

COMUNE DI PIEVE DI CENTO
Provincia di Bologna

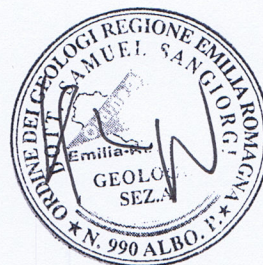


**DOCUMENTAZIONE RELATIVA ALLA LOCALIZZAZIONE
DELLE NUOVE STRUTTURE SCOLASTICHE PROVVISORIE
A SEGUITO DEL SISMA DEL 20 E 29 MAGGIO 2012**

RELAZIONE GEOLOGICA

ELABORAZIONE: dr geol. Samuel Sangiorgi

DATA 23/06/2012



Indice generale

1 Premessa.....	2
2 Principale normativa di riferimento.....	4
3 Metodo di lavoro.....	5
3.1 Studi di riferimento.....	5
3.2 Prove geognostiche e geofisiche di repertorio.....	5
3.3 Prove geognostiche e geofisiche integrative.....	6
4 Caratterizzazione dell'area di studio.....	8
4.1 Geomorfologia e geologia.....	8
4.2 Idrogeologia e idraulica.....	10
4.3 Pericolosità sismica.....	12
4.4 Verifiche della liquefacibilità dei sedimenti e dei cedimenti post sisma.....	17
5 Caratterizzazione geotecnica dei sedimenti.....	20

1 Premessa

Lo Studio scrivente è stato incaricato dall'Amministrazione Comunale di Pieve di Cento (BO) di elaborare uno studio geologico d'urgenza, finalizzato a valutare l'edificabilità di un'area da destinare alla realizzazione di strutture scolastiche provvisorie in sostituzione degli edifici lesionati dal sisma del maggio 2012. La figura 1.2 riporta uno stralcio planimetrico dell'area prevista dall'Amministrazione.

Lo studio geologico è impostato sulla base delle specifiche richieste contenute nella circolare RER del 19/06/2012 (PG 2012. 0150536) e ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008). Il presente lavoro dunque fornisce:

- schema geologico, geomorfologico, idrogeologico dell'area interessata dal progetto;
- pericolosità idraulica e caratterizzazione sismica;
- caratterizzazione geotecnica dei sedimenti che costituiscono il “volume significativo” di sottosuolo.

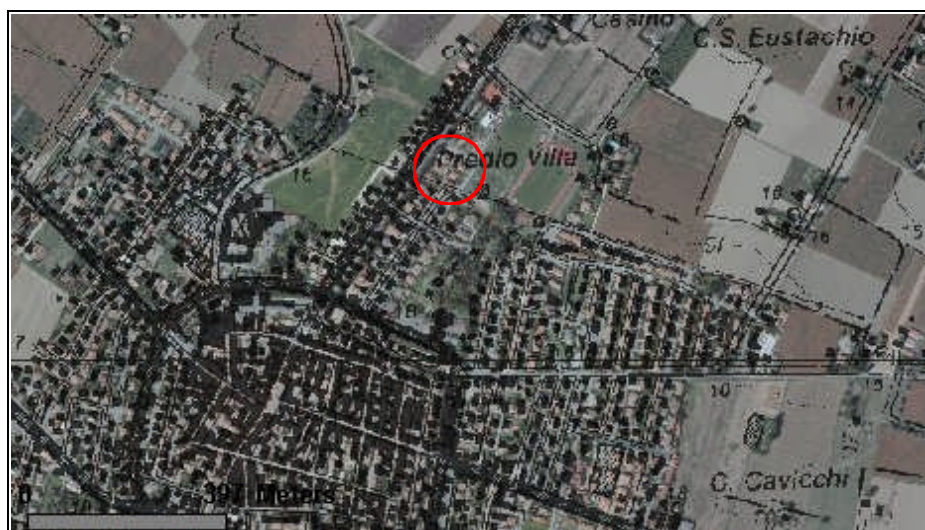


Figura 1.1 – Localizzazione sulla Carta Topografica RER al 25.000. L'area di studio è cerchiata in rosso



Figura 1.2 – Localizzazione sulla Carta Tecnica Regionale al 25.000. Il tratteggio verde indica il perimetro dell'area di studio

2 Principale normativa di riferimento

- *Delibera RER 112/2007*
Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia_Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica
- *Decreto Ministeriale 14.01.2008*
Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni
- *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Circolare 2 febbraio 2009.
- *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*
Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n. 36 del 27.07.2007
- *Eurocodice 8 (1998)*
Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture
Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- *Eurocodice 7.1 (1997)*
Progettazione geotecnica – Parte I : Regole Generali . - UNI
- *Eurocodice 7.2 (2002)*
Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI
- *Eurocodice 7.3 (2002)*
Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita con prove in sito (2002). UNI
- *Decreto Ministeriale 11.03.1988*
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione

3 Metodo di lavoro

Il lavoro analitico svolto è stato impostato riferendosi a studi e prove geognostiche e geofisiche di repertorio e a prove geognostiche e geofisiche integrative, effettuate per questo lavoro. La figura 3.1 riporta la localizzazione di tutte le prove di riferimento per questo studio.

3.1 Studi di riferimento

Per il contesto geologico, geomorfologico e idrogeologico locale → ci si è riferiti alle informazioni contenute nel Quadro Conoscitivo al PSC in forma associata (Comuni delle associazioni “Reno-Galliera” e “Terre di Pianura”), ed in particolare alla <<Tavola AC 1.1b - Carta litologico-morfologica>> (scala 1:25000) ed alla <<Tavola AC.1.2b – Carta idrogeologica” (scala 1:25000), elaborate dallo Studio Viel nel 2003;

Per il contesto di pericolosità idraulica → si è consultato il Piano Stralcio (PSAI) per il bacino del Reno e, inoltre, si sono consultati i dati relativi agli episodi storici di esondazione raccolti dalla Protezione Civile dell'Emilia-Romagna relativi agli allagamenti minori in pianura;

Per il contesto sismico locale → il riferimento per questo lavoro è lo studio di Micro Zonazione Sismica di “secondo livello” dei comparti di progetto e dell'urbanizzato consolidato, elaborato ad integrazione del PSC di Pieve di Cento (Studio Viel & Sangiorgi, 2008) ai sensi della delibera RER 112/2007; ci si è inoltre riferiti ai dati di pericolosità sismica forniti dall'INGV e pubblicati anche nel sito <http://esse1.mi.ingv.it/>, basati sulla più recente revisione della macrozonazione sismogenica del territorio nazionale;

3.2 Prove geognostiche e geofisiche di repertorio

B/D geognostica SGSS della Regione Emilia-Romagna → penetrometrie statiche meccaniche e in particolare:

- da “C029” a “C031” prove CPT spinte fino a 8 metri di profondità
- da “C040” a “C041” prove CPT spinte fino a 10 m di profondità

Relazione Geologica Geotecnica di un'area sita presso gli impianti sportivi in via Kennedy (GEOTEA, 2004) → sono state eseguite 3 prove penetrometriche meccaniche spinte rispettivamente fino a 10 metri (CPT1), 20 m (CPT2) e 25 m (CPT3).

Indagini geofisiche espletate per lo studio di MZS del Comune di Pieve di Cento

(Studio Viel & Sangiorgi, 2008) → in adiacenza all'area di studio sono state eseguite:

- una prova MASW per la stima delle velocità delle onde sismiche di taglio V_s
- tre acquisizioni del microtremore sismico HVSR

3.3 Prove geognostiche e geofisiche integrative

Prove penetrometriche CPTE(CPTU → sono state eseguite due prove penetrometriche statiche, rispettivamente con piezocono (prova CPTU 1) e con puntale elettrico (CPTE 2), spinte fino a:

CPTU1 → -20 metri dal piano campagna (p.c.)

CPTE2 → -15 metri dal p.c.

Le terebrazioni sono state realizzate con un penetrometro dotato di spinta da 200 kN, montato su mezzo semovente cingolato con ancoraggi laterali per incrementare il contrasto durante la penetrazione profonda. La punta elettrica utilizzata, dotata anche di cella piezometrica presenta caratteristiche standard e la speciale attrezzatura utilizzata permette l'acquisizione dei dati ogni cm di avanzamento attraverso lettura diretta delle resistenze. I dati di penetrazione (Q_c , f_s) sono stati elaborati per la stima automatica dei principali parametri meccanici fondamentali (vedi grafica in appendice): quota di falda locale, resistenza alla punta normalizzata (Q_{c1n}), I_c , D.R., ϕ' , c_u , OCR, Modulo Edometrico.

Indagini geofisiche → è stata eseguita una acquisizione sismica passiva mediante tecnica HVSR. Questa prova consente la misura del rumore sismico (microtremore) del sottosuolo. I dati sono stati acquisiti con strumentazione portatile in dotazione allo Studio scrivente. Lo strumento dispone di tre canali di acquisizione connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione, in grado di misurare le componenti della velocità (moto) di ogni strato lungo le direzioni N-S; E-W; H-V. L'elaborazione del microtremore misurato, fornisce i rapporti spettrali HVSR o H/V (Nogoshi & Igarashi, 1970), risultando efficace per la stima delle frequenze fondamentali di risonanza f_r del sottosuolo

$$f_r = V_s/4 \cdot H \quad \text{con } H = \text{spessore dello strato}$$

In questo modo, gli esiti delle misure tomografiche, opportunamente calibrati con la stratigrafia direttamente desunta dalle penetrometrie e dai dati di sottosuolo pregressi forniscono un ulteriore e utile supporto alla ricostruzione di sottosuolo ed alla stima della velocità media delle onde di taglio nel volume di sottosuolo investigato; la stima delle frequenze amplificanti del terreno consente anche una preliminare valutazione delle eventuali "doppie risonanze" con le tipologie di manufatti di progetto.

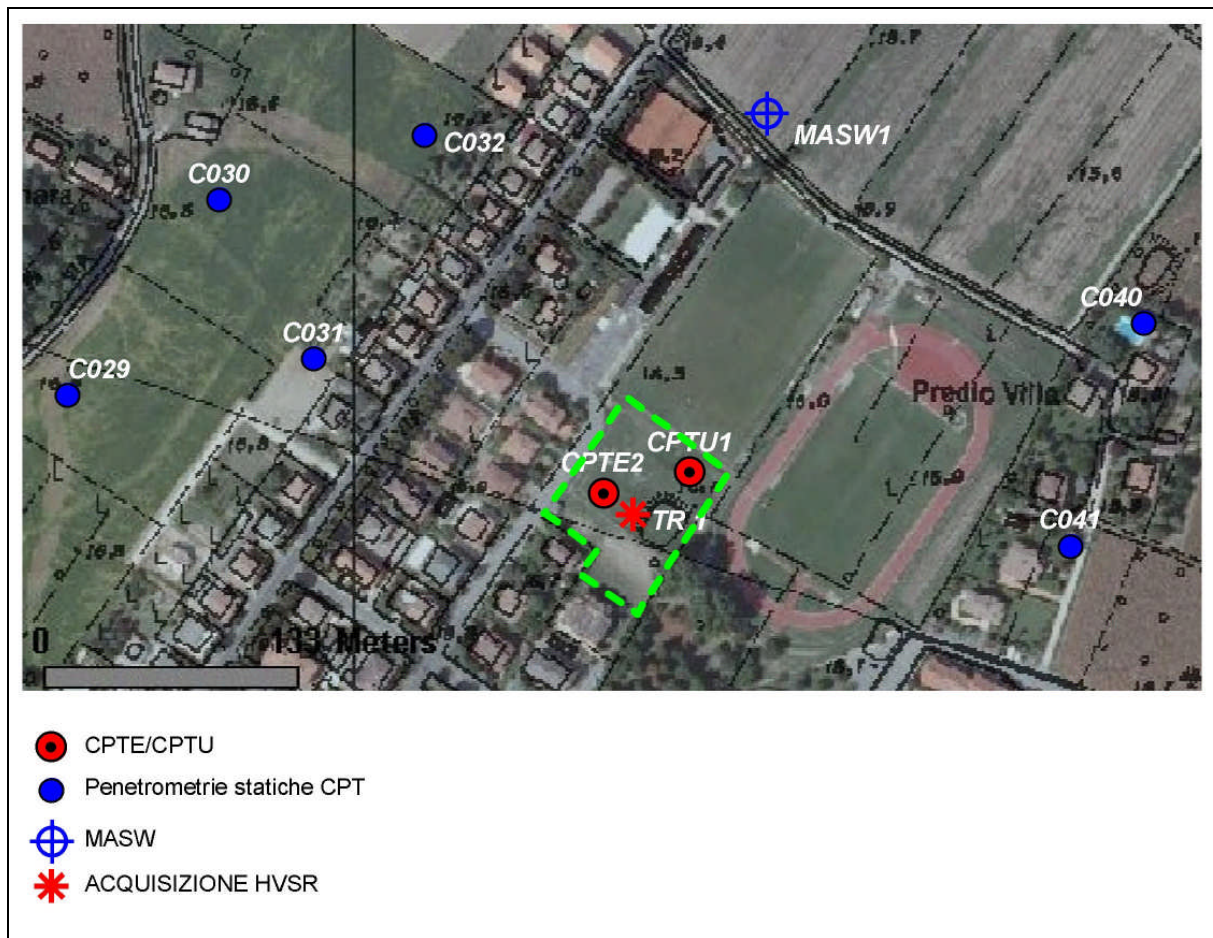


Figura 3.1 – Localizzazione delle prove geognostiche e geofisiche di riferimento

4 Caratterizzazione dell'area di studio

4.1 Geomorfologia e geologia

L'area di studio ricade in un contesto paleogeografico più recente di <<canale e argine prossimale>> attribuibile al Fiume Reno. Si tratta di una struttura sedimentaria molto ampia ed articolata, in cui si alternano canali sabbiosi e zone di intercanale limose. La complessiva morfologia ha andamento circa subparallelo all'attuale alveo del Reno e i depositi sabbiosi più superficiali hanno matrice per lo più limosa. La figura 4.1 propone uno stralcio della <<Carta Litologica-Morfologica>> (G. Viel, 2003) in scala 1:25.000 che costituisce elaborato cartografico del Quadro Conoscitivo del PSC in forma Associata e l'area di studio è dunque interessata da depositi più superficiali sabbiosi di piana alluvionale.

