenza	Ic = 1,5

resistenza

Penetrometro tascabile	qu	=	" Kg/cm ²
Vane test	cu	=	" Kg/cm ²

granulometria	classificazione A.G.I.
ghiaia : " % sabbia : 13 % limo : 70 % argilla : 17 %	Limo argilloso debolmente sabbioso

prova di taglio in condizioni consolidate drenate C.D. su campione ricostruito

angolo di attrito	ϕ'	=	19,50°
coesione	c'	=	0,00 Kg/cm ²

Cantiere: Meldola (FC), via Puccini

Data: Ottobre 2023

Sondaggio n. : 1

Campione n. : 1

Profondità : 1,10÷1,50 mt.

Analisi granulometrica

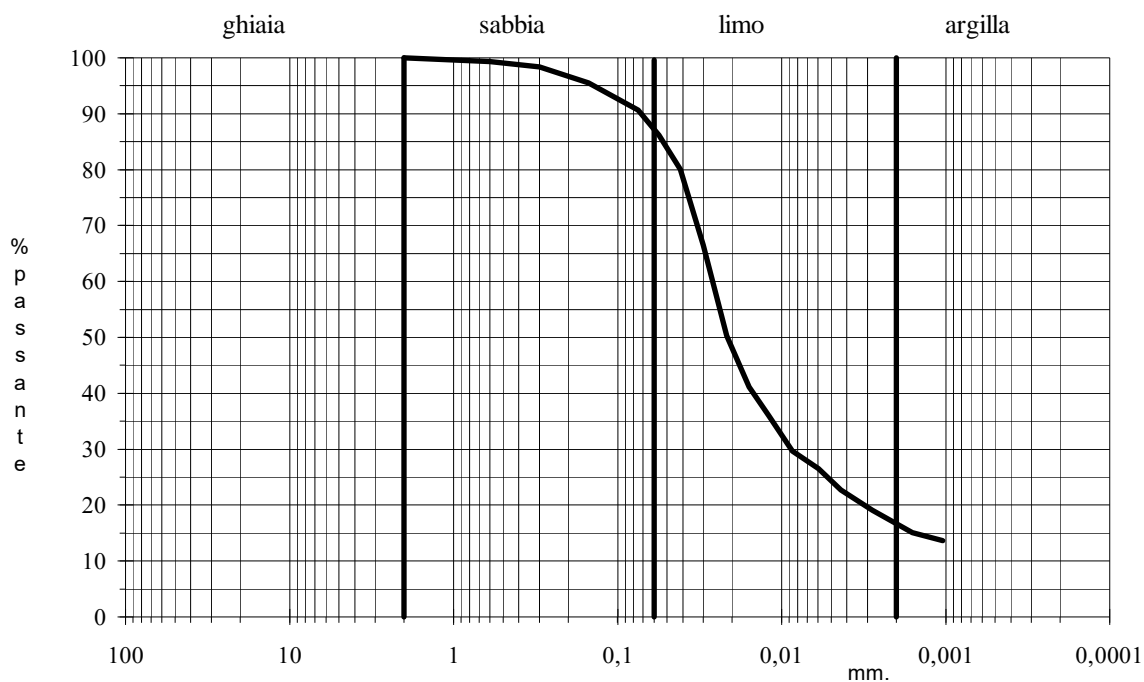
Metodo della prova: per setacciatura e sedimentazione

Stato del campione: indisturbato

Peso secco netto: 47,34 gr.

setacci A.S.T.M. n.	luce netta mm.	passante %
10	2,000	100,00
30	0,600	99,32
50	0,300	98,35
100	0,150	95,51
200	0,075	90,65

Descrizione (Classificazione A.G.I.)	Ghiaia %	Sabbia %	Limo %	Argilla %
Limo argilloso debolmente sabbioso	"	13	70	17



