

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA

Provincia di Lodi



studio della componente geologica, idrogeologica e sismica della variante generale al Piano di Governo del Territorio

Aggiornamento alle DGR 30 novembre 2011 - n. IX/2616 riguardante la componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT, alla DGR del 30 marzo 2016 n. 5001 concernente le funzioni trasferite ai comuni in materia sismica, DGR 6738 del 19 giugno 2017 relativa all'attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza e Regolamenti regionali 23 novembre 2017 - n. 7 e 19 aprile 2019 n. 8 sull'invarianza idraulica e idrologica.

RELAZIONE GEOLOGICA GENERALE

NOVEMBRE 2021

GEOLOGO

Dott. Angelo Scotti
via Lungo Adda 24 Pizzighettone (Cr)
n° 763 Ordine dei Geologi della Lombardia

Sommario

1	PREMESSA E SINTESI	3
2	METODI DI INDAGINE.....	6
3	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO GENERALE.....	6
3.1	Segnalazione di FAGLIE CAPACI nel database Itaca.....	12
4	CENNI DELL'EVOLUZIONE STORICA RECENTE DEL TERRITORIO.....	14
5	GEOMORFOLOGIA ED ELEMENTI DI PEDOLOGIA.....	14
5.1	Processi genetici.....	14
5.2	Caratteri morfologici locali e commento della tavola 1.....	16
5.3	Elementi di pedologia.....	20
5.3.1	Sintesi delle caratteristiche.....	20
5.3.2	Aspetti applicativi delle caratteristiche pedologiche.....	23
6	IDROGRAFIA E IDROLOGIA.....	26
7	IDROGEOLOGIA - ASPETTI GENERALI	26
7.1	Caratteristiche generali e stratigrafia dei pozzi.....	26
7.2	Alimentazione e deflusso degli acquiferi di Castiglione d'Adda.....	36
7.3	Caratteri idraulici e geochimici dell'acquifero di Castiglione d'Adda.....	43
7.4	Caratteristiche dell'acquifero riferito nel PTUA 2006	48
7.5	Elaborati prodotti per il PTUA 2016	52
8	VULNERABILITÀ DELLA FALDA FREATICA ALL'INQUINAMENTO	58
9	ASPETTI GEOTECNICI	58
9.1	Dati disponibili e descrizione generale.....	58
9.2	Stima del carico limite, dei cedimenti e delle Vs dai dati CPT.....	62
9.2.1	Criteri di valutazione	62
9.2.2	Risultati delle elaborazioni e relativi commenti	64
10	ASPETTI SISMOLOGICI E RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	69
10.1	Riferimenti normativi e definizioni	69
10.2	Cenni sulla sismologia del territorio	74
10.3	Stima del rischio di liquefazione	77
11	ESECUZIONE DELLE PROVE MASW-RE.MI E H/V.....	82
11.1	Descrizione delle metodologie geofisiche impiegate	85
11.1.1	Tecniche MASW-ReMi.....	85
11.1.2	Misure H/V - Cenni sul metodo	87
11.2	Esito delle prove Masw-Re.Mi. e HVSR.....	89
12	VALUTAZIONE EFFETTI SISMICI DI SITO: 2 ^A LIVELLO DI APPROFONDIMENTO 102	
13	NORME GEOLOGICHE DI PIANO E CLASSI DI FATTIBILITÀ.....	108

1 Premessa e sintesi

La presente relazione illustra l'esito dei rilievi e delle elaborazioni condotte in esecuzione alla determina del responsabile del servizio tecnico n. 169/58 del 15 settembre 2020, per la definizione degli aspetti geologici, idrogeologici e sismici del territorio comunale del Piano di Governo del Territorio ai sensi della DGR 30 novembre 2011 - n. IX/2616 riguardante la componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT.

Il documento, gli allegati e le tavole prodotte costituiscono principalmente un adeguamento alla normativa introdotta nei dodici anni trascorsi dall'approvazione dell'ultimo studio geologico di PGT (delibera 59 c.c. del 22 dicembre 2009), riguardanti in particolare il rischio sismico con la DGR del 30 marzo 2016 n. 5001, l'attuazione di interventi di tutela idrogeologica con il Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (PGRA) e l'associata DGR 6738 del 19 giugno 2017 che regola gli effetti del piano nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza e con il Regolamento Regionale 23 novembre 2017 - n. 7, aggiornato con il RR 19 aprile 2019 n. 8, che riguardano i criteri e metodi da adottare negli interventi sul territorio e nella pianificazione per il rispetto del principio dell'invarianza idraulica ed idrologica. Altro atto rilevante riguarda l'approvazione da parte di Regione Lombardia del nuovo Piano di Tutela delle Acque (PTA), che ha lo scopo di regolamentare le risorse idriche della regione attraverso la pianificazione della tutela qualitativa e quantitativa delle acque e che si compone del documento di indirizzo e del Programma di Tutela delle acque (PTUA) approvato con d.g.r. n. 6990 del 31 luglio 2017.

L'indagine sul terreno è stata svolta tra settembre e novembre 2021 per verificare l'eventuale esistenza di variazioni significative del paesaggio o la presenza di pericoli di carattere idrogeologico non noti, senza riscontrare in nessuna parte del territorio particolare problematicità. Si segnala comunque l'intervento di ricostruzione e rifacimento della protezione spondale eseguito dal Consorzio di Bonifica Muzza nel 2017 in corrispondenza del ponte canale della roggia Regona sul colatore Muzza, circa 120 - 350 metri a valle del ponte della SP ex SS 591 sul colatore stesso, in seguito ai danni provocati dagli eventi meteorologici critici di novembre 2014.

L'analisi è stata eseguita tenendo conto dei dati e delle elaborazioni già sviluppate nello studio geologico per la variante generale del PRG del 1998, prodotta ai sensi della L.R. n. 41/1997 e parzialmente aggiornata a dicembre 2002 per recepire il "*Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico per il bacino idrografico di rilievo nazionale del fiume Po*" (PAI) (D.P.C.M. 24 maggio 2001), degli effetti della piena dell'Adda di novembre 2002 e nonché delle elaborazioni svolte per il PGT del 2009 che è corredato da numerose indagini geotecniche in parte appositamente svolte e in parte aggiunte a seguito di interventi dello scrivente o di colleghi nel territorio, ampliate con due ulteriori misure penetrometriche eseguite dallo scrivente nel 2011 e 2013 per progetti edilizi e da indagini sismiche eseguite da un collega a luglio 2020 poco a est del civico 18 di via Marconi e nel mese di maggio 2021 in via Umberto I, in prossimità dell'intersezione con la SP 26.

Tre specifiche indagini sismiche sono state eseguite per il presente PGT nel mese di maggio 2021 ed hanno riguardato l'area dell'AT 5, quella dell'AT 3 e nell'area verde a nord degli edifici scolastico e palestra delle scuole medie.

Rispetto a tali documenti il presente costituisce un complessivo aggiornamento in particolare delle elaborazioni svolte dagli enti a seguito dell'introduzione delle norme sopra richiamate e un'integrazione concernente il comportamento sismico dei terreni nell'area urbana con l'esecuzione delle sopra richiamate indagini sismiche con metodi MASW e RE.Mi e misure H/V.

Si conferma peraltro l'elaborazione prodotta nel 2009 in merito alla soggiacenza e al deflusso della prima falda, che è stata osservata alla quota prevista da tale documento con le due indagini geotecniche citate ed eseguite nel 2011 e 2013, nonché dell'elaborazione della vulnerabilità della prima falda con la procedura SINTAC, che viene comunque riproposta nel presente elaborato dopo averne verificato la affidabilità.

Le conoscenze sulle caratteristiche idrologiche e idrauliche del fiume Adda e gli effetti sul territorio circostante, già delineate negli studi per il PAI, sono state approfondite in indagini condotte dall'Autorità di bacino del Fiume Po condotte negli anni dal 2003 al 2005 ⁽¹⁾ e in seguito impiegate per la redazione delle mappe del PGRA. Gli elaborati tecnici forniti all'epoca dalla struttura regionale sono state riportate per il territorio di Castiglione d'Adda con alcune lievi modifiche rispetto al 2009 nell'allegato 2 al presente documento.

La raccolta della documentazione e le elaborazioni hanno consentito di confermare il quadro emerso nello studio precedente (si vedano i dati e i grafici al termine del testo), rilevando l'assenza di importanti problematiche di carattere geotecnico per la realizzazione d'interventi ordinari nell'area urbana e periferica, che mostrano una considerevole uniformità oltre la profondità di 2–3 m dove sono nettamente prevalenti sabbie limose di media densità almeno per una decina di metri.