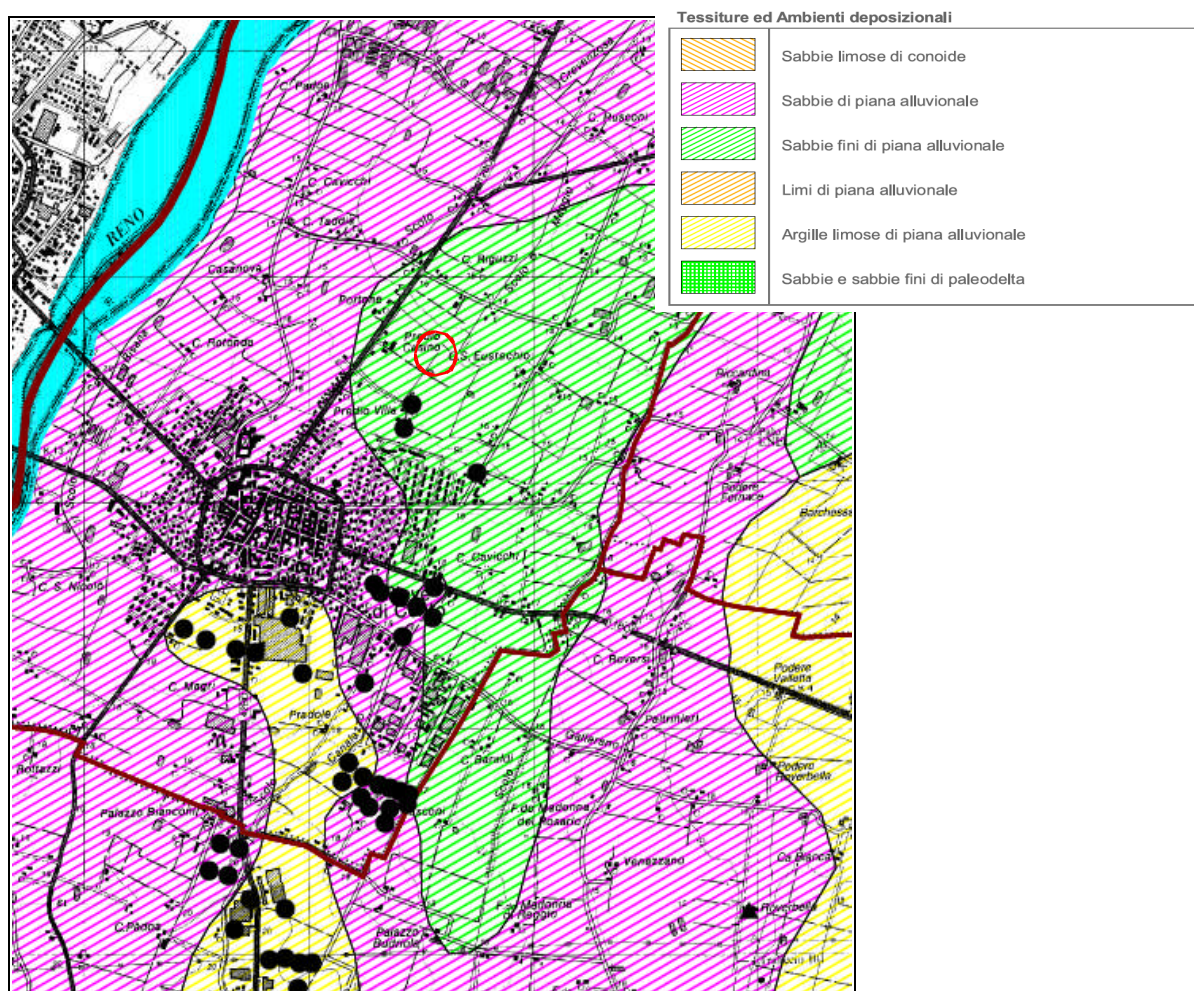


Figura 4.1 – Stralcio della Cartografia litologica-morfologica in scala 1:25.000, elaborato del QC del PSC associato (G. Viel, 2003). Gli elementi punti rappresentano i punti di controllo geognostico

La figura 4.2 riporta invece un estratto della Carta Geologica interattiva alla scala 1:10.000, pubblicata nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli¹ regionale della Regione Emilia-Romagna. La cartografia classifica i sedimenti alluvionali affioranti al subsistema di Ravenna (AES8) e in particolare al suo ordine più recente dell'Unità di Modena (AES8a) caratterizzato da depositi superficiali con tessiture limoso sabbiose.

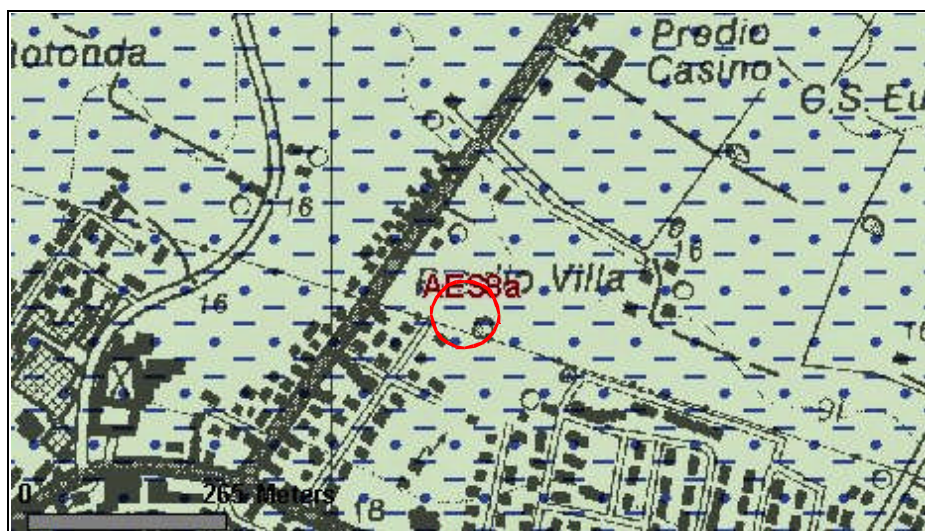


Figura 4.2 – Stralcio della Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:10.000. In cerchio rosso l'area studiata

Le indagini di repertorio e le ulteriori indagini penetrometriche eseguite internamente all'area di studio (figura 4.3) evidenziano un primo intervallo caratterizzato da limi sabbiosi, attraversati fino a circa 3 metri di profondità. Occorre precisare che le tessiture fino a circa -2,3 metri possono risultare anche molto falsate per l'essiccamento che caratterizza questo primo intervallo insaturo attraversato. Più in profondità, gli apporti sabbiosi appaiono esaurirsi più a est, cioè verso l'attuale alveo del Reno. Solamente la prova CPTU1 riscontra un intervallo costituito da limi e sabbie, attraversato da -5,3 metri a -7,4 m. Ciò detto, il contesto paleogeografico non esclude la possibilità di strutture sepolte lenticolari granulari (paleoalvei del Reno) anche a profondità maggiori.

¹ https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=geologia

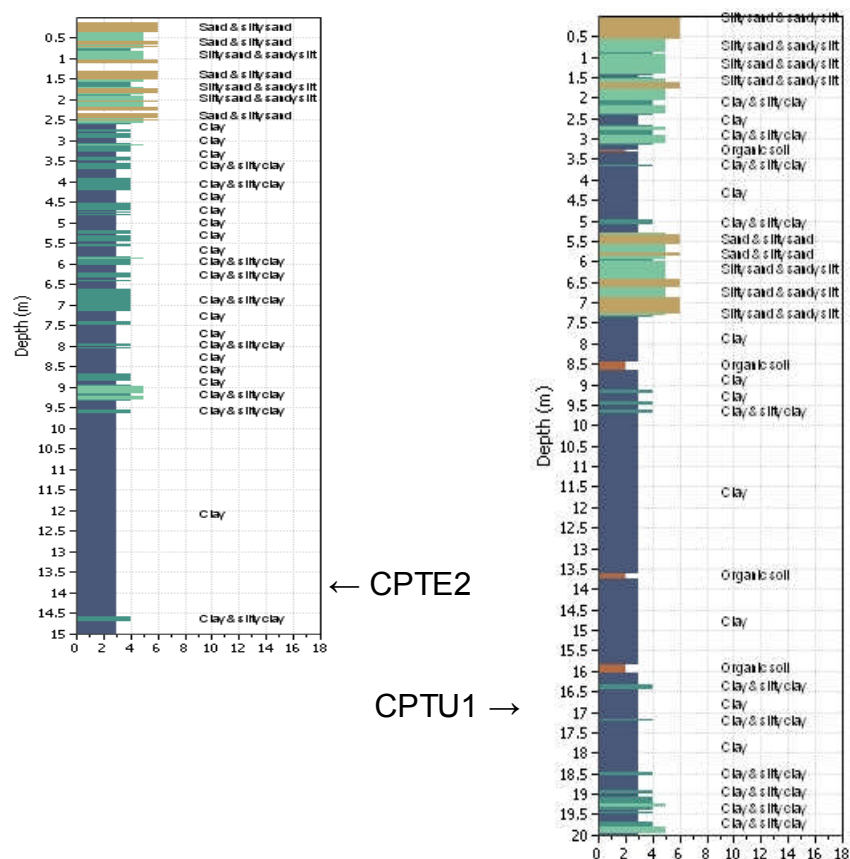


Figura 4.3 – Schema tessiturale desunto dalle due prove penetrometriche eseguite nell'area studiata

4.2 Idrogeologia e idraulica

L'analisi del contesto idrogeologico locale, estrapolabile dalla Carta Idrogeologica del PSC Associato (G. Viel, 2003), riscontra una prima debole falda, ospitata nell'intervallo limoso sabbioso meno profondo, la cui ricarica appare principalmente legata all'alimentazione di subalveo del Fiume Reno. La ricostruzione della tavola d'acqua evidenzia una soggiacenza apparente (dislivello tra quota del p.c. e quota media piezometrica della falda) di circa 2 metri. Il campo di modo è invece caratterizzato da un deflusso sotterraneo diretto verso NNE.

Nelle penetrometrie CPTU1 e CPTE2 il livello statico registrato dopo l'estrazione delle aste, è risultato a -2,30 metri dal p.c., confermando il contesto idrogeologico descritto. Considerando che sia il rilevamento, sia le prove sono state effettuate in un periodo di scarse precipitazioni, si può ipotizzare una soggiacenza minima compresa tra 1÷1,5 metri.

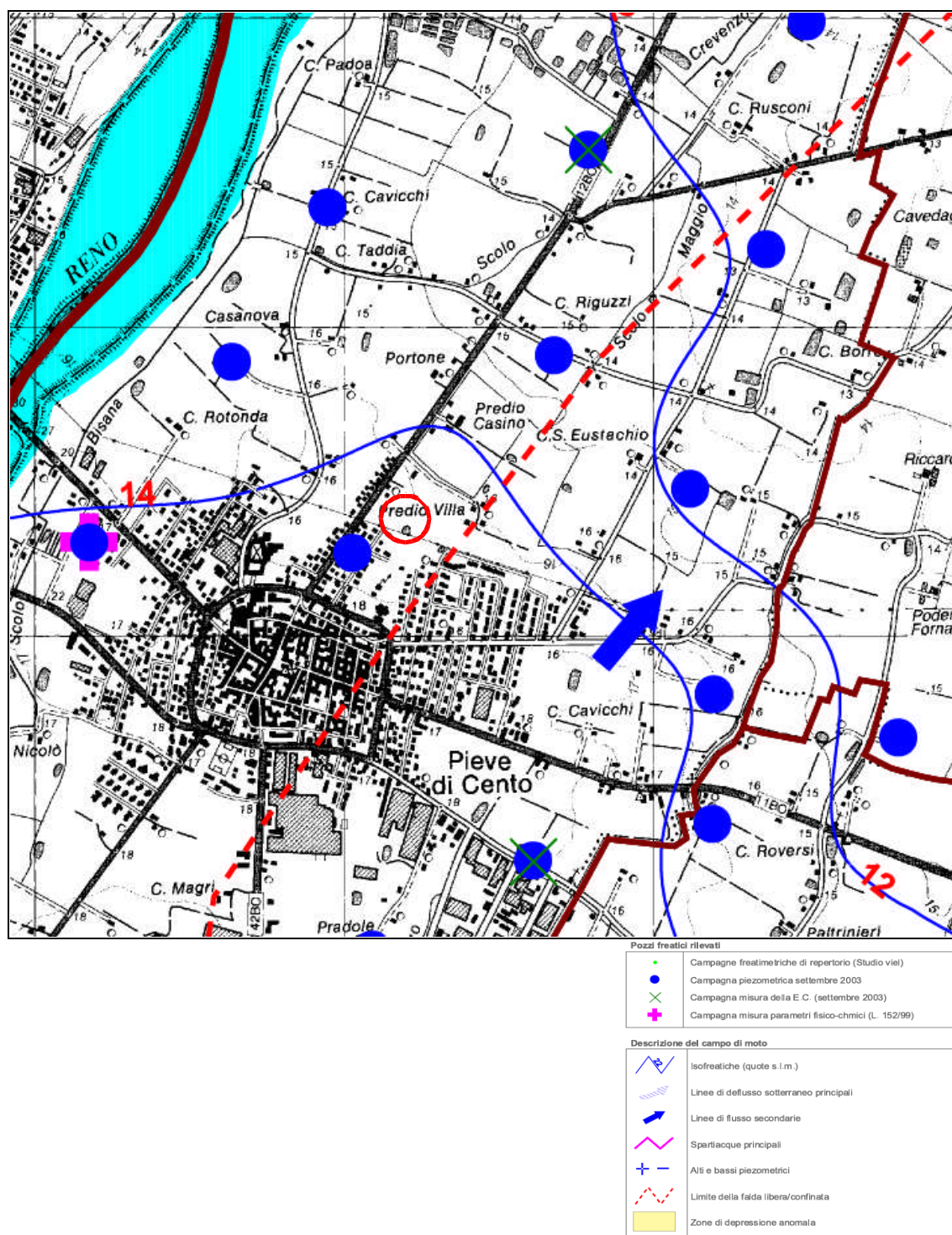


Figura 4.4 – Stralcio della <<Tavola AC.1.2b – Carta Idrogeologica>>, scala 1:25.000 elaborata per il Quadro Conoscitivo del PSC elaborato in forma associata “Reno-Galliera – Terre di Pianura (G. Viel, 2004). L'area di studio è individuata con cerchio rosso