Cantiere: Meldola (FC), via Puccini

Data: Ottobre 2023

Sondaggio n. : 1

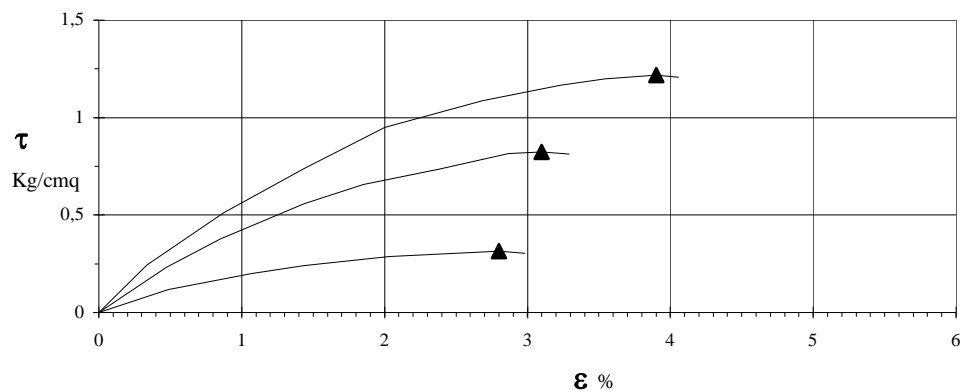
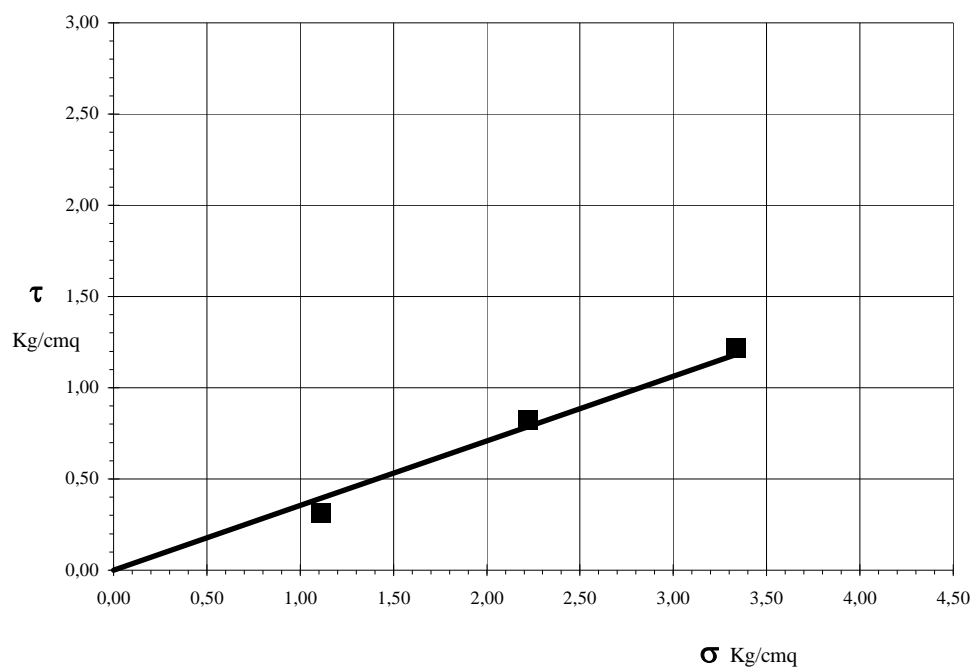
Campione : 1

Profondità : 1,10÷1,50 mt.

Prova di taglio diretto C.D. su campione ricostruito



provino n.	dimensione iniziale		consolidamento			fase di rottura			valori a rottura		
	L mm.	H mm.	t ore	σ Kg/cmq	ΔH mm	v mm./min.	t min.	σ Kg/cmq	ε %	ΔH mm.	τ Kg/cmq
1	60x60	23	24	1,11	"	0.002	840	1,111	2,80	0,11	0,32
2	60x60	23	24	2,22	"	0.002	930	2,222	3,10	0,10	0,82
3	60x60	23	24	3,33	"	0.002	1170	3,333	3,90	0,03	1,22

 $C' = 0,00 \text{ Kg/cmq.}$ $\phi' = 19,50^\circ$ 

**ALLEGATO:
INDAGINE GEOFISICA**

r_ennio. Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.F

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO



r_eni.ro.Giunta - Prot. 30/04/2025.0424340.E

Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da PLAZZI MASSIMO, FLAMIGNI MASSIMILIANO

Lab.Geo

Prove geognostiche
e indagini geofisiche

di **Scaparrotti dott. Roberto**

Via Coletti 82/b - 47921 Rimini

Cell. 320 0555670

mail: scaparrotti.roberto@libero.it - p.i.039 913 304 02

c.f.: SCP RRT 60A 08H 294W

INDAGINE SISMICA PASSIVA MEDIANTE TROMOGRAFO DIGITALE "TROMINO" ® (METODO NAKAMURA)

STIMA DELLA V_{seq} CON MISURA DIRETTA DELLE FREQUENZE DI RISONANZA DA STAZIONE SINGOLA - METODO H/V

LOCALITÀ: via Puccini – Meldola (FC)

RELAZIONE GEOFISICA

Rif. DF65/2-DF3

Rimini, Ottobre 2023



La caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione, è stata svolta con metodologia di sismica passiva a stazione singola H/V per mezzo di strumento *Tromino*®, Micromed S.p.a.. La tecnica si basa sulla misura del microtremore sismico ambientale come di seguito descritto.