Fanno eccezione solo l'esito di due prove penetrometriche che presentano terreni compressibili e di bassa resistenza al taglio nei primi metri: la prova CPT 3/3 eseguita nel 2008 in via del Fossone (coordinate x=554173, Y=5006707) che mostra uno strato molto compressibile tra -0,8 e -2,2 metri circa dalla superficie per ragioni che non paiono spiegabili in base ai dati disponibili e che è opportuno siano approfondite in caso di interventi in zona, e la prova CPT 8/8 eseguita nel febbraio del 1998 in via Enrico Fermi (coordinate X = 554013; Y= 5007670), dove però la presenza di depositi di scarsa resistenza tra -2,0 e -4,2 metri è ben associabile con la presenza di un chiaro paleo meandro dell'Adda formatosi in epoca precedente i primi anni del 1700.

La valutazione del comportamento meccanico dei terreni, per praticità e sintesi, è espressa nelle Figura 41 e Figura 42 dai valori di carico limite e dei cedimenti calcolati per

¹ *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica:- del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po,- del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda, del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda.* Attività 3.X.2.1.: Definizione delle portate di piena di riferimento. Elaborato 3.X.2.1./1/1R: Relazione descrittiva e di analisi. Autorità di bacino del fiume Po, 03/06/2003

fondazioni superficiali ordinarie per piccoli edifici di 0,6 m di larghezza posate a -0,8 m dalla superficie che trasmettono al terreno carichi di 120 - 180 kPa.

Vista la rilevanza dell'argomento si è ritenuto opportuno esporlo anche per il lavoro odierno, aggiungendo come detto, l'esito di ulteriori prove penetrometriche.

La presenza di sabbie sature talora a pochi metri dalla superficie ha richiesto di porre attenzione intorno alla valutazione del rischio di liquefazione dei terreni sotto le fondazioni in caso di eventi sismici. L'elaborazione dei dati delle prove CPT (§ 10.3) ha evidenziando, anche per quest' aspetto, il basso o nullo grado di pericolosità del territorio.

NOTA: La descrizione dei criteri impiegati per la formazione della cartografia e per interpretare le prove penetrometriche statiche con punta meccanica non è qui riproposta per semplicità di esposizione, confermando la validità di quanto riferito nel documento del 2009. Anche per questo aspetto vi sono due eccezioni che riguardano la prova CPT 29 di via la Valle Bassa eseguita a novembre 2013 e la prova CPT 30 di cascina Vinzaschina, la cui interpretazione è stata effettuata impiegando procedure più moderne di quelle usate in precedenza, mediante il software CPeT-IT della GeoLogismiki che è basato sulla revisione completa della pubblicazione T. Lunne, P.K. Robertson and J.J.M. Powell, *Cone Penetration testing in Geotechnical Practice*, Taylor & Francis Group Spon Press (London, Jan 1997).

È conveniente precisare inoltre che le tavole allegate sono state elaborate partendo dalla base cartografica in formato shp file disponibile sul Geoportale regionale. L'utilizzo di tale documento non è parso però consentire un miglioramento del risultato, in particolare perché le quote a terra nelle aree agricole sono concentrate intorno alle strade principali e ai nuclei abitati e non consentono di cogliere in dettaglio le variazioni morfologiche dei terreni che formano la scarpata principale di erosione fluviale e le aree più a valle perché le distanze tra i punti quotati sono mediamente di circa 300 metri. Inoltre le differenze di quota rispetto alla cartografia impiegata nel 2009, prodotta da SCADI alla fine del '900, sono spesso dell'ordine del metro e non è possibile stabilire quali tra i dati delle due cartografie siano le più attendibili, perché le incertezze previste per la cartografia in scala 1:5000 della Regione Lombardia (DBT) sono della stessa entità.

La ricostruzione della morfologia con i dati tratti dal Geoportale è stata fatta, come nel 2009, impiegando il software Surfer ® ora nella versione 2009 ed utilizzando il metodo l'algoritmo di interpolazione di base denominata *Point Kriging e variogramma lineare*, inserendo in questo caso 1585 punti quotati al posto dei 1261 punti inseriti nel 2009.

2 Metodi di indagine

Capitolo omesso – è stata mantenuta solo la numerazione dei paragrafi rispetto al 2009.

Quando è aggiunto un testo significativo non presente nel 2009 o modificato, questo, di massima, è evidenziato con un colore di sfondo, salvo che il capitolo sia interamente nuovo.

3 Inquadramento geografico e geologico generale

Il territorio del Comune di Castiglione d'Adda interessa una porzione centro meridionale della Provincia di Lodi di 13,11 Km² di estensione, che si sviluppa per intero lungo la sponda destra del Fiume Adda che ne delimita il confine orientale, salvo per una modestissima superficie di circa 1500 m² presente in sponda sinistra, di fronte allo scarico della lanca dell'Adda Morta in Adda.

L'area è rappresentata nelle tavole C7c2 S. Bassiano, C7c3 Formigara, C7b3 Castiglione, C7b2 Turano Lodigiano della Carta Tecnica Regionale (CTR scala 1:10.000), e nei fogli n. 60 IV SE Casalpusterlengo e n. 60 I SW Pizzighettone dell'I.G.M. in scala 1:25.000.

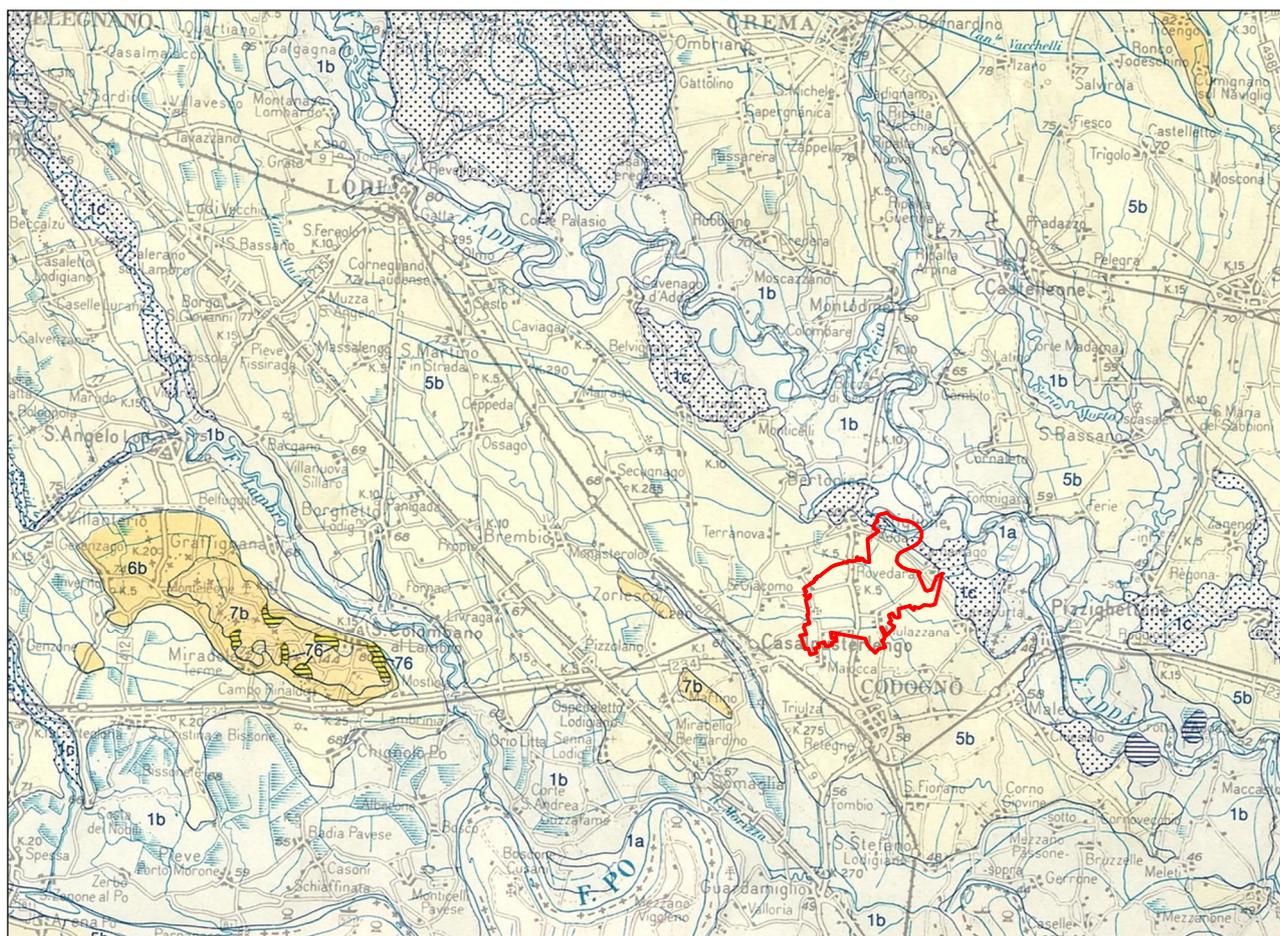


Figura 1: individuazione del territorio comunale nella “Carta Geologica della Lombardia” 1990, Servizio Geologico Nazionale – Univ. di Milano – Regione Lombardia – CNR, riprodotta in scala 1: 250.000 dall’originale in scala 1: 250.000.