Per quanto riguarda l'aspetto idraulico, l'area di studio risulta esterna ad aree con alta probabilità di allagamento (T.R. <200 anni) come si desume dalla cartografia del

P.T.C.P. e del P.S.A.I. Anche i dati raccolti dalla Protezione Civile riguardo episodi di allagamenti locali (aggiornati al 2003) non evidenziano ricorrenze almeno negli ultimi 60 anni (figura 4.5). Non sussistono quindi elementi storici che indichino presenza di rischio idraulico locale di qualche rilevanza.

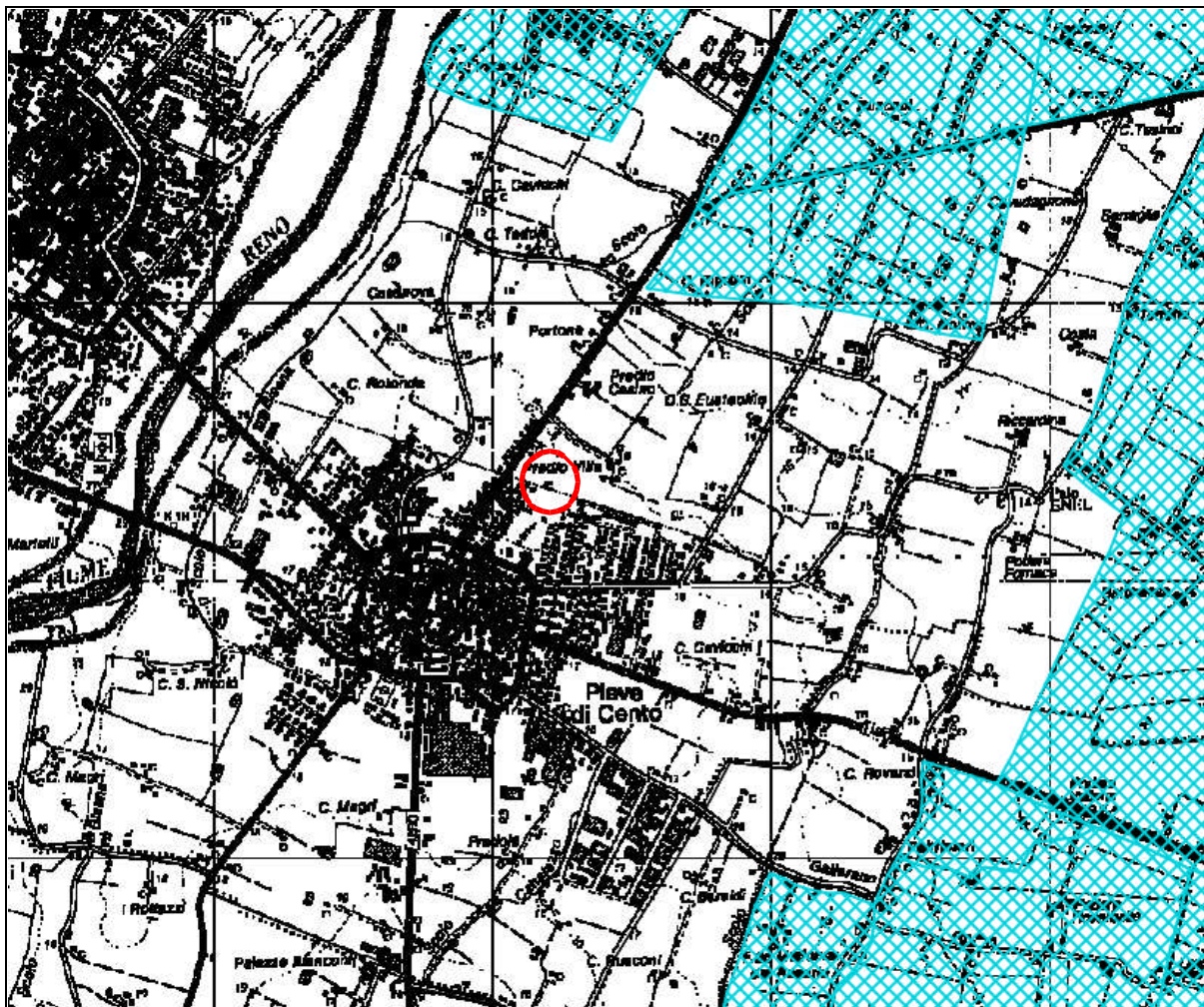


Figura 4.5 – Localizzazione delle aree con episodi di allagamento minori in retinato azzurro (fonte: Protezione Civile). L'area di studio è evidenziata in cerchiato rosso

4.3 Pericolosità sismica

Pericolosità sismica di riferimento

Per quanto riguarda la pericolosità sismica, a livello nazionale si è giunti, attraverso varie fasi di studi e revisioni, all'ultima zonazione sismogenica del territorio nazionale nota con la semplice sigla "ZS9" (2004) prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questa zonazione rappresenta il più recente riferimento per gli studi di pericolosità sismica del territorio italiano, elaborata riferendosi anche i più

recenti background informativi sui terremoti ed in particolare le ultime banche dati relative alle sorgenti sismogeniche italiane DISS² 2.0 e il catalogo CPTI³.

La figura 4.6 propone la sovrapposizione del territorio dei Comuni dell'Unione Reno-Galliera con la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel database più aggiornato e disponibile DISS 3.1. Si evince che l'area studiata ricade nell'ampia zona sismica che rappresenta la fascia più esterna dell'arco appenninico settentrionale. La sismicità è correlabile alla tettonica attiva del fronte compressivo del margine appenninico sepolto più avanzato che giunge fino all'attuale Po. Più nel dettaglio la banca dati DISS 3.1 indica che il territorio di Pieve di Cento è compreso nella "fascia" sismogenetica ITCS051 "Novi-Poggio Renatico", situata poco a nord. A questa zona sismogenica viene attribuita una magnitudo massima $M_w = 5,9$ e caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto elevate intensità.

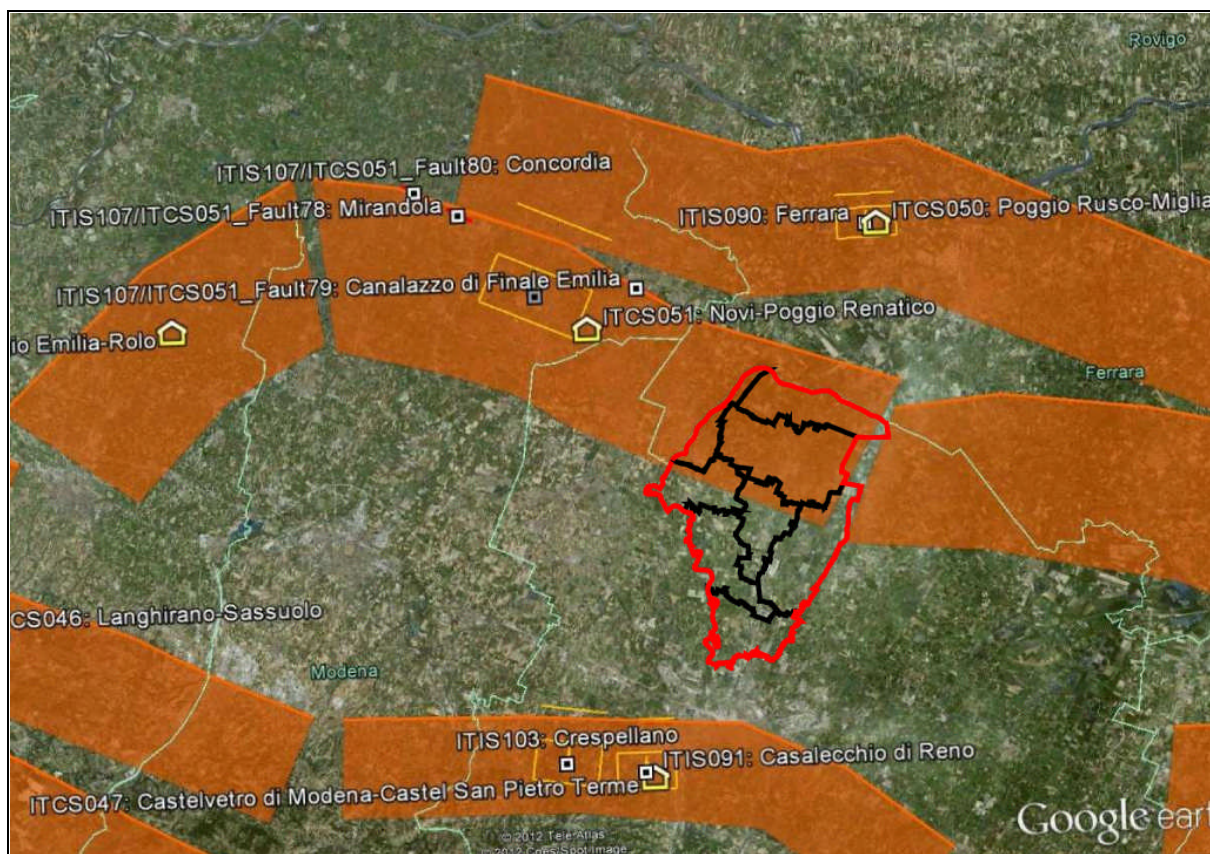


Figura 4.6 - Zonazione sismogenetica ZS9 e distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute in DISS 3.1 (foto aerea: Google Earth). Le sigle ITCS corrispondono alle "zone" mentre le sigle ITIS corrispondono a "sorgenti" sismogenetiche

² <<Database of Potential Sources for Earthquake Larger than M5.5 in Italy">> (Valensise e Pantosti, 2001)

³ <<Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani", Gruppo di lavoro CPTI, 1999-2002">>

Pericolosità sismica locale

La normativa sismica vigente, sia per l'elaborazione di studi a finalità urbanistica (delib. RER 112/2007), sia per la progettazione esecutiva (NTC 2008) prevede la classificazione del terreno da un punto di vista sismico basata sulla stima dei parametri V_{s30} , N_{spt} e/o coesione non drenata c_u e profondità del bedrock. Il parametro velocità delle onde di taglio (V_s) risulta il parametro di maggior riferimento della classificazione sismica del suolo, in quanto direttamente correlabile alle caratteristiche di rigidità del terreno in questione.

La stima della distribuzione delle V_s nel sottosuolo indagato è ricavata dalle prove geofisiche (MASW e acquisizioni HVSR) e penetrometriche (CPTE), già eseguite dallo scrivente per l'elaborazione dello studio di Micro Zonazione Sismica del Comune di Pieve di Cento (Viel & Sangiorgi, 2008).