Oggetto della misura: il microtremore sismico ambientale

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato, dall'attività dinamica terrestre, dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino. I metodi che si basano sulla loro acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale e in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato nella figura sottostante. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

La tecnica impiegata. Cenni storici

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSRO o H/V), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Mentre su questo punto non è stato raggiunto consenso, è invece ampiamente riconosciuto che la curva H/V è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli e, tramite opportuna inversione, delle profondità dei substrati rocciosi sotto le coperture sedimentarie. Studi recenti hanno dimostrato che ulteriori picchi a frequenze maggiori di quelle del bedrock sono riconducibili a contrasti di impedenza interni alla copertura sedimentaria e picchi a frequenze minori di quella del bedrock sono invece riconducibili a contrasti di impedenza interni al bedrock stesso. Riconosciuta questa capacità è dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo H/V può essere usato come strumento stratigrafico. Le basi teoriche dell'H/V sono relativamente semplici in un sistema bistrato del tipo sedimenti + bedrock in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). In questi casi la profondità h della discontinuità sismica viene ricavata tramite la formula semplice della risonanza $h=V/(4f_r)$ o, al più, tramite la formula [1] in cui v_0 è la velocità al tetto dello strato, x un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.) e f_r la frequenza fondamentale di risonanza (cf. ad esempio Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

$$h = \left[\frac{V_0 (1 - x)}{4 f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} - 1 \quad [1]$$

Nei sistemi multistrato, teoricamente l'effetto di risonanza è sommabile, ma non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1. Ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza [1]. L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- a) il contenuto in frequenza,
- b) la risposta strumentale,
- c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

L'inversione delle misure di tremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli "sintetici", cioè con quelli calcolati relativamente ad un modello. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli

sintetici sono vicini. I modelli sintetici di inversione impiegati in questo lavoro partono dalla modellizzazione del campo d'onde superficiali (onde di Rayleigh e Love) in sistemi multistrato (Aki, 1964; Ben-Menahem e Singh, 1981). L'inversione delle curve H/V per ottenere un profilo di v_s è possibile a patto di disporre di un punto di taratura (es. penetrometria o sondaggio) che fornisca la profondità di un riflettore – anche molto superficiale – riconoscibile nella curva H/V oppure a patto di conoscere la v_s del primo strato a partire da tecniche indipendenti (Castellaro e Mulargia, 2007).

Procedura ed analisi dei dati per stazioni singole H/V

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva possono restituire si basa sul concetto di *contrasto di impedenza* ovvero il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e la densità del mezzo stesso tra due diversi strati. Per *strato* si intende un'unità distinta da quella sopra o sottostante caratterizzate dunque da contrasti d'impedenza diversi. L'interpretazione della curva sperimentale è stata svolta con apposito programma “Grilla” agganciandosi alla prova CPT 1.

Dalla registrazione del rumore sismico ambientale in campo libero, viene ricavata la curva sperimentale H/V secondo la procedura descritta in Castellaro et al. (2005), con parametri:

- larghezza delle finestre d'analisi 20 s.;
- lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;
- rimozione dei transienti sulla serie temporale degli H/V.

La curva H/V viene poi invertita creando una serie di modelli sintetici (che contemplano la propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori in sistemi multistrato), fino a considerare per buono il modello teorico più vicino alle curve sperimentali.

L'inversione delle curve H/V è possibile esclusivamente in presenza di un vincolo. Nel caso in questione tale vincolo è fornito dalla profondità del riflettore sismico noto tramite il sondaggio preso come riferimento, il cui marker è riconoscibile nelle curve H/V (Castellaro e Mulargia, 2007).

Dall'analisi congiunta della curva sperimentale H/V e degli spettri da cui essa deriva è stata ricavata la curva teorica.

È stata svolta una registrazione HVSR con un intervallo di tempo di 20 minuti.

TR 1

Instrument: TEN-0035/01-08

Data format: 16 bit

Full scale [mV]: 51

Start recording: 03/10/2023 15:42:22 End recording: 03/10/2023 16:02:23

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analysis performed on the entire trace.