1b: alluvioni terrazzate medie; **1c:** alluvioni terrazzate antiche; **5b:** fluviale Würm, sabbie limose con ghiaietto; **6b** fluvioglaciale, fluviale e lacustre Riss: ghiaie, sabbie e argille ferrettizzate; **7b** fluvioglaciale, fluviale e lacustre Mindel: ghiaie, limi e argille fortemente ferrettizzate; **76:** formazione di San Colombano : argille, calcari, conglomerati.

Circa il 37% della superficie (4,8 km²) si estende su terreni che costituiscono dell'unità morfologica e stratigrafica tardo pleistocenica comunemente denominata "*livello principale della pianura*" (unità 5b nella Figura 1), che presenta una acclività compresa tra il 2,0‰ e il 4,2‰ da SW a NE (Figura 8 e Tavola 1 allegata), e quote comprese tra 65 e 60 m s.l.m. La pendenza descritta è molto differente rispetto a quella media della pianura lodigiana, caratterizzata da valori dell'1,0 – 1,5 ‰ e direzione verso SE, ed anche se una moderata acclività verso la valle dell'Adda si riscontra in altre porzioni del lodigiano, questa appare meno accentuata di quella presente a Castiglione d'Adda. È probabile che tale particolarità sia da collegare alla presenza di pieghe nel substrato roccioso (anticlinali sepolte) presenti più a sud, descritte nel successivo capitolo dedicato alla geologia del sottosuolo.

La restante porzione di territorio (8,3 km²) si estende all'interno della fascia dei depositi olocenici della "*valle di pianura*" del F. Adda, che formano un'area altimetricamente ribassata rispetto al "*livello fondamentale*" posta a nord e a est dell'abitato, con quote comprese tra 54 e 44 m s.l.m.

All'interno di quest'unità occorre distinguere la porzione di territorio a nord dell'abitato, caratterizzata dallo sbocco nella piana olocenica dell'Adda del colatore Muzza, dalla restante superficie interessata in tempi recenti dall'evoluzione dei meandri dell'Adda. Nel primo sotto ambito, esteso per circa 2,4 Km² (18,3 % del totale), è presente un terrazzo debolmente rilevato rispetto alla restante piana olocenica (unità 1c nella Figura 1), che mostra un'acclività relativamente regolare da WSW verso ENE con valori compresi tra il 3 ‰ ed il 5 ‰ e quote tra i 54 e 49 m s.l.m. Questo terrazzo termina circa in corrispondenza della SS 591, ad est della quale i terreni mostrano pendenze lievi con direzioni irregolari, tipiche delle aree perifluviali di recente formazione (unità 1b e 1a nella Figura 1).

Le unità descritte (piana tardo pleistocenica e piana olocenica) sono tra loro connesse da una scarpata di erosione fluviale di altezza compresa tra 5 e 14 metri, che talora ha subito notevoli modificazioni antropiche, in particolare in prossimità della chiesa di San Bernardino e nell'area della vecchia discarica cittadina in località Col di Lama. La scarpata taglia da NW verso SE il territorio comunale sviluppandosi per circa 4,5 Km e delimitando la parte settentrionale dell'abitato. L'acclività media è generalmente compresa tra i 15° ed i 30° (27 % - 58 %), con valori che si approssimano ai 40° (84%) lungo i 900 metri a nord ovest di Cascina Santa Maria dove si osserva anche il dislivello massimo dell'intero territorio pari a 15 metri.



Figura 2: a sinistra la zona boschiva della scarpata in prossimità della Cascina Santa Maria, a destra nell'area del Castello Pallavicino Serbelloni che presenta un dislivello di 10 metri.

I rilievi effettuati nel 2009 avevano mostrato la presenza di fenomeni di instabilità nei tratti più acclivi, in particolare nella porzione orientale tra il vicolo della Valle e la cascina Santa Maria, per la presenza di sabbie fini prive di frazioni coesive. L'osservazione effettuata nell'autunno del corrente anno ha segnalato la presenza di una copertura boschiva continua e l'assenza di aree instabili.

Il confine settentrionale del territorio è definito dal colatore Muzza, che probabilmente esercita una debole azione drenante nei confronti della falda freatica, salvo durante gli episodi di piena solitamente coincidenti con quelli dell'Adda, che in tali circostanze rigurgita le acque nel cavo. I confini occidentale e meridionale non risultano contrassegnati da alcun elemento fisiografico significativo, caratterizzandosi per la continuità della superficie agricola.

Il confine orientale è caratterizzato dalla presenza dell'alveo attivo dell'Adda, che entra nel territorio al Km 264,275 (Km 103,320 del tratto sottolacuale), e termina al Km 269,390 (Km 108,435 del tratto sottolacuale), interessando il territorio per 5,115 km che si riducono a 4,52 Km se si considera il reale confine amministrativo che all'estremità orientale si stacca dall'alveo e segue il percorso attivo alla fine del '800.

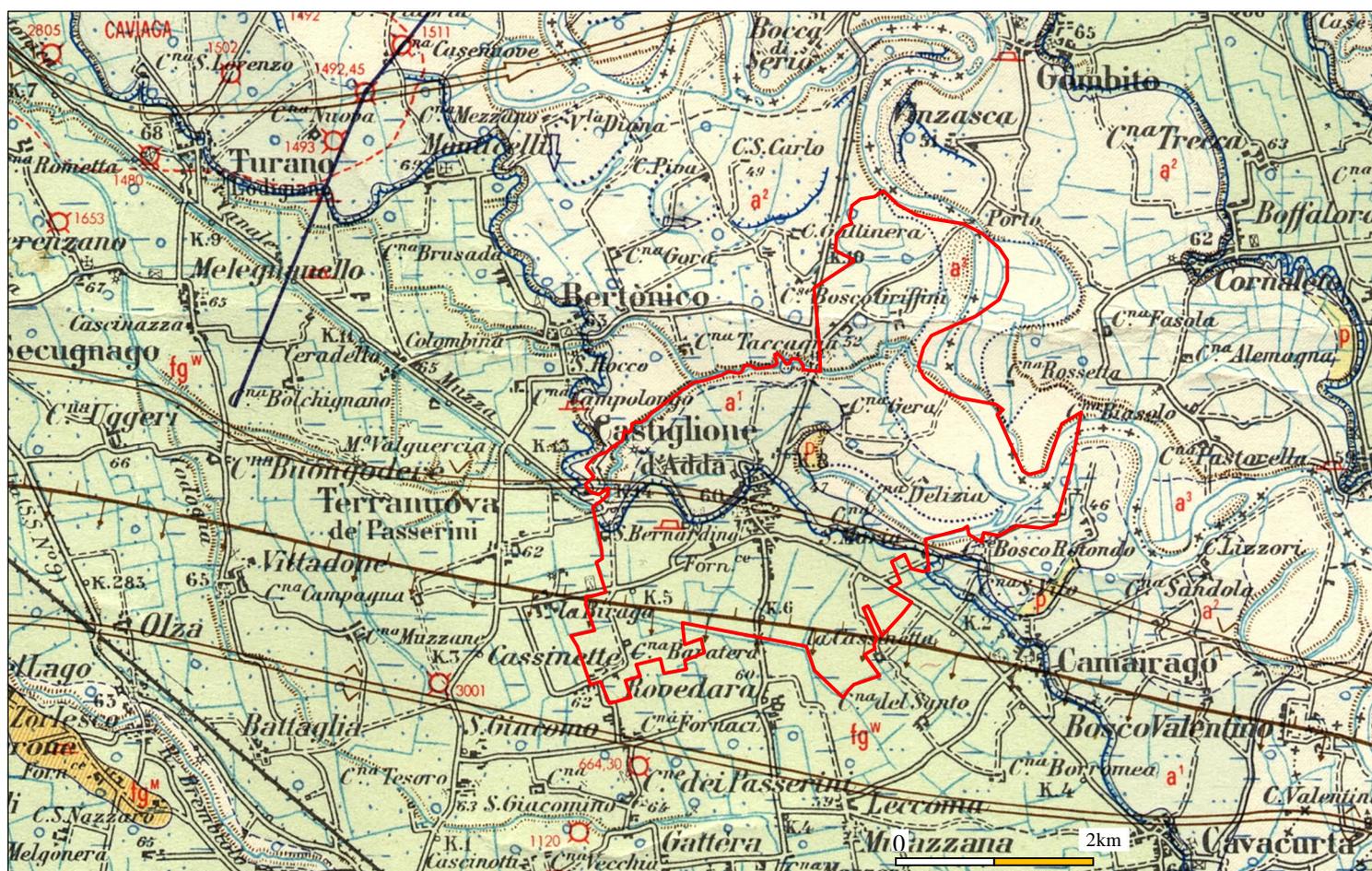


Figura 3: stralcio della carta geologica foglio 60. Rilievi degli anni 1962-63. fg^w: = alluvioni fluvioglaciali tardo pleistoceniche sabbiose del "livello fondamentale della pianura"; a¹ = alluvioni sabbiose ghiaiose e argillose limose postglaciali antiche; a² = alluvioni oloceniche recenti, ancora esondabili durante le piene più accentuate, formate da sedimenti da limo argillosi a sabbioso limosi con ghiaia fine, in parte depositatisi dopo una fase di erosione, ma che talora rappresentano semplici superfici di erosione; p = depositi dei bacini palustri prevalentemente argillosi e torbosi neri; a³ = alluvioni attuali: ghiaie e sabbie fresche delle fasce golenali e delle lanche che bordano i corsi d'acqua.