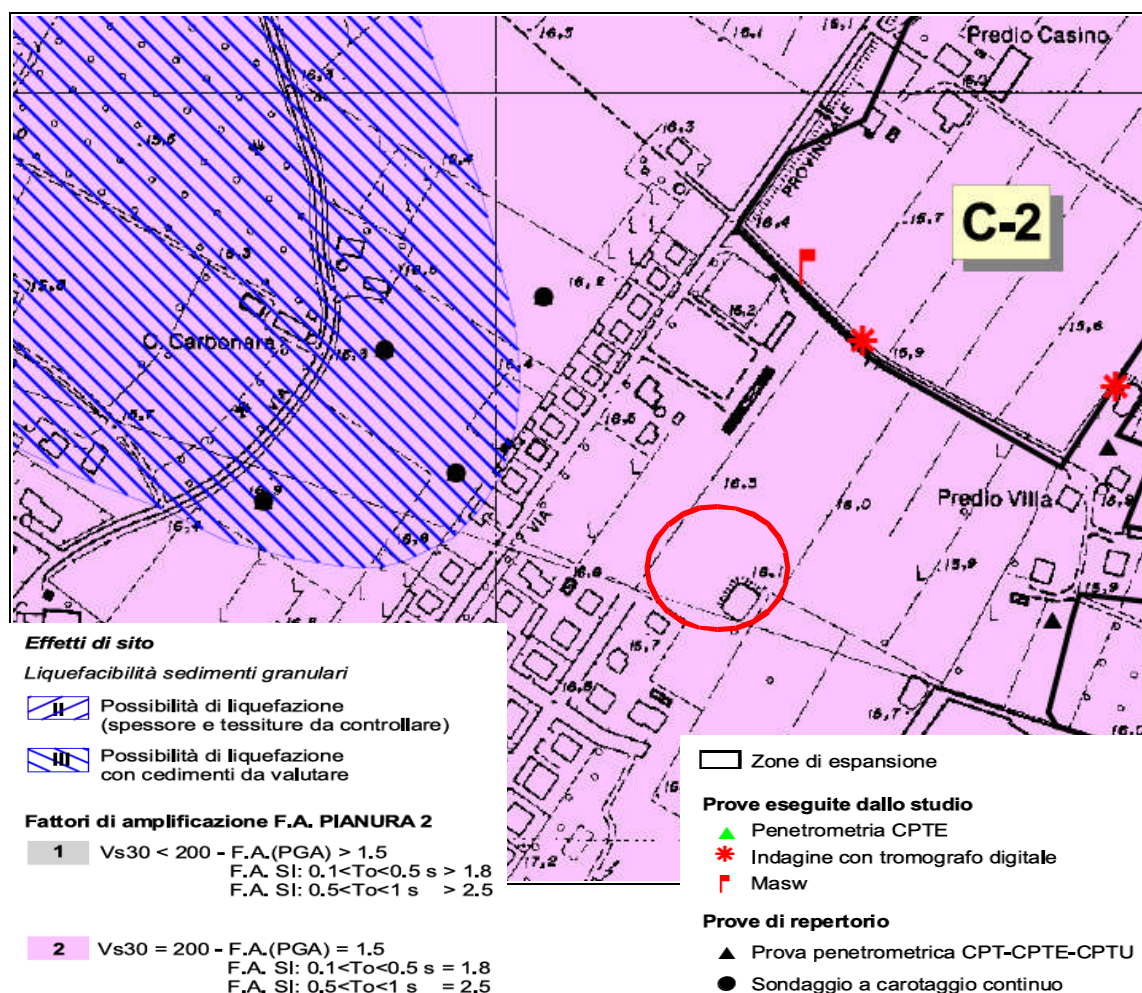


Figura 4.7 - Stralcio della Tavola di Micro Zonazione Sismica elaborata per il PSC di Pieve di Cento (Viel & Sangiorgi, 2008). In cerchiato rosso è indicata l'area di studio

La figura 4.7 propone uno stralcio della cartografia della citata MZS. La media delle velocità delle onde di taglio riscontrate nel sottosuolo con le due prove MASW eseguite nel capoluogo è risultata rispettivamente di 201 m/s e 208 m/s (figura 4.8). Anche la penetrometria con punta meccanica di repertorio e spinta a 31 metri di profondità, eseguita per il Piano Particolareggiato in località Predio Casino, presenta valori di Vs30 di poco inferiori a 200 m/s.

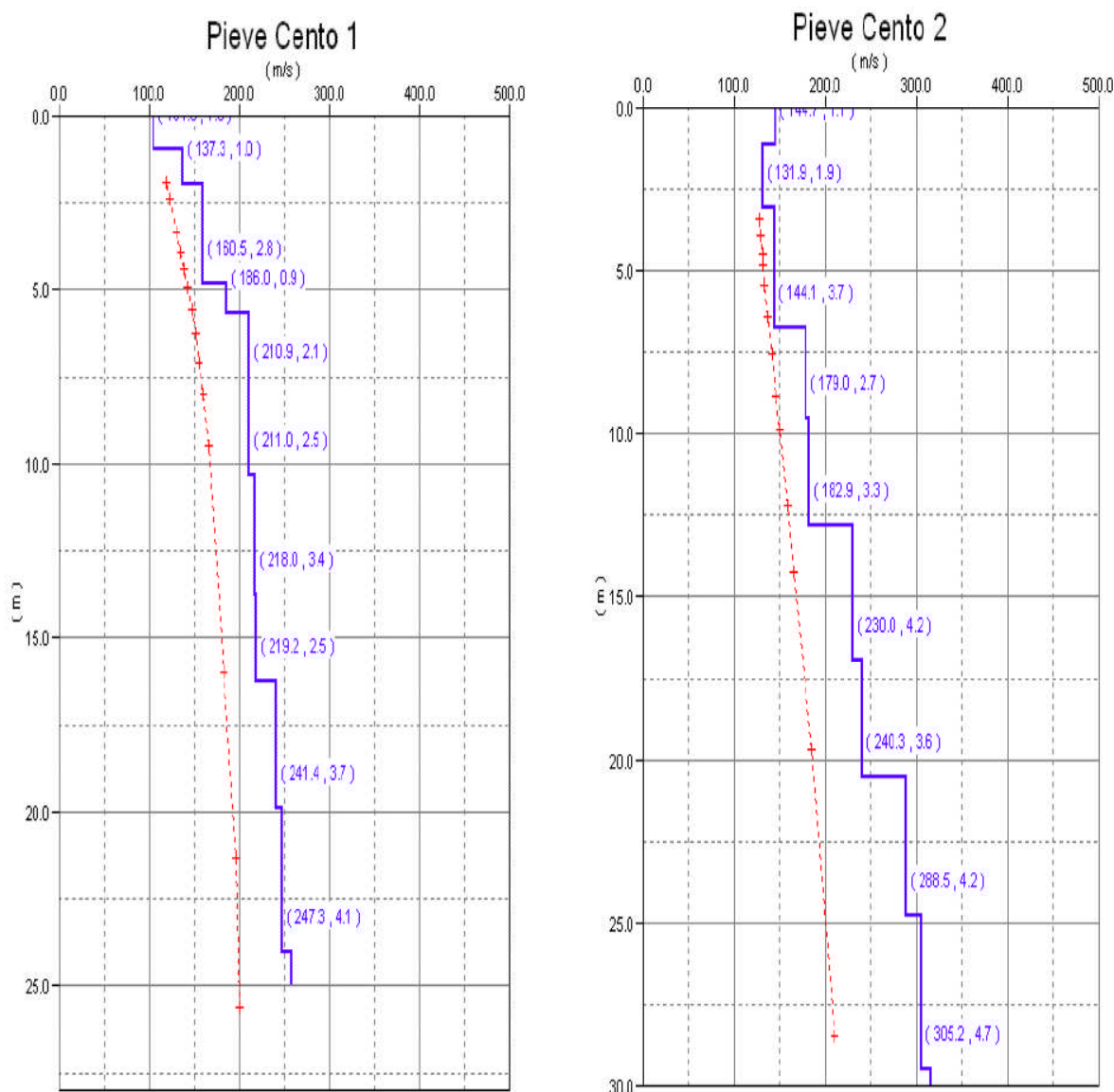


Figura 4.8 - Distribuzione delle Vs ricavate dalle prove MASW nel Capoluogo a Nord (diagramma a sinistra) e nel Capoluogo a Sud (a destra)

In conclusione per la stima semplificata delle amplificazioni locali ai sensi della delibera RER 112/2007, il valore della Vs30 è implementata nelle tabelle regionali ottenendo i coefficienti di amplificazione. Il contesto morfologico e geologico attribuito all'area è quello di Pianura Padana e in particolare a "PIANURA 2". Gli esiti di micro

zonazione dell'area studiata, in termini di amplificazione, sono risultati i seguenti:

Vs30	Contesto morfologico	F.A. PGA	F.A.S.I. (0,1s<T₀<0,5s)	F.A.S.I. (0,5s<T₀<1s)
200 m/s	PIANURA 2	1,5	1,8	2,5

Con:

F.A. P.G.A. → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ($a_{max,r}$) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ($a_{max,s}$) alla frequenza f . Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;

F.A. S.I. - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità, nel nostro caso per i due intervalli di frequenze, rispettivamente da $0.1 < T_0 < 0.5$ s e da $0.5 < T_0 < 1$ s;

Per questo lavoro, la traccia tomografica TR1 (vedi figura 4.9) è stata analizzata per un ulteriore approfondimento sugli effetti di amplificazione locale in caso di sisma. Occorre comunque premettere che in un sistema di sottosuolo più complesso, ovvero più simile alla realtà geologica locale (più strati lenticolari e/o tabulari) l'equazione sopra indicata non può essere applicata così linearmente. Inoltre, la tecnica dei rapporti H/V non consente una stima quantitativa del coefficiente di amplificazione.

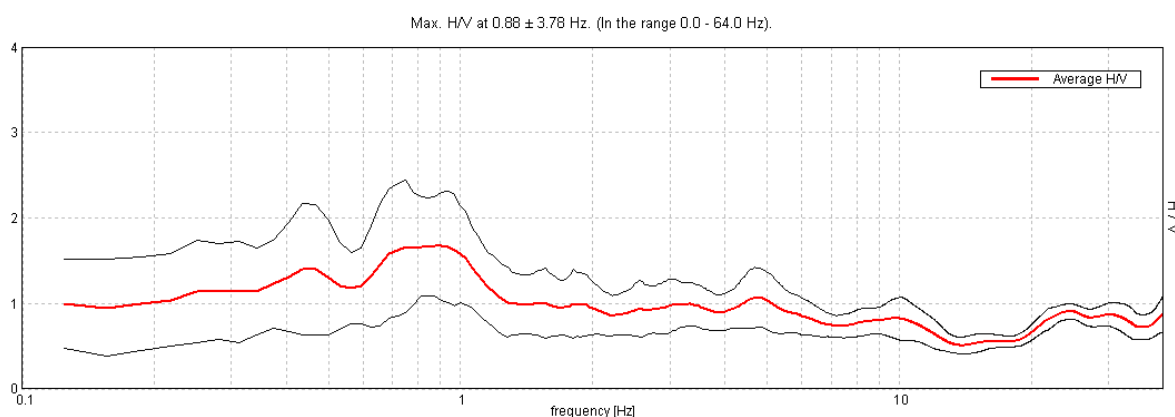


Figura 4.9 – Rapporto H/V della traccia tomografica TR1

Lo spettro H/V di un sistema multistrato può comunque ritenersi una sommatoria delle frequenze di risonanza dei principali strati in grado di indurre contrasti di impedenza sismica. La distribuzione delle frequenze di risonanza del sottosuolo può dunque essere un primo strumento di valutazione della vulnerabilità degli edifici

esistenti (o di previsione) agli effetti di amplificazione locale del moto sismico. È infatti noto come le strutture siano caratterizzate da differenti modi di vibrazione, in funzione di molti parametri tra cui l'elevazione, la tipologia, il materiale costruttivo, ecc. In questo senso, una generale relazione empirica che lega la frequenza di vibrazione di un edificio e la sua altezza è la seguente: $f = (10 \div 12)/n.$ piani.

Per quanto detto, la curva H/V ottenuta non rileva possibilità di amplificazione per un ampio range di frequenze, come peraltro presumibile dal contesto geologico-strutturale profondo, per gli effetti di smorzamento del segnale indotto dal potente spessore della coltre alluvionale, costituita da depositi poco rigidi. Le misure rilevano possibilità di amplificazione dell'impulso sismico solamente per frequenze molto basse, cioè a frequenze minori di 1 Hz (probabile tetto del “bedrock” sismico locale), tali da indurre effetti di “doppia risonanza” solamente con strutture e manufatti di notevole elevazione ($> 10 \div 12$ piani).

4.4 Verifiche della liquefacibilità dei sedimenti e dei cedimenti post sisma

La suscettibilità alla liquefazione dei sedimenti rappresenta un parametro molto importante da valutare nelle analisi di pericolosità sismica soprattutto a piccola scala e in particolare nella pianura alluvionale dove si ha la maggiore concentrazione dell'urbanizzato sia storico che di previsione.

Per liquefazione si intende l'annullamento di resistenza al taglio di terreni granulari saturi sotto sollecitazioni di taglio cicliche ed in conseguenza delle quali il sedimento raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di un liquido viscoso. Il meccanismo di liquefazione è governato da molti fattori e tra questi i principali sono: caratteristiche dell'impulso sismico; (magnitudo $M > 5,0$); densità relativa ($DR < 50 \div 60\%$); pressioni di confinamento (non sono riportati casi in letteratura di liquefazione in strati granulari profondi oltre 15-20 metri); fuso granulometrico; falda superficiale.

In condizioni di sisma, vi possono anche essere effetti “riordino” dei sedimenti, con possibilità di cedimenti significativi e che possono coinvolgere sia i depositi granulari poco addensati e recenti (olocenici), sia i sedimenti fini poco coesivi. Nell'ultimo decennio sono state elaborate procedure di stima delle potenziali deformazioni post-sisma anche nei sedimenti fini (limi e argille a comportamento “non drenato”) provocate da perdite di resistenza. Quest'ultimo fenomeno è noto con il termine “cyclic softening” (Idriss & Boulanger, 2004-2007).

Per quanto detto, per le stime preliminari di progetti caratterizzati da un maggior impegno prestazionale, le verifiche della suscettibilità alla liquefazione e dei cedimenti potenziali indotti da sisma possono essere valutati utilizzando correlazioni

empiriche basate sui risultati delle prove CPT (es. P.K Robertson 1990; 1998; 2009-2010). Il vantaggio dell'uso delle penetrometrie statiche è da ricercarsi nella maggiore accuratezza e ripetibilità della CPT/CPTe rispetto ad altre prove, nella sua relativa economicità e soprattutto nella possibilità di avere profili continui con la profondità e che forniscono informazioni dettagliate anche sulla stratigrafia.