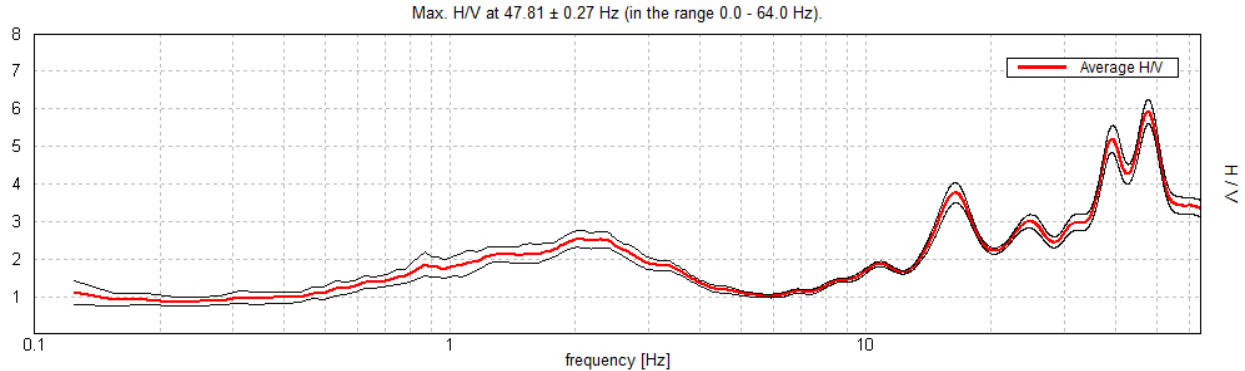
Sampling rate: 128 Hz

Window size: 20 s

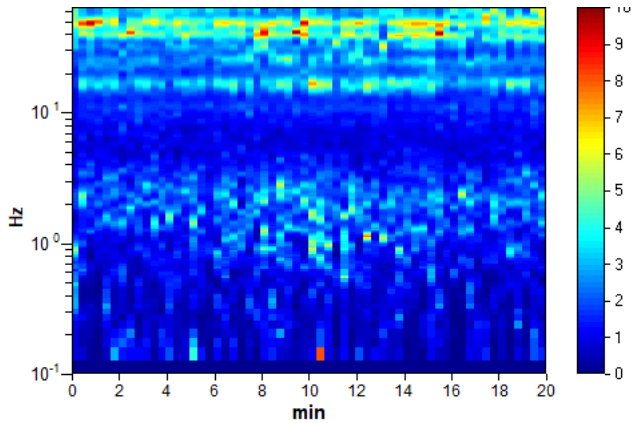
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

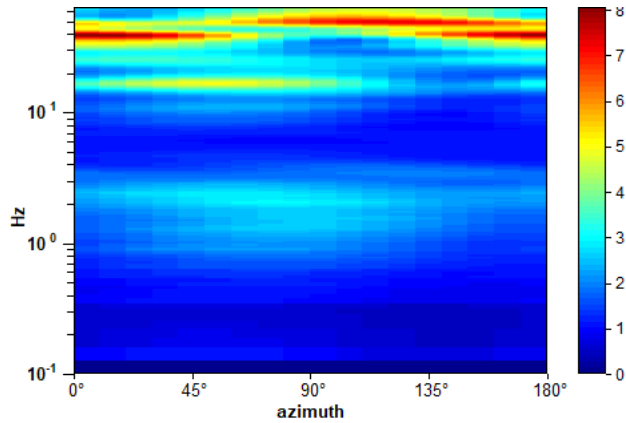
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



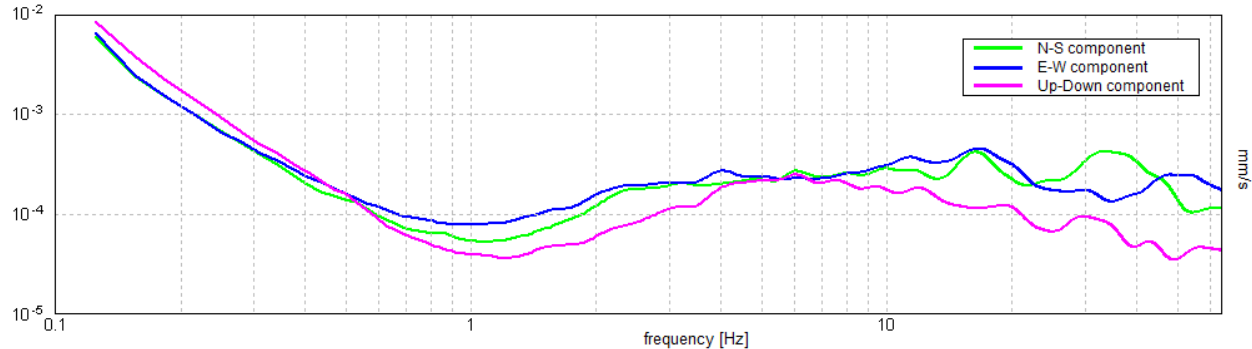
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V