< || > anticlinale; > || < sinclinale;

 faglia inversa

La distanza della foce in Po è di 29,854 Km nel punto più a monte e di 24,739 Km in quello più a valle.

La descrizione del territorio fornito nella carta geologica ufficiale, foglio 60 Piacenza, è riferito in Figura 3 e nella relativa legenda.

La carta rileva in particolare la presenza lungo l'allineamento circa coincidente con quello della scarpata principale, dell'asse di un'importante sinclinale che attraversa tutto il lodigiano centro meridionale, da Crotta d'Adda a Secugnago – Ossago – Villanova del Sillaro.

La struttura sepolta è interposta tra due anticlinali anch'esse estese per tutto il lodigiano ed oltre. A nord è presente l'alto strutturale che ospita i campi gassiferi di Caviaga e Cornegliano Laudense, sottolineati in carta dai numerosi pozzi per estrazione di gas realizzati negli anni '50 e '60 e visibili all'estremità nord ovest dello stralcio cartografico. L'asse della piega che passa circa 5 km a nord dell'abitato di Castiglione d'Adda e si sviluppa verso est entrando ampiamente nel territorio cremonese. A sud s'individua il complesso fascio di anticlinali e faglie inverse che determinano il sollevamento del substrato marino e di transizione del pleistocene inferiore – pliocene, che appare sub affiorante nelle aree tra Codogno, Casalpusterlengo, Zorlesco, Ospedaletto e Somaglia ⁽²⁾.

Le proiezioni sulla superficie delle strutture positive del substrato a sud di Castiglione d'Adda sono segnalate nella porzione meridionale del territorio, lungo l'allineamento Biraga – C.na la Cassinetta, e poco a sud del confine comunale, tra la località Fornaci di Terranova dei Passerini, la Mulazzana di Codogno e Cavacurta. La direzione di queste strutture è parallela a quella della sinclinale descritta in precedenza.

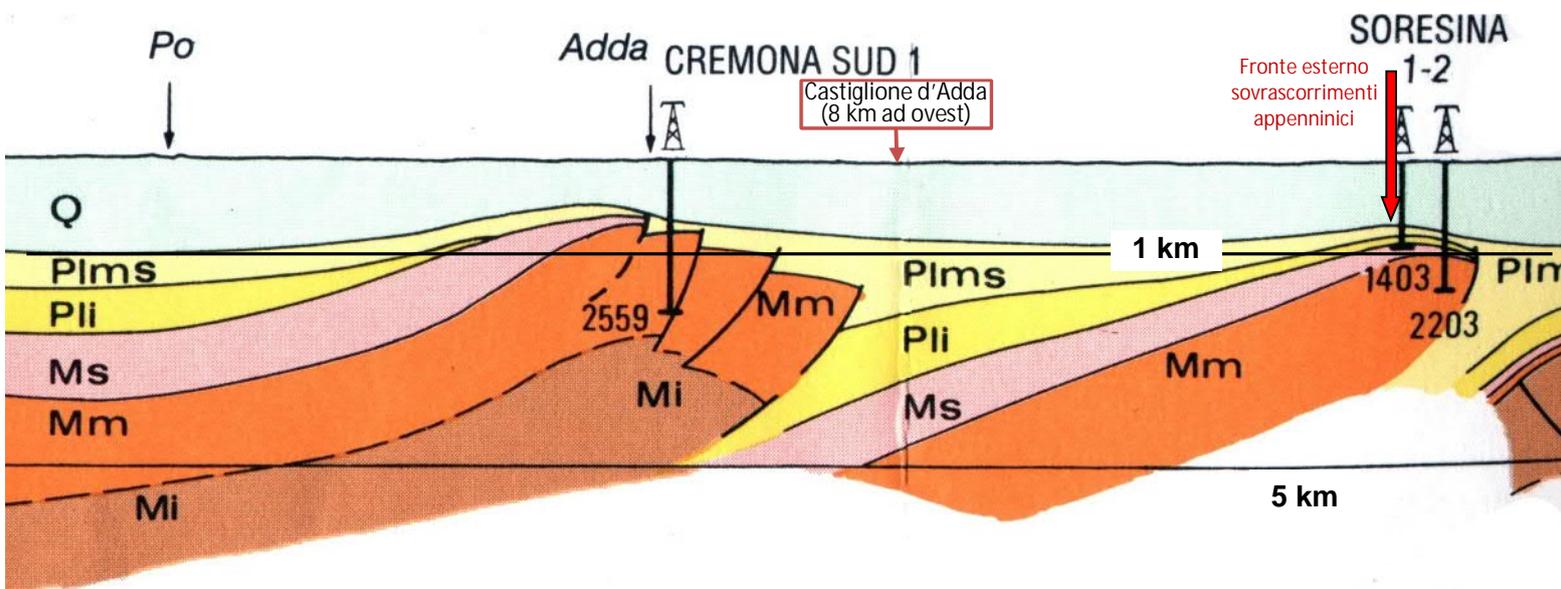
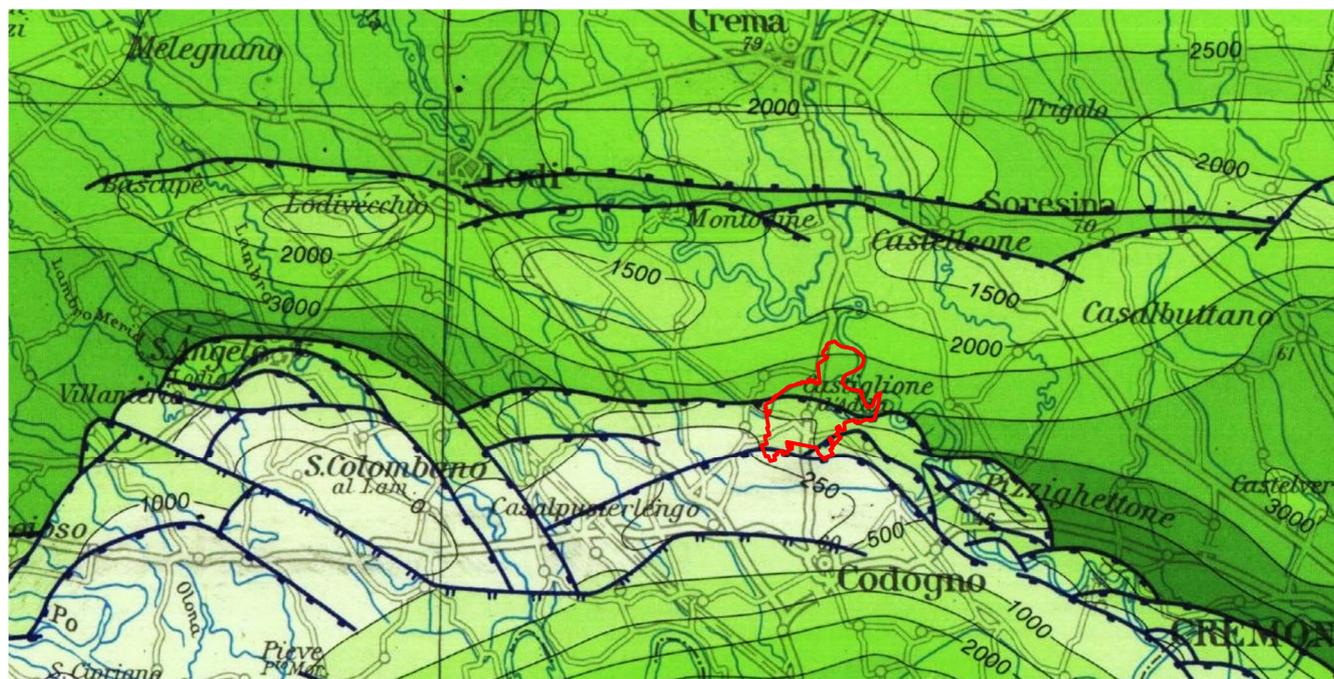


Figura 4: Sezione strutturale S – N passante circa 8 km ad est di Castiglione d'Adda.

N.B. il pozzo denominato Cremona Sud 1 è posto presso la località Tencara di Pizzighetone.

Q = quaternario; **Plms** = Pliocene medio e superiore; **Pli** = Pliocene inferiore; **Ms** = Miocene superiore; **Mm** = Miocene medio; **Mi** = Miocene inferiore.