I dati ricavati dalle prove CPTe/U sono stati elaborati secondo le procedure semplificate di verifica della liquefacibilità e stima dei cedimenti sismici attualmente più accreditate per le prove CPT, basate sulle esperienze di Seed e Idriss (1971) e di Robertson & Wride (1998), recentemente aggiornate dallo stesso P.K. Robertson (2009-2010). Le analisi espletate seguono, inoltre, le note procedure di riferimento dettate dall'NCEER. Questo approccio valuta la propensione alla liquefazione e stima i cedimenti post sisma sia nei sedimenti granulari saturi e insaturi, sia nei sedimenti fini, poco coesivi. Si è quindi riproceduto al calcolo automatico della liquefacibilità e dei cedimenti post sisma con il software "Cliq", sviluppato dalla GeoLogiki Geotechnical Engineers in collaborazione con lo stesso P.K. Robertson, utilizzando i dati di input della MZS: magnitudo del terremoto $M_w = 5.9$; ag_{max} al suolo pari a $0,158 \times 1,5 = 0,24g$. A ulteriore cautela la simulazione ha tenuto conto di una quota piezometrica da sisma saliente fino a -1,3 m (cioè una salienza pari un metro).

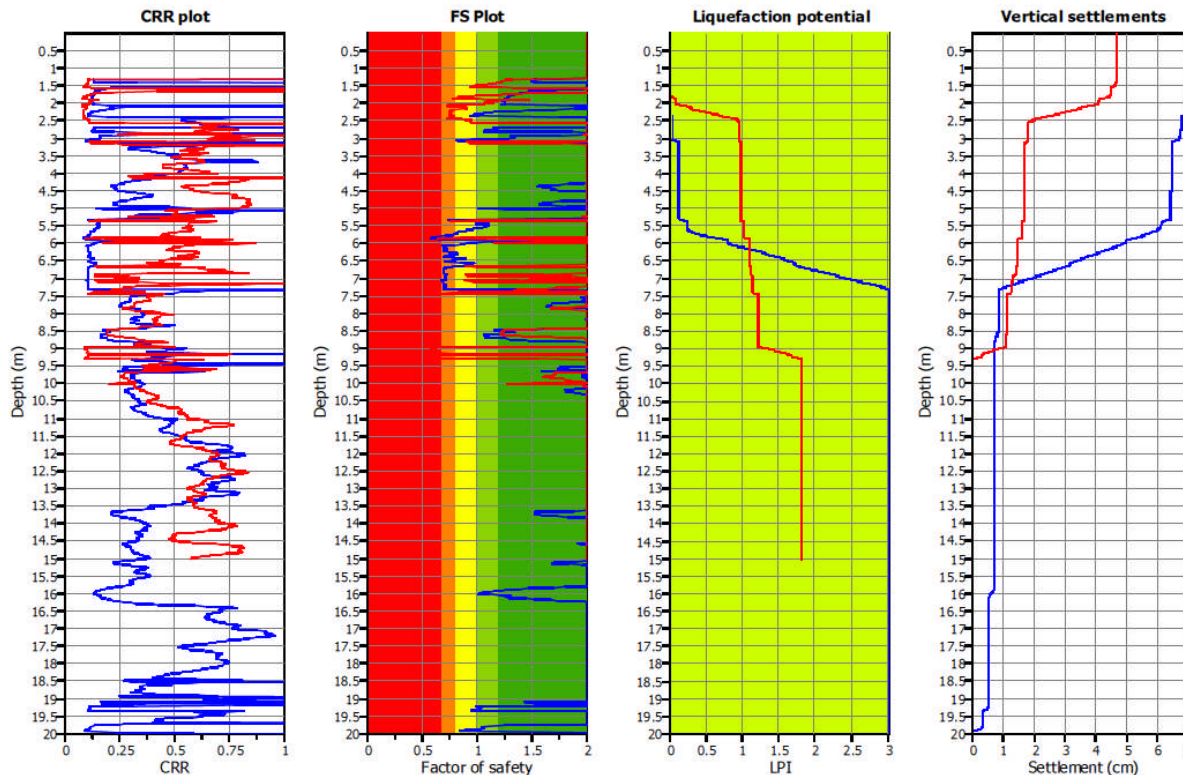


Figura 4.10 – Confronto delle verifiche di liquefazione per le due prove CPTU1 (in blu) e CPTU2 (in rosso)

La figura 4.10 riporta i diagrammi di verifica della liquefacibilità risultati dalla simulazione. Le verifiche dimostrano una blanda possibilità di liquefazione degli intervalli limoso sabbiosi saturi più superficiali per la prova CPTe2, mentre per la prova CPTU1 la liquefacibilità dello strato granulare attraversato da -5,4 metri fino a -7,3 m non dovrebbe causare manifestazioni superficiali per il sufficiente grado di confinamento di questo strato limoso sabbioso. La figura 4.10 riporta anche la variabilità dell'indice di potenziale liquefazione (LPI) secondo Iwasaki, 1982, che risulta per entrambe le prove <3 , a ulteriore conferma della bassa pericolosità di liquefazione locale.

5 Caratterizzazione geotecnica dei sedimenti

I dati di resistenza alla punta e laterale delle prove CPTE/U consentono di ricavare tessiture e proprietà meccaniche del sottosuolo attraversato (parametri “nominali”). Le penetrometrie forniscono esiti di resistenza ben correlabili tra loro e consentono di caratterizzare con buona sicurezza un volume di sedimenti da ritenersi adeguatamente “significativo” per l'intervento edificatorio previsto.

Per quanto detto, si elencano le correlazioni⁴ utilizzate per la stima delle proprietà meccaniche dei sedimenti indagati:

Unit Weight, g (kN/m³) ::

$$g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where g_w = water unit weight

Permeability, k (m/s) ::

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 I_c}$$

N_{SPT} (blows per 30 cm) ::

$$N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 I_c}}$$

Young's Modulus, E_s (MPa) ::

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

Relative Density, D_r (%) ::

$$100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad \text{(applicable only to } SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

State Parameter, ψ ::

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,CS})$$

Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to $SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8$)

:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::

If $I_c > 2.20$

$\alpha = 14$ for $Q_{tn} > 14$

$\alpha = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

If $I_c \leq 2.20$

$$M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$$

:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::

$$V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Remolded undrained shear strength, $S_u(rem)$ (kPa) :

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to } SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \text{ or } I_c > I_{c_cutoff})$$

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

$$k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$ or $I_c > I_{c_cutoff}$)

⁴ Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 4th Edition, July 2010

Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

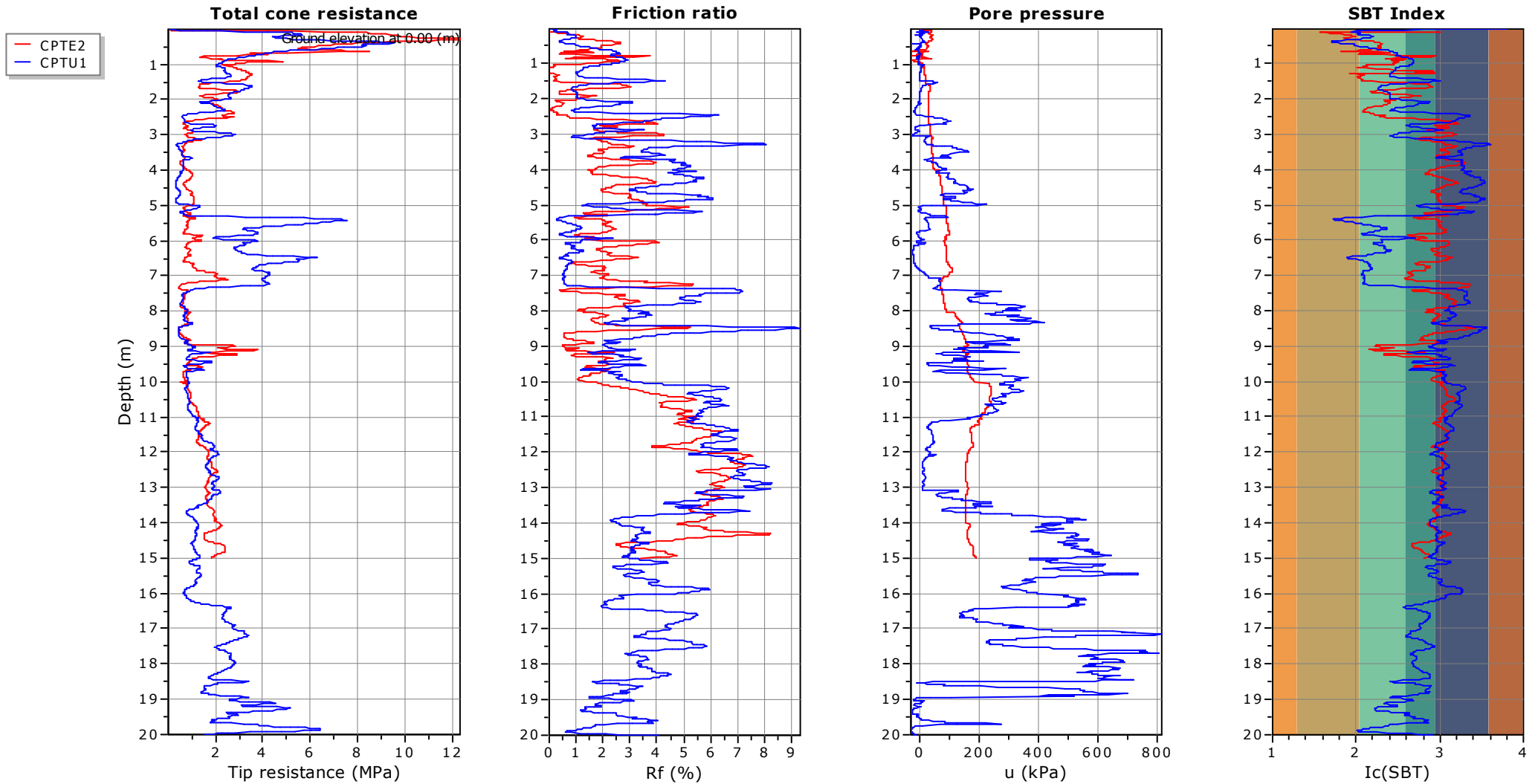
In calce alla relazione sono riportati i diagrammi con le distribuzioni dei principali parametri meccanici ricavati dalle due prove eseguite. Si allegano, infine, gli esiti penetrometrici delle prove di repertorio risultate di riferimento per questo lavoro.

Elaborazione:

dott. geol. Samuel Sangiorgi

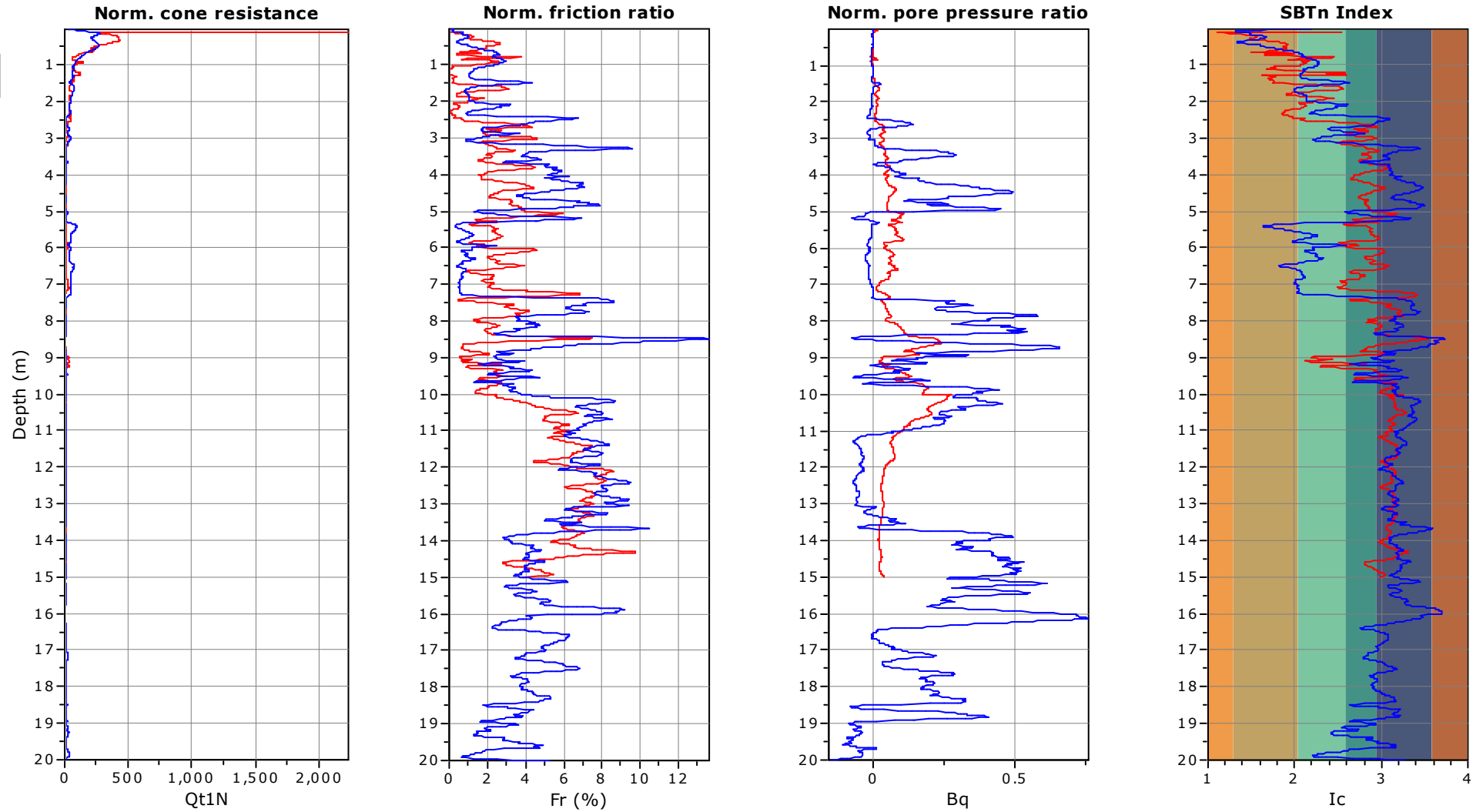
Project:

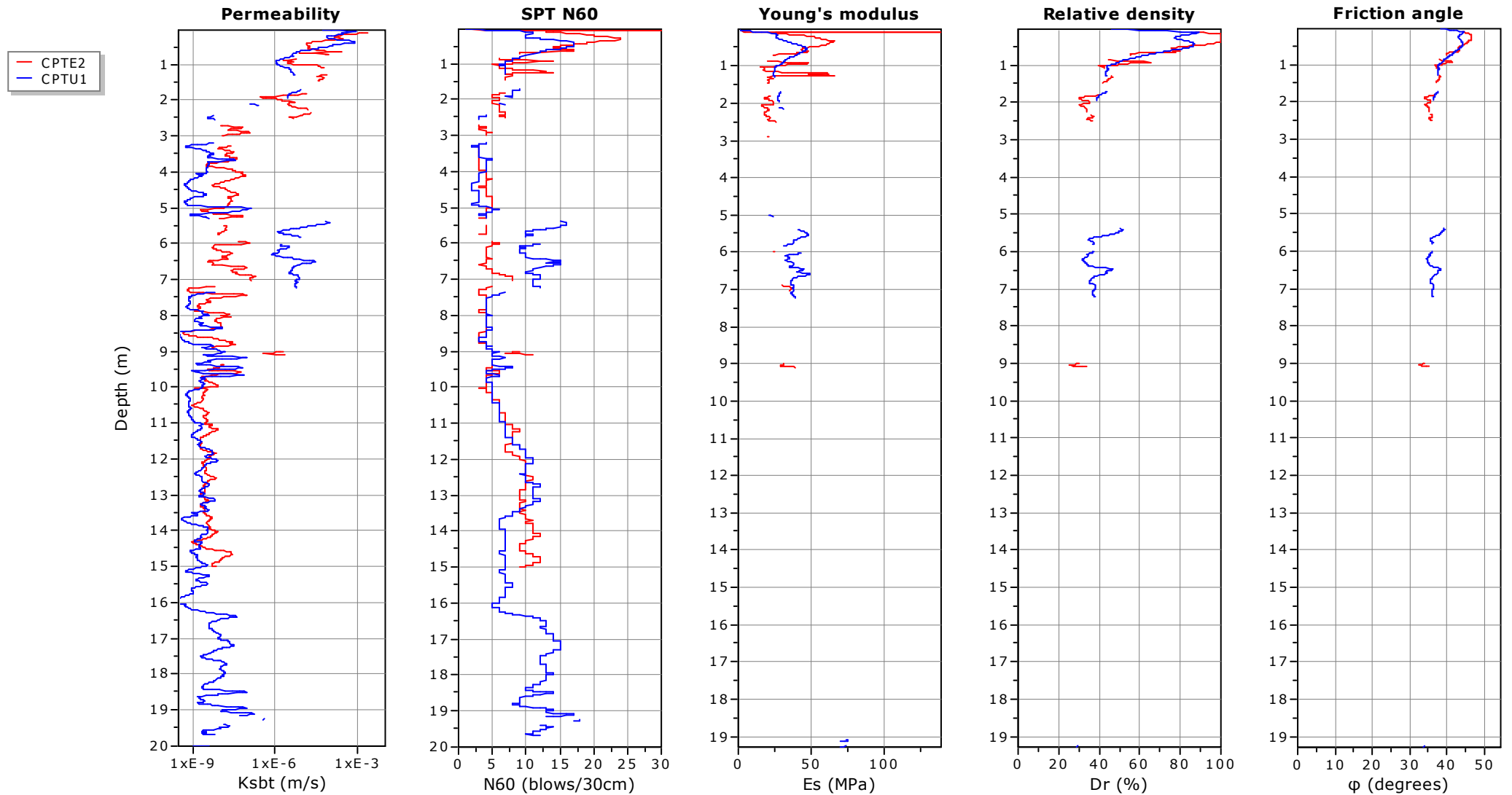
Overlay basic interpretation plots



Project:

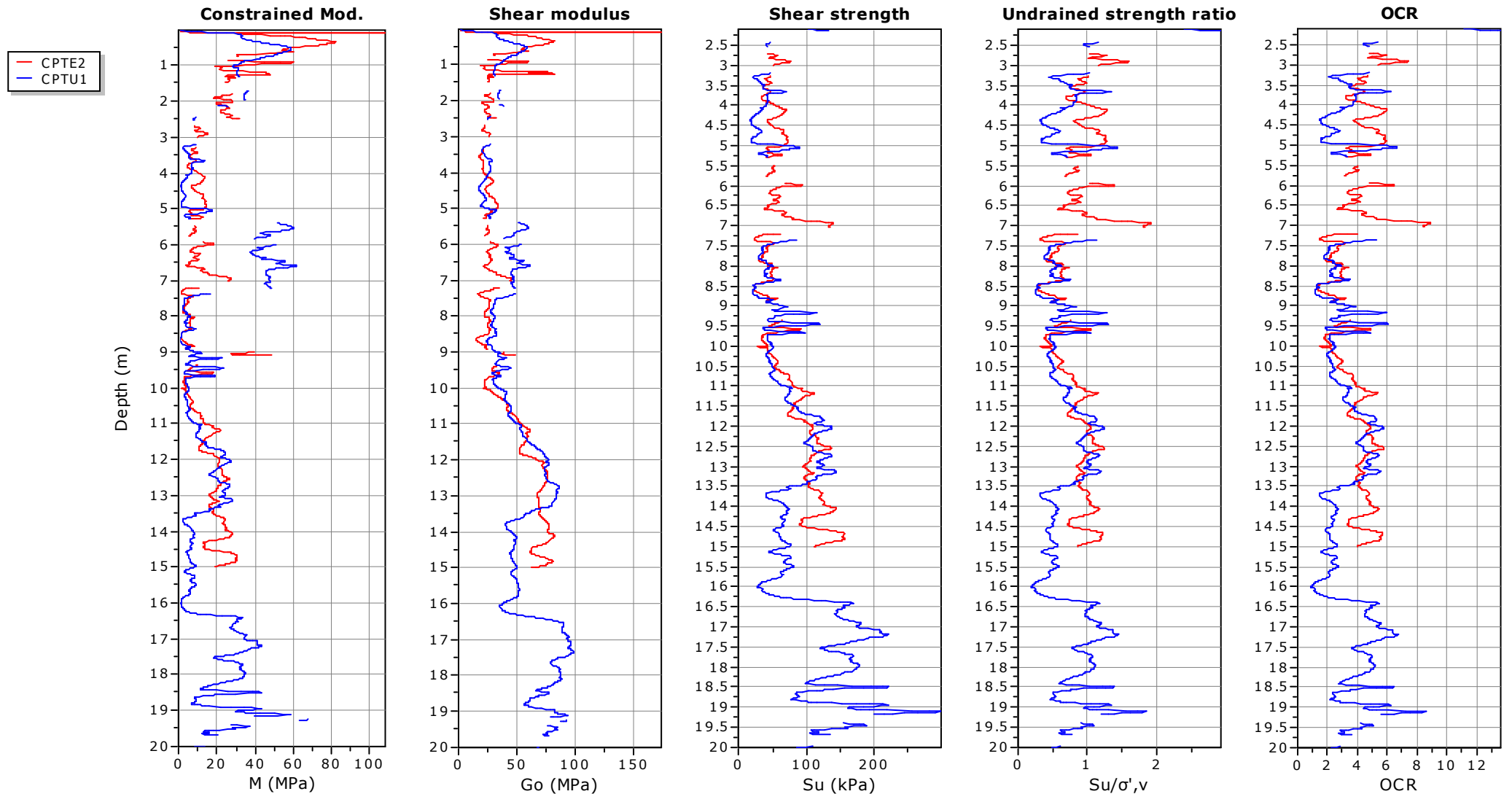
Normalized basic plots



Project:**Overlay estimation plots (1)**

Project:

Overlay estimation plots (2)



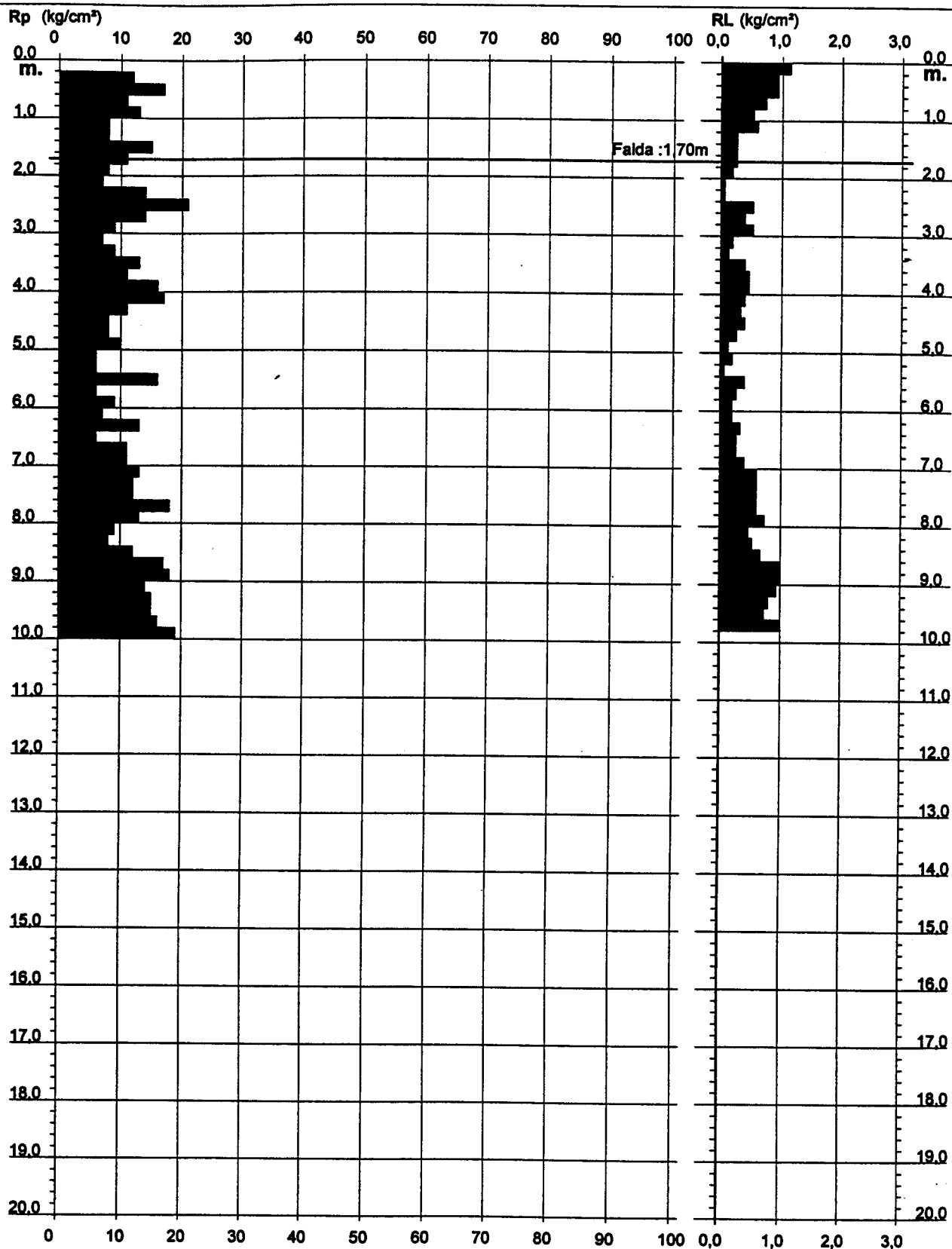
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 2

2.010496-03

- committente : Amministrazione Comunale di Pieve di Cento
- lavoro : Variante al P.R.G. 1998
- località : Pieve di Cento - Area n° 1 -

- data : 08/10/1995
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 1,70 m da quota iniz.
- scala vert.: 1 : 100



PROVA PENETROMETRICA STATICA LETTURE DI CAMPAGNA / VALORI DI RESISTENZA

CPT 2

2.010496-03

- committente : Amministrazione Comunale di Pieve di Cento
- lavoro : Variante al P.R.G. 1998
- località : Pieve di Cento - Area n° 1 -
- note :

- data : 08/10/1995
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 1,70 m da quota inizio
- pagina : 1