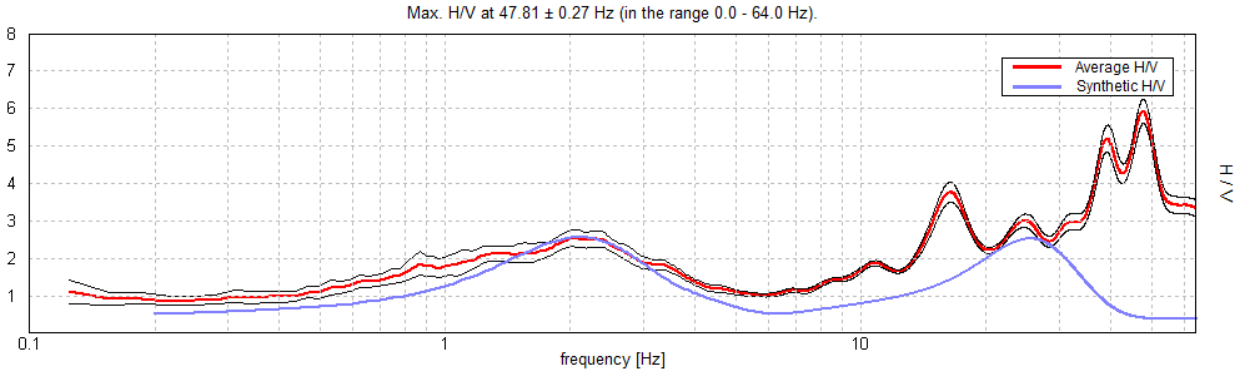


SINGLE COMPONENT SPECTRA

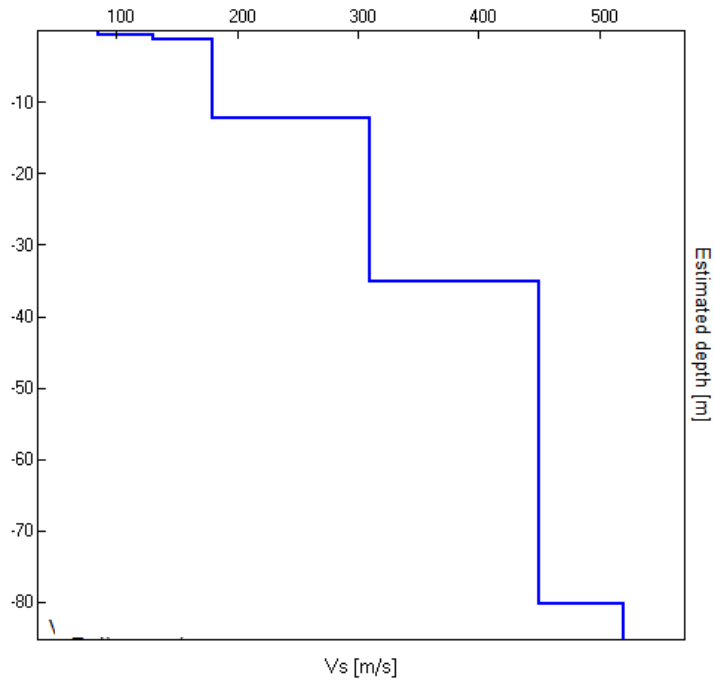




EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
0.60	0.60	85	0.42
1.20	0.60	130	0.42
12.20	11.00	180	0.42
35.20	23.00	310	0.40
80.20	45.00	450	0.40
inf.	inf.	520	0.39



Ipotizzando le fondazioni a varie quote
si ottengono le seguenti V_{seq} :

Profondità fondazione (m)	V_{seq} (m/s)
0.0	230
1.0	243
2.0	249
3.0	254



Si riportano di seguito i **tabulati del METODO SESAME 2005** (Site EffectS assessment using AMbient Exitations) applicati alla curva. Trattasi di un progetto di ricerca internazionale sull'utilizzo di strumentazioni sismiche idonee alla registrazione del rumore ambientale che costituisce il presupposto fondamentale per una corretta applicazione del metodo Nakamura. In tale tabulato i primi tre parametri debbono essere tutti verificati in quanto rappresentano la correttezza della misura, mentre gli ulteriori sei non debbono essere necessariamente tutti verificati in quanto evidenziano picchi non significativi dal punto di vista sismico. Un bedrock roccioso, per esempio, potrebbe dare tutti NO in quanto non presenterebbe picchi significativi.

Max. H/V at 47.81 ± 0.27 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$47.81 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$57375.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1284 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	31.688 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$5.93 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00556 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.26605 < 2.39063$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3232 < 1.58$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20