² Considerazioni dello scrivente derivate dalla sezione e dai commenti esposti in: Il Quaternario: Baio M, Bersezio M, Bini A. (2004) *Assetto geologico della successione quaternaria nel sottosuolo tra Melegnano e Piacenza*. 17(2/1) pag 255-259



TECTONIC SYMBOLS

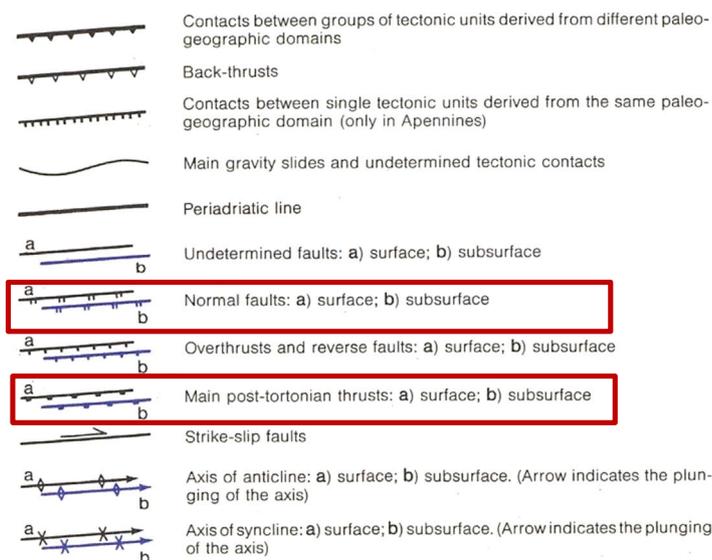
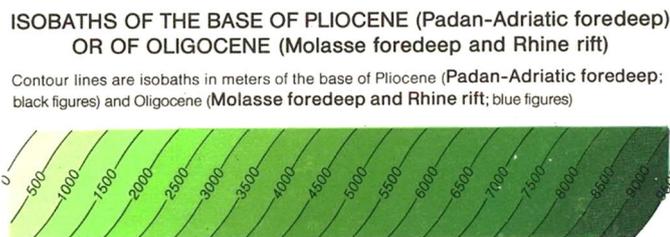


Figura 5: Carta di inquadramento geologico strutturale (da C.N.R., Structural Model of Italy, 1991). Foglio 1, scala 1: 500.000 ; responsabile P. Scandone.

Thrust = sovrascorrimento
Tortoniano, piano del Miocene superiore (11,6 -7,2 Ma)



Questi importanti piegamenti interessano le formazioni marine a partire dal Miocene, e si estendono in alto fino alla base del pleistocene (circa 2,5 Ma) dove sono ricoperte dai successivi depositi, in prevalenza sabbiosi, di ambiente inizialmente transizionale (al limite tra il marino ed il terrestre, ossia di spiaggia, laguna, delta, piane di marea etc.) e poi continentale

La sezione di illustra lo schema strutturale in corrispondenza dell'asse padano, circa 8 Km a est del territorio comunale (da AGIP 1986: Pianura padana - interpretazione integrata di dati geofisici e geologici, 73° congresso Società Geologica Italiana, Roma).

Sono evidenziati l'elevazione del substrato che forma l'anticlinale di Casalpusterlengo citata in precedenza, lateralmente delimitata da faglie ad andamento sub verticale, nella quale si riconosce la serie completa del Miocene (Mi, Mm, Ms, inferiore, medio e superiore), la lacuna del Pliocene inferiore (PLi), nonché la sensibile riduzione del Pliocene medio e superiore (PLms) in corrispondenza dell'asse della piega.

La planimetria riportata in Figura 5 è uno stralcio dalla carta del modello geologico strutturale del C.N.R. (Structural Model of Italy, 1991).

Il fronte delle strutture profonde è interessato da fratture che scompongono le rocce secondo un piano parallelo a quello dello scorrimento (ramp) e da sistemi di faglie trascorrenti, che traslano lateralmente i blocchi.

Secondo Pieri e Groppi (1981), la zona frontale degli Appennini in tale area viene a giustapporsi a quella dell'arco del Sudalpino-Orobico giungendo, in pratica ad un contatto-scontro nella zona tra Cornegliano e Bordolano (24 Km a ENE di Castiglione d'Adda), come evidenziato nella sezione dove è indicato la posizione del fronte esterno dei sovrascorrimenti appenninici. Sempre secondo gli stessi autori i terreni marini più recenti coinvolti sono quelli pliocenici, ma le deformazioni interessano anche la parte basale del quaternario (Pleistocene).

Il territorio di Castiglione d'Adda poggia dunque nella sua parte meridionale su un basamento piegato, sovrapposto e sollevato, mentre la parte centrale e settentrionale coincide con un'ampia e profonda depressione del basamento che precede l'alto strutturale di Cornegliano.

La sezione di Figura 4 non indica rilevanti riduzioni degli spessore dei depositi quaternari (pleistocene), che si sviluppano per circa 1000 m comprendendo un'estesa porzione basale di depositi marini e di transizione anche in corrispondenza dell'asse della piega, ma in generale occorre osservare che tali strutture, disposte in direzione prevalentemente W-E attraverso il territorio lodigiano e cremonese, condizionano lo sviluppo della rete idrografica superficiale, la circolazione sotterranea e la morfologia per effetto di un'attività neotettonica (movimenti ancora in atto o databili al quaternario).

Sull'attività recente delle strutture sepolte vi sono vari indizi macroscopici, quali l'anomala deviazione del percorso del Lambro Meridionale a Villanterio, l'entità delle vallecole dei versanti meridionali del Colle di San Colombano, e la presenza di un "leggero sollevamento anticlinale" della Formazione di San Colombano, come pure misure dirette, (Arca e Beretta, 1985. *Movimenti verticali del suolo dal 1897 al 1957*), che però nell'area in esame stimano un sollevamento nell'intervallo di tempo considerato.

In corrispondenza delle dorsali si osserva talora la presenza in superficie di terreni del quaternario continentale più antico, mantenuti in posizione più elevate durante le fasi alluvionali seguite alle glaciazioni. Le più evidenti di tali strutture positive sono il colle di San Colombano e i rilievi intorno a Casalpusterlengo, in corrispondenza dei quali affiorano terreni attribuiti agli interglaciali Mindel, collocabili intorno a 700.000 anni fa.

A scala regionale, infatti, si è osservato che rispetto ai depositi delle fasi fluvioglaciali recenti, nei terreni antichi gli acquiferi confinati che caratterizzano le formazioni basali della successione alluvionale presentano acque con una mineralizzazione più elevata, e in particolare con maggiori contenuti di ferro e manganese.

Tale condizione è ben riscontrata nel campo pozzi del comune di Codogno, ma è assente nel territorio di Castiglione d'Adda, come mostrato sia dalle caratteristiche stratigrafiche che quelle idrochimiche dell'acqua emunta.

3.1 SEGNALAZIONE DI FAGLIE CAPACI NEL DATABASE ITACA

In aggiunta alle conoscenze sulle strutture sepolte del territorio di Castiglione d'Adda, pare opportuno inserire le più recenti valutazioni sull'attività neotettonica delle stesse come rappresentate all'interno del progetto ITHACA (*ITaly HAZard from CAPable faults*) prodotto dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA.

Secondo quanto precisato nelle pagine web del sito ([ITHACA - faglie capaci WebPage \(isprambiente.it\)](http://isprambiente.it)), il database "*sintetizza le informazioni disponibili sulle faglie capaci che interessano il territorio italiano, proponendosi quindi come strumento fondamentale per:*

- a) analisi di pericolosità ambientale e sismica,*
- b) comprensione dell'evoluzione recente del paesaggio,*
- c) pianificazione territoriale e*
- d) gestione delle emergenze di Protezione Civile.*

...

La definizione riferita nel Catalogo ITHACA è rappresentata soprattutto dalle guide tecniche IAEA (*International Atomic Energy Agency*), redatte per la caratterizzazione di siti destinati ad ospitare impianti ad alto rischio (ad es. centrali nucleari, depositi di scorie nucleari) che forniscono le seguenti definizioni (qui riassunte):

Faglia attiva: struttura tettonica che si è mossa nel recente passato geologico e che si prevede si muova in un futuro lasso di tempo preoccupante per la sicurezza di un'installazione nucleare, con tempi di ritorno che possono essere anche di alcune decina di migliaia di anni.

Faglia capace: faglia attiva che ha un significativo potenziale di manifestare spostamenti in corrispondenza o in prossimità della superficie del suolo.

La deformazione attesa può essere sia una dislocazione ben definita lungo un piano di rottura che una deformazione distribuita e la riattivazione attesa viene definita in funzione del regime tettonico in atto, rispetto al quale deve essere compatibile.