Prof. m	RP/10 kg/cm ²	RL/10 kg/cm ²	Qc kg/cm ²	fs kg/cm ²	Qc/fs	Prof. m	RP/10 kg/cm ²	RL/10 kg/cm ²	Qc kg/cm ²	fs kg/cm ²	Qc/fs
0,20	—	—	—	1,13	—	5,20	3,0	4,0	6,0	0,20	30,0
0,40	6,0	14,5	12,0	0,93	13,0	5,40	3,0	4,5	6,0	0,07	90,0
0,60	8,5	15,5	17,0	0,93	18,0	5,60	8,0	8,5	16,0	0,40	40,0
0,80	5,5	12,5	11,0	0,73	15,0	5,80	3,0	6,0	6,0	0,27	22,0
1,00	6,5	12,0	13,0	0,53	24,0	6,00	4,5	6,5	9,0	0,20	45,0
1,20	4,0	8,0	8,0	0,60	13,0	6,20	3,5	5,0	7,0	0,20	35,0
1,40	4,0	8,5	8,0	0,27	30,0	6,40	6,5	8,0	13,0	0,33	39,0
1,60	7,5	9,5	15,0	0,27	56,0	6,60	3,0	5,5	6,0	0,27	22,0
1,80	5,5	7,5	11,0	0,27	41,0	6,80	5,5	7,5	11,0	0,27	41,0
2,00	4,0	6,0	8,0	0,20	40,0	7,00	5,5	7,5	11,0	0,40	27,0
2,20	3,5	5,0	7,0	0,07	105,0	7,20	6,5	9,5	13,0	0,60	22,0
2,40	7,0	7,5	14,0	0,07	210,0	7,40	6,0	10,5	12,0	0,60	20,0
2,60	10,5	11,0	21,0	0,53	39,0	7,60	6,0	10,5	12,0	0,60	20,0
2,80	7,0	11,0	14,0	0,40	35,0	7,80	9,0	13,5	18,0	0,60	30,0
3,00	4,5	7,5	9,0	0,53	17,0	8,00	6,5	11,0	13,0	0,73	18,0
3,20	3,5	7,5	7,0	0,20	35,0	8,20	4,5	10,0	9,0	0,47	19,0
3,40	4,5	6,0	9,0	0,13	67,0	8,40	4,0	7,5	8,0	0,53	15,0
3,60	6,5	7,5	13,0	0,40	32,0	8,60	6,0	10,0	12,0	0,67	18,0
3,80	5,5	8,5	11,0	0,47	24,0	8,80	8,5	13,5	17,0	1,00	17,0
4,00	8,0	11,5	16,0	0,47	34,0	9,00	9,0	16,5	18,0	1,00	18,0
4,20	8,5	12,0	17,0	0,40	42,0	9,20	7,0	14,5	14,0	0,93	15,0
4,40	5,5	8,5	11,0	0,33	33,0	9,40	7,5	14,5	15,0	0,80	19,0
4,60	4,0	6,5	8,0	0,40	20,0	9,60	7,5	13,5	15,0	0,73	20,0
4,80	4,0	7,0	8,0	0,27	30,0	9,80	8,0	13,5	16,0	1,00	16,0
5,00	5,0	7,0	10,0	0,13	75,0	10,00	9,5	17,0	19,0	—	—

- PENETROMETRO STATICO tipo GOUDA da 12 t - (con anello allargatore) -
- COSTANTE DI TRASFORMAZIONE Ct = 20 - Velocità Avanzamento punta 2 cm/s
- punta meccanica tipo Begemann ø = 35,7 mm (area punta 10 cm² - apertura 60°)
- manicotto laterale (superficie 150 cm²)