Sempre secondo quanto dichiarato dagli autori nell'introduzione al progetto "*In Italia, molti terremoti storici catastrofici (e.g., i terremoti del 1783 in Calabria, 1915 nel Fucino, 1980 in Irpinia, con magnitudo intorno a 7), sono stati associati a fenomeni di fagliazione superficiale con rigetti prossimi o superiori al metro. Studi paleosismologici hanno consentito di riconoscere fenomeni simili in epoca tardo Pleistocenica-Olocenica lungo varie strutture tettoniche considerate in precedenza inattive, dimostrandone una frequenza maggiore di quanto prima supposto. La fagliazione superficiale può indurre seri danni agli edifici e alle infrastrutture e quindi rappresentare una rilevante fonte di pericolosità, particolarmente nelle numerose aree densamente popolate ed industrializzate del territorio italiano.*"

Premesso quanto sopra di seguito si espone in Figura 6 la rappresentazione delle due faglie capaci che interessano il territorio comunale, quella settentrionale passante per il mulino

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

Muza, il castello Pallavicino Serbelloni e l'area di cava, è indicata come Fault Code 86125 e è descritta come faglia inversa (sovrascorrimento), mentre quella meridionale che è indicata iniziare dalla Cascina Barattiera e dirigersi verso est fino all'area a meridione della Cascina Bignami, è indicata come Fault Code 86126 ed è anch'essa descritta come faglia inversa.

Questa faglia sembra proseguire con una successiva denominata Fault Code 86127, per oltre 34 Km fino a superare Cremona.

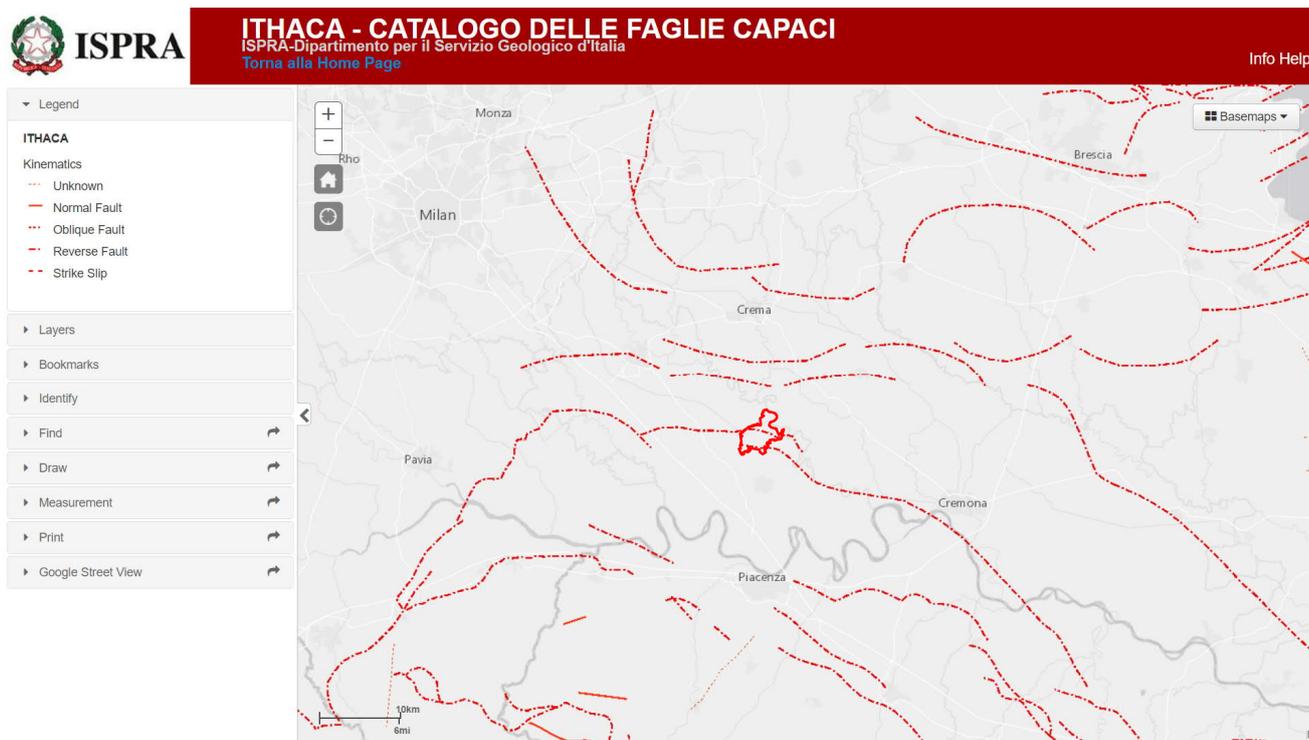


Figura 6: percorso in superficie delle faglie capaci del catalogo ITACA

Il catalogo non fornisce informazioni di dettaglio sulle caratteristiche delle faglie, ma indica per entrambe un rango primario, un piano di faglia con pendenza (dip) verso sud, e un riferimento all'età dell'ultima attività indicato come pleistocene generico.

Appare evidente che la geometria delle linee di faglia individuate coincida in gran parte con i sovrascorrimenti post tortoniani riportati in Figura 5, ma in base a quanto detto ed alle incertezze che accompagnano l'individuazione delle faglie capaci, al momento non pare ragionevole o opportuno intraprendere decisioni nell'ambito della pianificazione.

La segnalazione qui riferita è comunque un utile riferimento tecnico i cui risultati solo con il tempo e gli approfondimenti in ambito sismologico potranno essere confermati o esclusi.

4 Cenni dell'evoluzione storica recente del territorio

Capitolo omesso – si rimanda alla documentazione del 2009.

5 Geomorfologia ed elementi di pedologia

5.1 PROCESSI GENETICI

Riprendendo quanto accennato nel § 3, si può ritenere che la pianura padana sia principalmente il prodotto di un processo di riempimento di un bacino subsidente da parte di sedimenti di origine marina durante il pliocene (da 4,9 a 1,6 milioni di anni fa), mentre con il primo Pleistocene (da 1,6 a circa 0,75 m.a.), anche a seguito di processi di sollevamento in corrispondenza di "alti strutturali", ha preso inizio la deposizione di ambiente transizionale, caratterizzata da fasi spiccatamente marine alternate a depositi di ambiente continentale.

I sedimenti formati, costituiti da limi intervallati da sabbie fini e strati torbosi, rappresentano la base sulla quale sono andate a deporsi grandi masse di sabbie e ghiaie di origine continentale, trasportate dalle Alpi e dagli Appennini verso valle dalle notevoli portate dei fiumi che caratterizzarono il pleistocene superiore durante le glaciazioni.

Le coltri di materiale sabbioso-ghiaioso sono convenzionalmente attribuite a tre diverse fasi glaciali del Pleistocene medio e superiore, denominate Mindel (intorno a 0,7 milioni di anni fa), Riss (da 0,3 a 0,13 m.a.) e Würm (da 70.000 a 12.000 anni fa), anche se le fasi ora riconosciute nell'alta pianura sono più di una decina; tale semplificazione è dovuta alla difficoltà, allo stato attuale delle conoscenze, di distinguere nelle stratigrafie dei pozzi della bassa pianura singole fasi che hanno determinato l'erosione e l'accumulo di materiali assai simili.

I depositi che formano la copertura alluvionale della pianura padana, sono quindi il prodotto del susseguirsi di più cicli erosivi e deposizionali, che hanno portato ciascuna delle coltri più giovani ad adagiarsi sulle altre, relativamente più antiche, tramite il parziale riempimento dei solchi vallivi profondamente incisi in queste, determinando frequenti giustapposizioni tra depositi di diversa età.

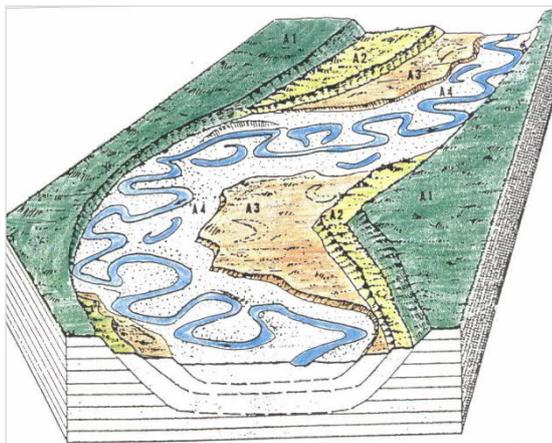
Al termine dell'ultima fase glaciale la pianura era percorsa da fiumi di portata molto maggiore dell'attuale, di cui si ha chiara testimonianza nelle tracce dei paleoalvei posti sulla superficie del "Livello Fondamentale della Pianura".

L'analisi dei parametri di tali forme, in particolare l'ampiezza dei meandri e i raggi di curvatura, ha condotto il Marchetti (3) ad ipotizzare che le portate potessero essere superiori di 5 - 6 volte rispetto a quelle degli attuali fiumi.

L'abbondante deflusso è stato attribuito al clima freddo umido che avrebbe caratterizzato le fasi finali della glaciazione e la prima deglaciazione, che produsse grandi apporti di materiale alluvionale verso la pianura, reso disponibile anche dall'accumulo di materiale sciolto da parte dai ghiacciai allo sbocco delle vallate alpine (apparati morenici).

Tali processi, avvenuti in realtà mediante più cicli di avanzamento e ritiro dei ghiacciai, condussero alla formazione della porzione superiore del citato "livello fondamentale della pianura", mentre una successiva fase caratterizzata sia dalla diminuzione delle precipitazioni sia dall'intrappolamento dei sedimenti nei bacini lacustri formati a monte degli sbarramenti morenici (8), diede luogo alla migrazione del punto neutro dei fiumi⁴ verso valle.

Ebbe così inizio, in un periodo approssimativamente compreso tra i 7.500 ed i 10.000 anni fa, una decisa fase di erosione dei depositi fluvioglaciali dell'età wurmiana, che unitamente a fenomeni locali di innalzamento della pianura per cause tettoniche, produsse le profonde incisioni che attualmente ospitano la fascia di divagazione dei meandri dei fiumi di origine alpina, dette piane oloceniche o valli fluviali di pianura, tra le quali quelle dell'Adda e del Lambro.



Con il succedersi di fasi climatiche a diversa intensità, i fiumi hanno apportato e successivamente nuovamente eroso i sedimenti all'interno delle valli, producendo un complesso di depositi posti a quote che si differenziano di alcuni metri, che formano una serie di terrazzi inscatolati nel solco definito dal terrazzamento principale.

Figura 7: schema di formazione dei depositi olocenici nelle valli fluviali : da "Studi preliminari per il parco Adda Sud" . Geotecna Progetti S.p.A., 1987.

³ Marchetti M. (1990) : "Cambiamenti idrologici nella Pianura Padana Centrale a nord del fiume Po: i casi di "Underfit stream" dei fiumi Mincio, Oglio e Adda" . Geografia fisica e dinamica del quaternario , n° 13.

⁴ Si intende con tale termine un tratto dell'asta fluviale caratterizzata sostanzialmente dal trasporto di materiale, interposta tra la prevalente erosione che avviene a monte e la deposizione che si manifesta a valle di detto punto. Con un aumento delle precipitazioni, che produce una maggiore frequenza degli episodi di piena, si assiste ad uno spostamento verso monte del punto neutro, mentre in caso inverso si ha la migrazione verso valle. Tale riferimento teorico è però fortemente variato nei singoli corsi d'acqua da aspetti caratteristici, in particolare dalla presenza di tributari e da fenomeni neotettonici.

5.2 CARATTERI MORFOLOGICI LOCALI E COMMENTO DELLA TAVOLA 1

Per mettere in luce aspetti morfologici di dettaglio è stata effettuata, come nel 2009, un'elaborazione semi automatica delle curve di livello con una spaziatura di un metro, al limite della reale affidabilità dei dati forniti con la base topografica.

Sono stati impiegati n 1585 punti quotati presenti DBT regionale in scala 1:2000 e 1:5.000, selezionando quelli presenti al suolo e sulle strade ed effettuando un'elaborazione mediante *Surfer*® 9, impiegando l'algoritmo di interpolazione di base denominato *Point Kriging* e *variogramma lineare*.

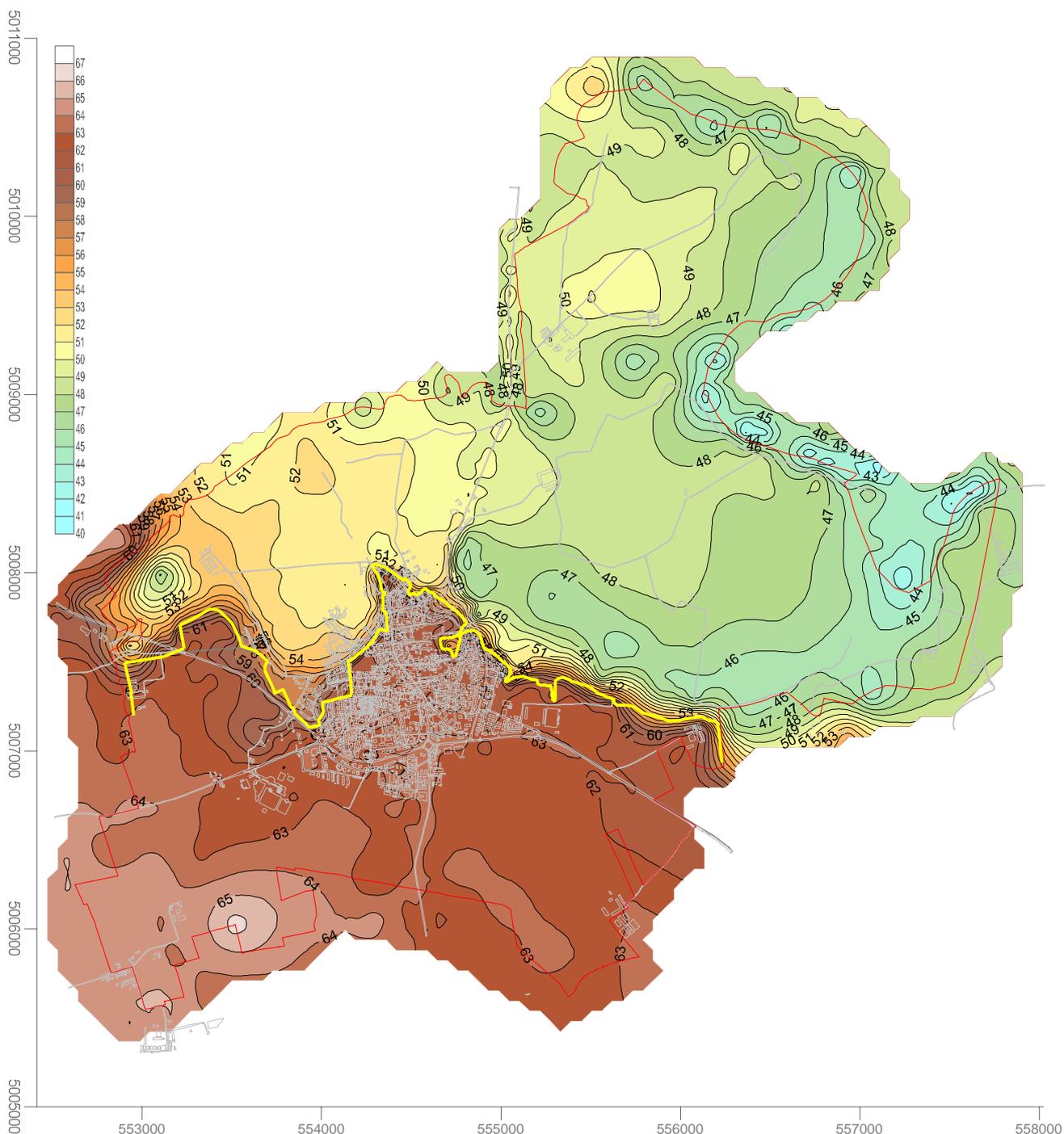


Figura 8: isoipse derivate dalla lettura dei punti quotati indicati nella base aerofotogrammetria.

 ciglio della scarpata morfologica principale

La lettura del risultato ottenuto deve essere fatta considerando che, benché sia possibile introdurre nei dati discontinuità quali scarpate naturali o artificiali, l'impiego dei metodi di interpolazione produce un'attenuazione delle forme nette, e quindi non sempre quanto evidenziato corrisponde, nei dettagli, con quanto osservabile sul terreno. Nondimeno l'elaborazione consente di cogliere aspetti morfologici che diversamente non sarebbero apprezzabili, per la materiale impossibilità di percepirle a terra gradienti topografici inferiori a circa l'1%. La lettura dell'elaborato deve essere fatta considerando tale premessa, ovvero valutando attendibile dell'andamento generale definito dalle isoipse, ma senza attendersi la puntuale conferma dei dettagli che singolarmente possono non risultare esatti.

Dall'elaborazione è stato possibile ottenere altre due carte, la prima (Figura 9) è una rappresentazione tridimensionale del territorio che rende immediatamente apprezzabile le caratteristiche morfologiche, mentre la seconda mostra l'acclività della superficie in gradi, ed è stata impiegata per la stima del parametro S (superficie topografica) nell'analisi della vulnerabilità con SINTACS.