PENETROMETRIA n° 1

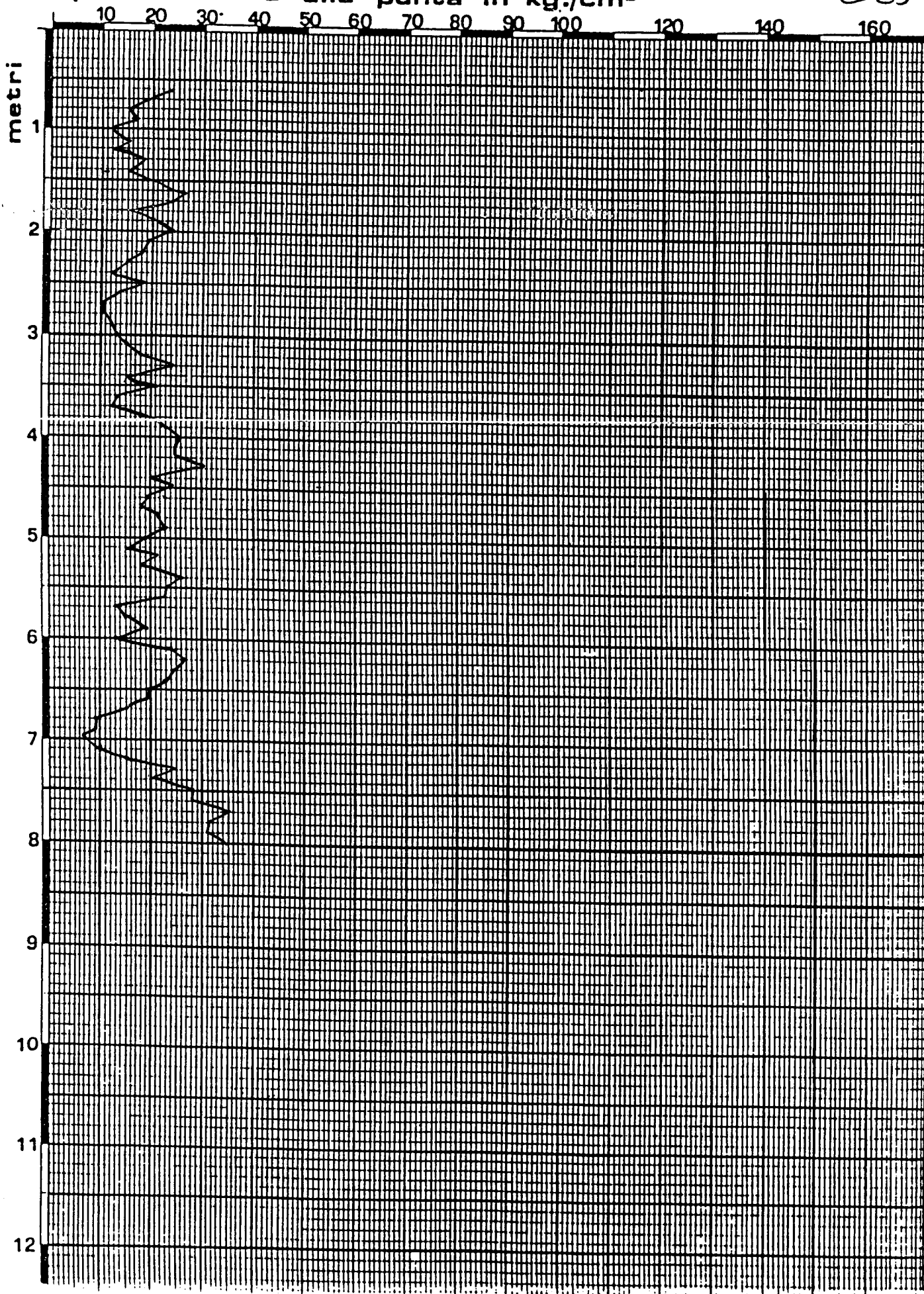
data OTTOBRE 84

località PIEVE DI CENTO

202080

Rp. resistenza alla punta in kg./cm²

629



PENETROMETRIA n° 2

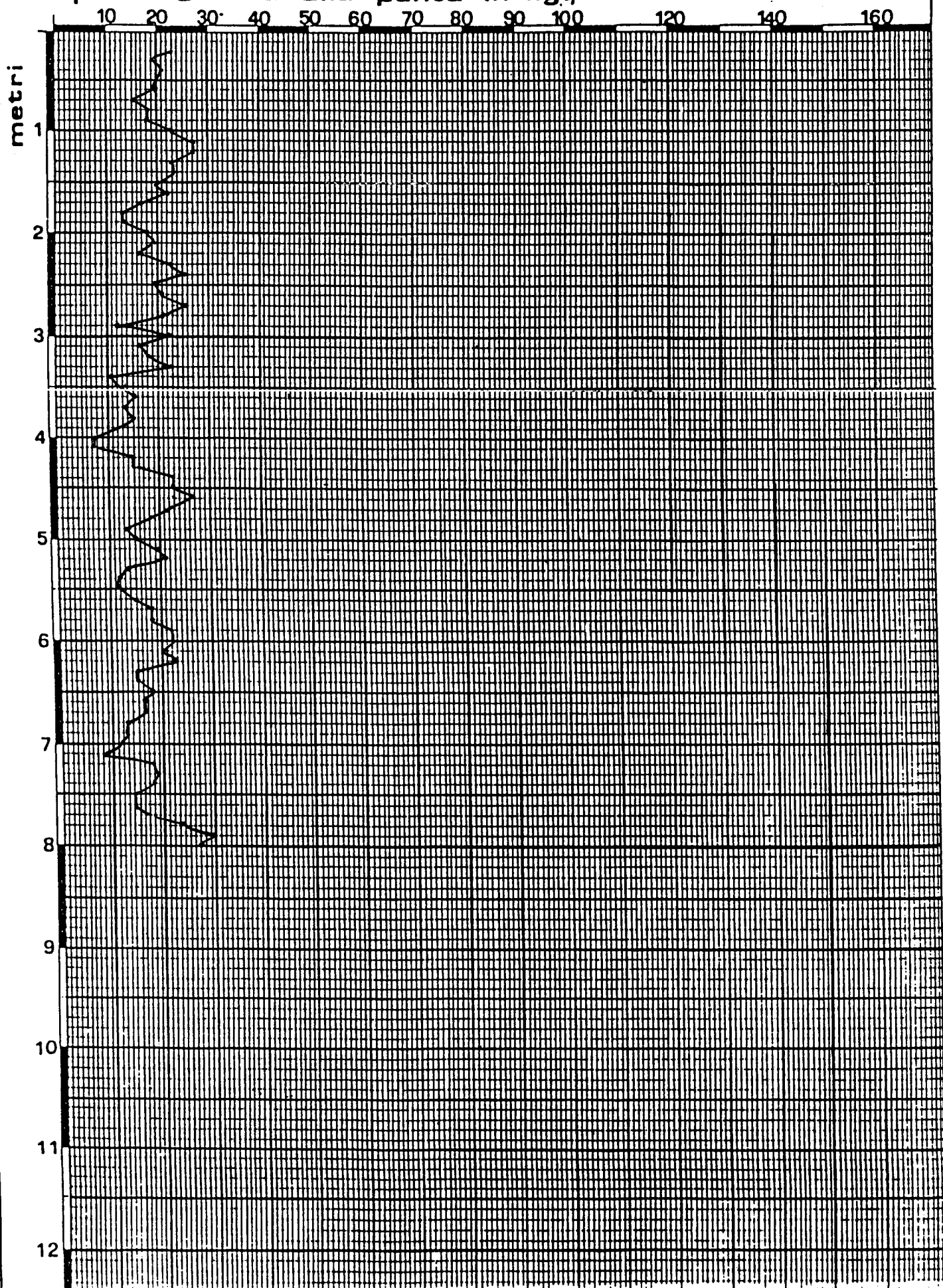
data ott. 84

località PIEVE DI CENTO

202080

C030

Rp. resistenza alla punta in kg./cm²



PENETROMETRIA n° 3

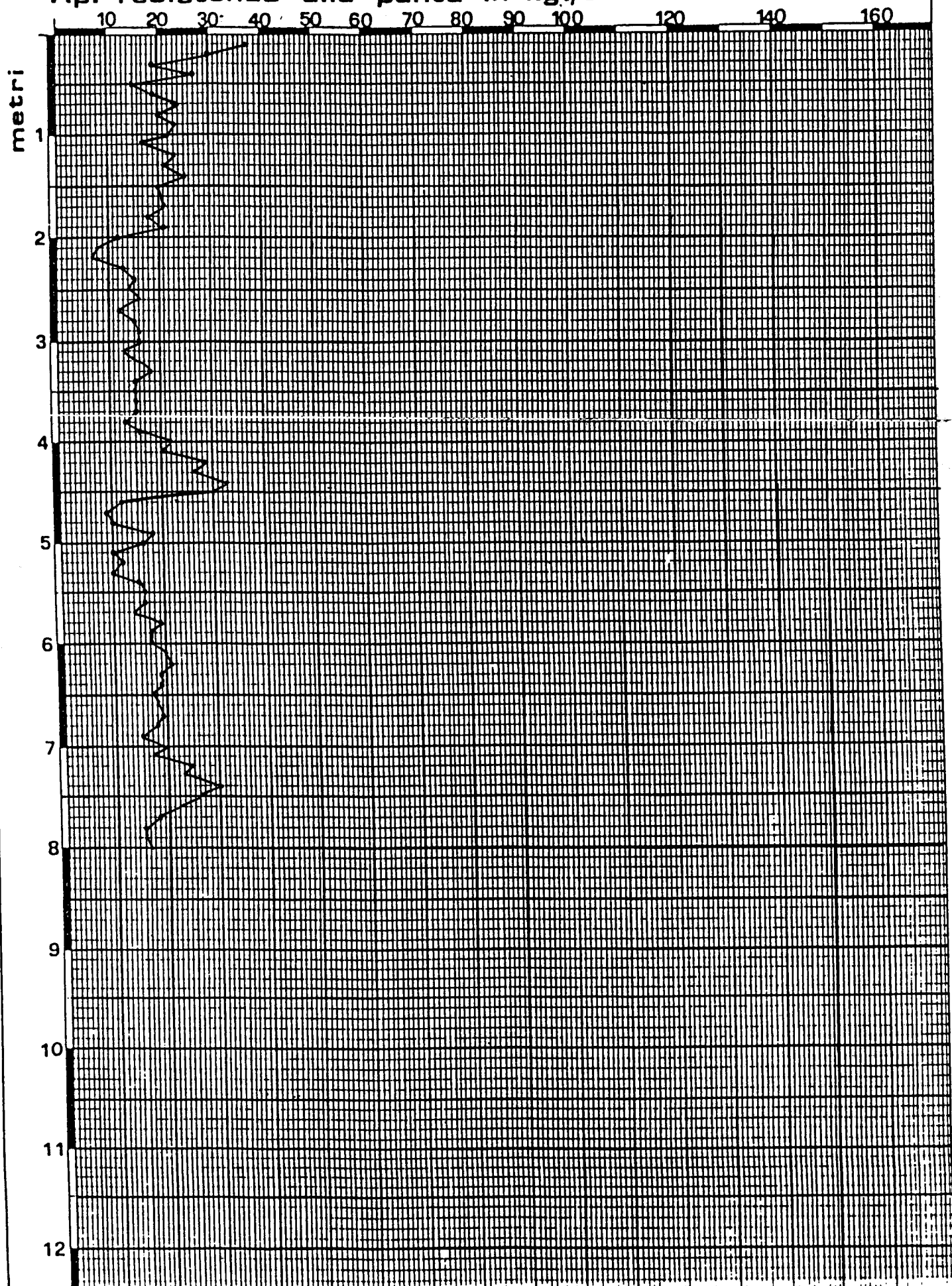
data OTTOBRE 84

località PIEVE DI CENTO

202080

C031

Rp. resistenza alla punta in kg./cm²



PENETROMETRIA n° 4

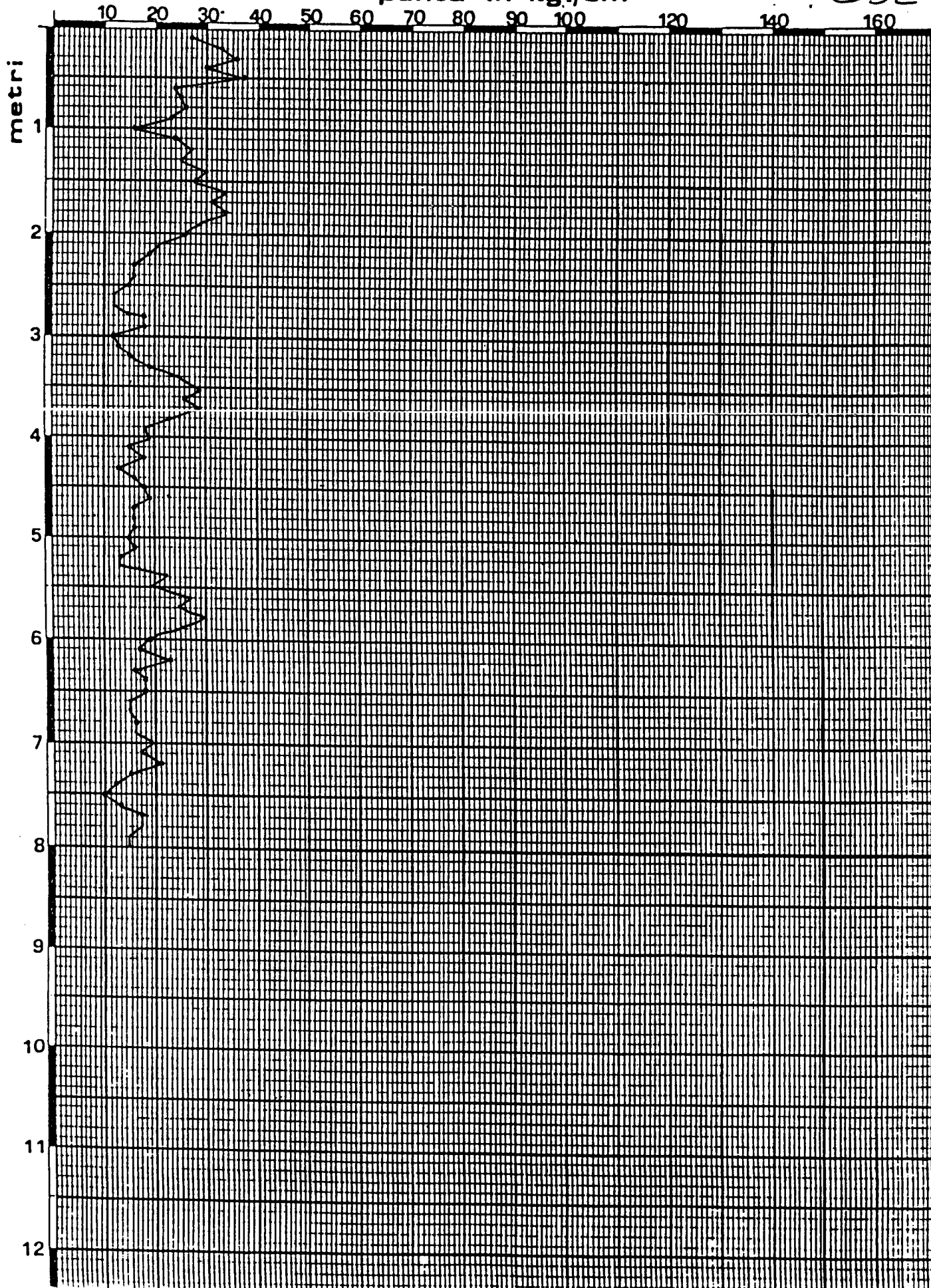
data OTTOBRE 84

località PIEVE DI CENTO

202080

Rp. resistenza alla punta in kg./cm²

632



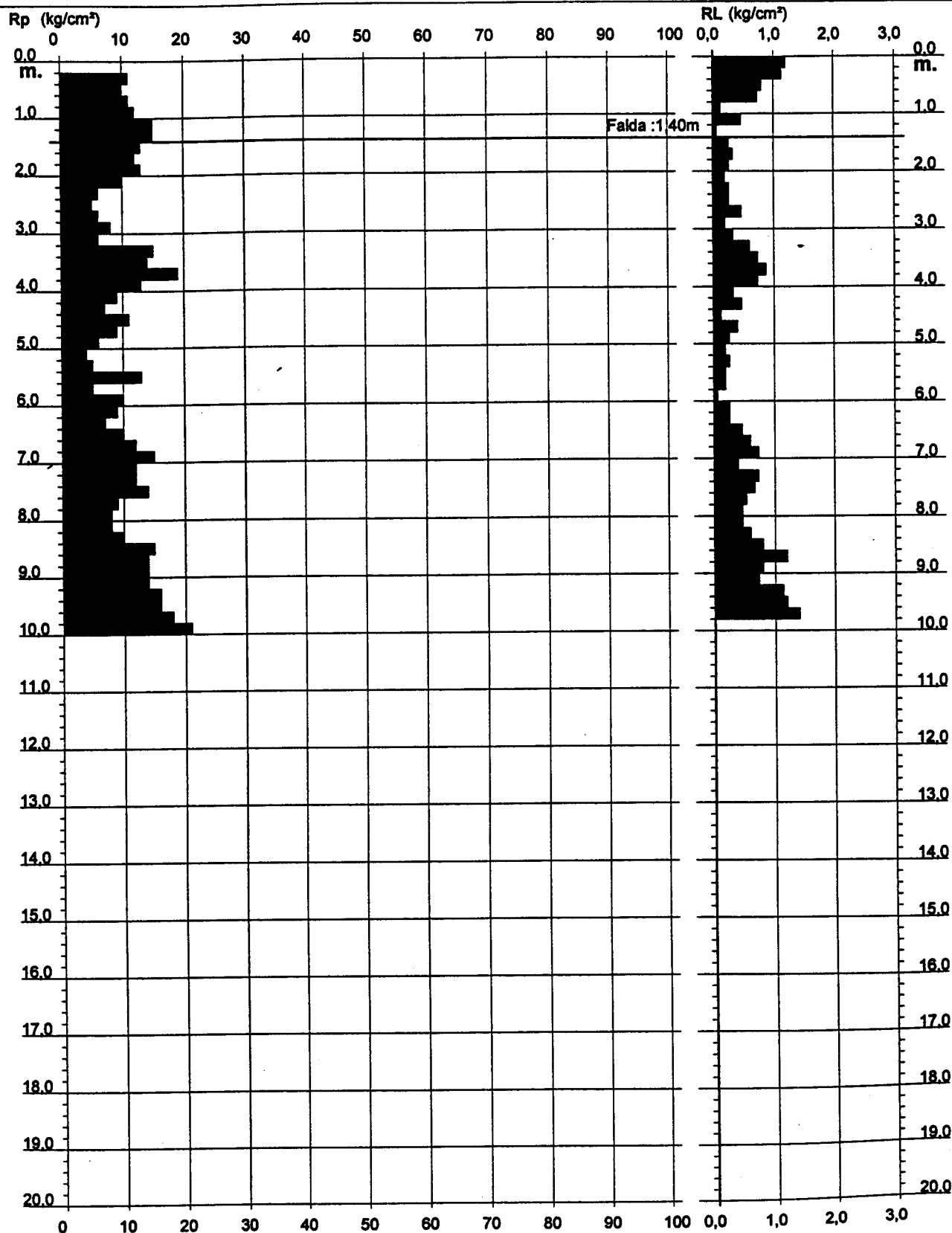
PROVA PENETROMETRICA STATICA DIAGRAMMA DI RESISTENZA

CPT 1

2.010496-03

- committente : Amministrazione Comunale di Pieve di Cento
- lavoro : Variante al P.R.G. 1998
- località : Pieve di Cento - Area n° 1 -

- data : 08/10/1995
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 1,40 m da quota inizio
- scala vert.: 1 : 100



UBICAZIONE COL12 - COL13

PROVA PENETROMETRICA STATICA LETTURE DI CAMPAGNA / VALORI DI RESISTENZA

CPT 1

2.010496-03

- committente : Amministrazione Comunale di Pieve di Cento
- lavoro : Variante al P.R.G. 1998
- località : Pieve di Cento - Area n° 1 -
- note :

- data : 08/10/1995
- quota inizio : Piano Campagna
- prof. falda : 1,40 m da quota inizio
- pagina : 1

Prof. m	RP/10 kg/cm ²	RL/10 kg/cm ²	Qc kg/cm ²	fs kg/cm ²	Qc/fs	Prof. m	RP/10 kg/cm ²	RL/10 kg/cm ²	Qc kg/cm ²	fs kg/cm ²	Qc/fs
0,20	—	—	—	1,20	—	5,20	2,0	4,0	4,0	0,20	20,0
0,40	5,5	14,5	11,0	1,13	10,0	5,40	2,5	4,0	5,0	0,27	19,0
0,60	5,0	13,5	10,0	0,80	12,0	5,60	6,5	8,5	13,0	0,20	65,0
0,80	5,5	11,5	11,0	0,73	15,0	5,80	2,5	4,0	5,0	0,20	25,0
1,00	6,0	11,5	12,0	0,13	90,0	6,00	5,0	6,5	10,0	0,07	150,0
1,20	7,5	8,5	15,0	0,47	32,0	6,20	4,5	5,0	9,0	0,27	34,0
1,40	7,5	11,0	15,0	0,07	225,0	6,40	3,5	5,5	7,0	0,27	26,0
1,60	6,5	7,0	13,0	0,27	49,0	6,60	5,0	7,0	10,0	0,47	21,0
1,80	6,0	8,0	12,0	0,33	36,0	6,80	6,0	9,5	12,0	0,60	20,0
2,00	6,5	9,0	13,0	0,27	49,0	7,00	7,5	12,0	15,0	0,73	20,0
2,20	5,0	7,0	10,0	0,20	50,0	7,20	6,0	11,5	12,0	0,40	30,0
2,40	3,0	4,5	6,0	0,27	22,0	7,40	6,0	9,0	12,0	0,73	16,0
2,60	2,5	4,5	5,0	0,27	19,0	7,60	7,0	12,5	14,0	0,67	21,0
2,80	3,0	5,0	6,0	0,47	13,0	7,80	4,5	9,5	9,0	0,53	17,0
3,00	4,0	7,5	8,0	0,20	40,0	8,00	4,0	8,0	8,0	0,47	17,0
3,20	3,0	4,5	6,0	0,33	18,0	8,20	4,0	7,5	8,0	0,47	17,0
3,40	7,5	10,0	15,0	0,60	25,0	8,40	5,0	8,5	10,0	0,60	17,0
3,60	7,0	11,5	14,0	0,73	19,0	8,60	7,5	12,0	15,0	0,80	19,0
3,80	9,5	15,0	19,0	0,87	22,0	8,80	7,0	13,0	14,0	1,20	12,0
4,00	6,5	13,0	13,0	0,73	18,0	9,00	7,0	16,0	14,0	0,80	17,0
4,20	4,5	10,0	9,0	0,33	27,0	9,20	7,0	13,0	14,0	0,73	19,0
4,40	3,5	6,0	7,0	0,47	15,0	9,40	8,0	13,5	16,0	1,13	14,0
4,60	5,5	9,0	11,0	0,13	82,0	9,60	8,0	16,5	16,0	1,20	13,0
4,80	4,5	5,5	9,0	0,40	22,0	9,80	9,0	18,0	18,0	1,40	13,0
5,00	3,0	6,0	6,0	0,27	22,0	10,00	10,5	21,0	21,0	—	—

- PENETROMETRO STATICO tipo GOUDA da 12 t - (con anello allargatore) -
- COSTANTE DI TRASFORMAZIONE Ct = 20 - Velocità Avanzamento punta 2 cm/s
- punta meccanica tipo Begemann $\phi = 35.7$ mm (area punta 10 cm² - apertura 60°)
- manicotto laterale (superficie 150 cm²)