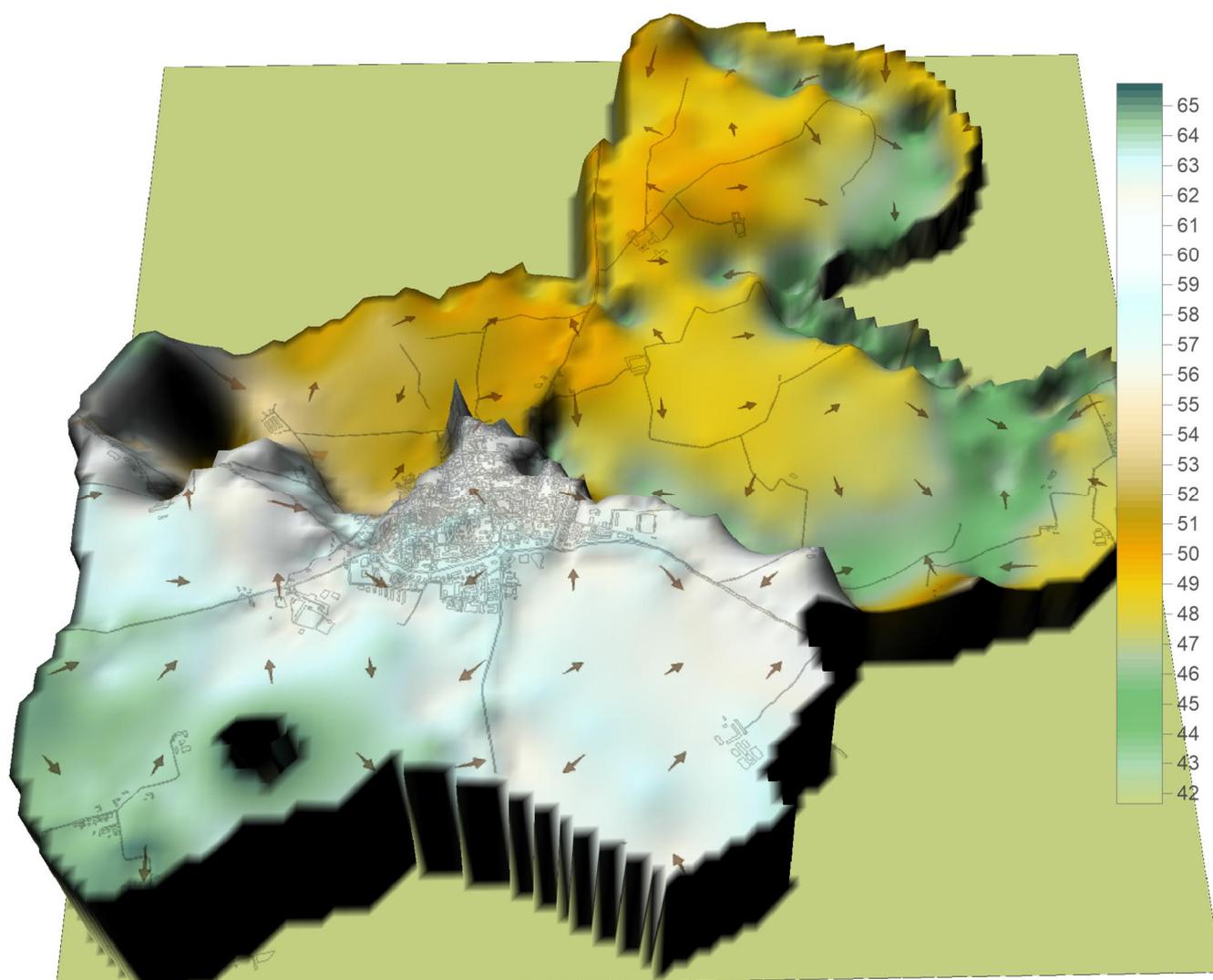


Figura 9: rappresentazione 3D della superficie topografica

In tutto il territorio a monte della scarpata principale (piana tardo pleistocenica o livello fondamentale della pianura) l'acclività è molto modesta, mentre valori del 6 – 10 % si osservano in corrispondenza della scarpata, con massimi di 11% a nord della cascina Santa Maria.

Ad ovest del Mulino Muzza è presente un'altra area con acclività apprezzabili che si ritiene rappresentino la formazione di una debole conoide di deiezione allo sbocco in pianura del colatore Muzza, sicuramente rimodellata da attività antropiche.

Si deve però precisare che con nessuno dei metodi disponibili è possibile, alla scala impiegata, ottenere una rappresentazione affidabile della pendenza dei terreni nelle zone della scarpata principale, mentre risultati attendibili sono quelli mostrati nelle aree piane.

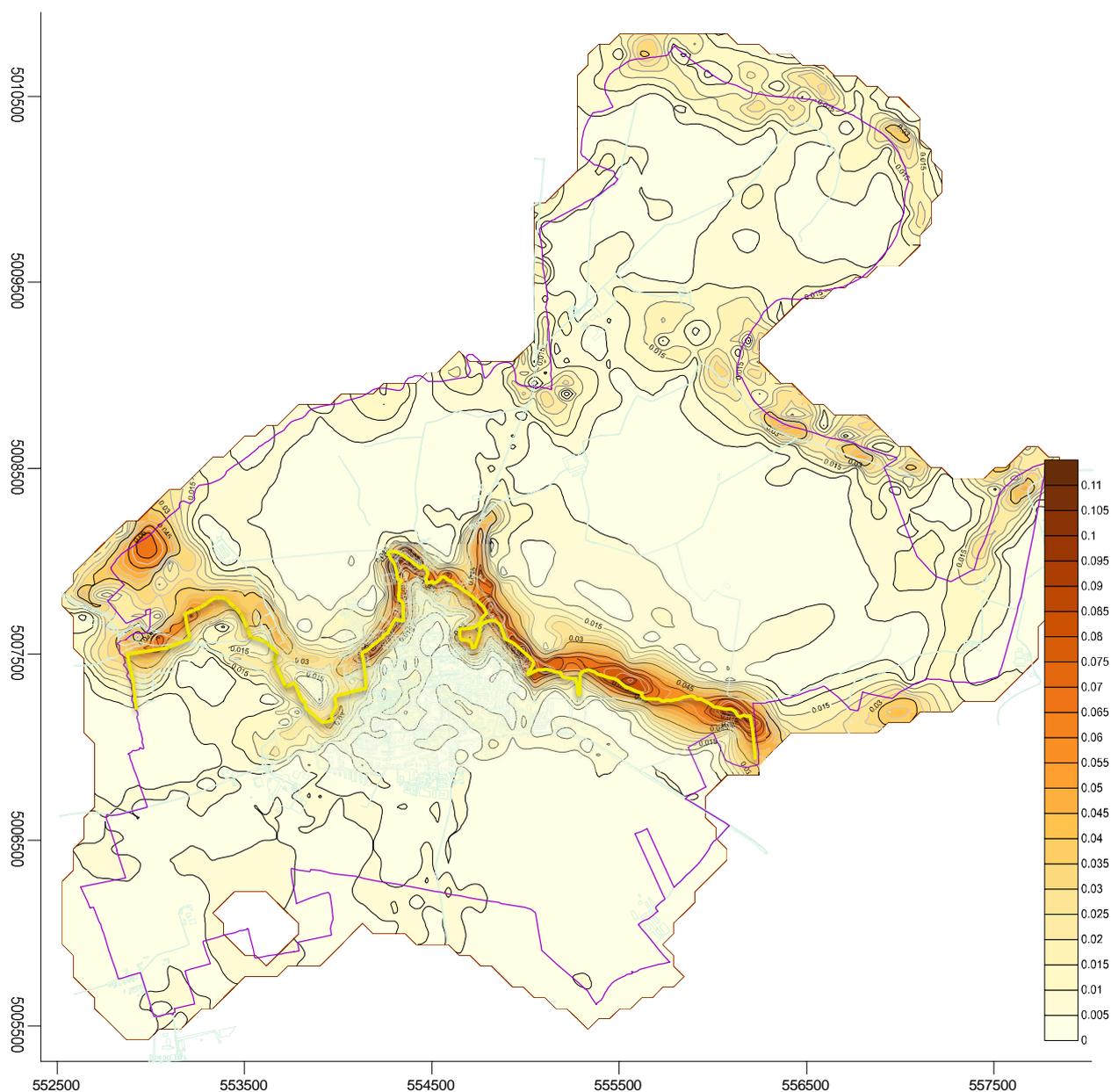


Figura 10: pendenze in gradi delle superfici.  Ciglio scarpata morfologica principale



Figura 11: carta morfologica redatta per gli studi per l'istituzione del parco Adda Sud, 1986.

Un documento di ottimo dettaglio e ben riscontrato nei rilievi eseguiti è costituito dalla carta predisposta per gli studi connessi all'istituzione del Parco Adda Sud (Figura 11), che fornisce anche un'interpretazione sulle aree di possibile esondazione e di erosione al fondo che appaiono allo stato superati dalle indagini di dettaglio sull'idraulica fluviale recentemente redatti dall'Autorità di bacino e dalla Regione Lombardia ⁽⁵⁾, riferiti nell'apposito allegato.

5.3 ELEMENTI DI PEDOLOGIA

5.3.1 Sintesi delle caratteristiche

Ai fini del presente studio l'analisi delle caratteristiche pedologiche del territorio è rilevante principalmente per valutare la funzione protettiva esercitata dai suoli nei confronti delle acque sotterranee. Quanto esposto nel presente capitolo non è frutto di rilievi direttamente condotti, ma rappresenta una sintesi, riferita al territorio di Castiglione d'Adda, dello studio pedologico pubblicato dell'ERSAL (SSR n° 36, giugno 2002).

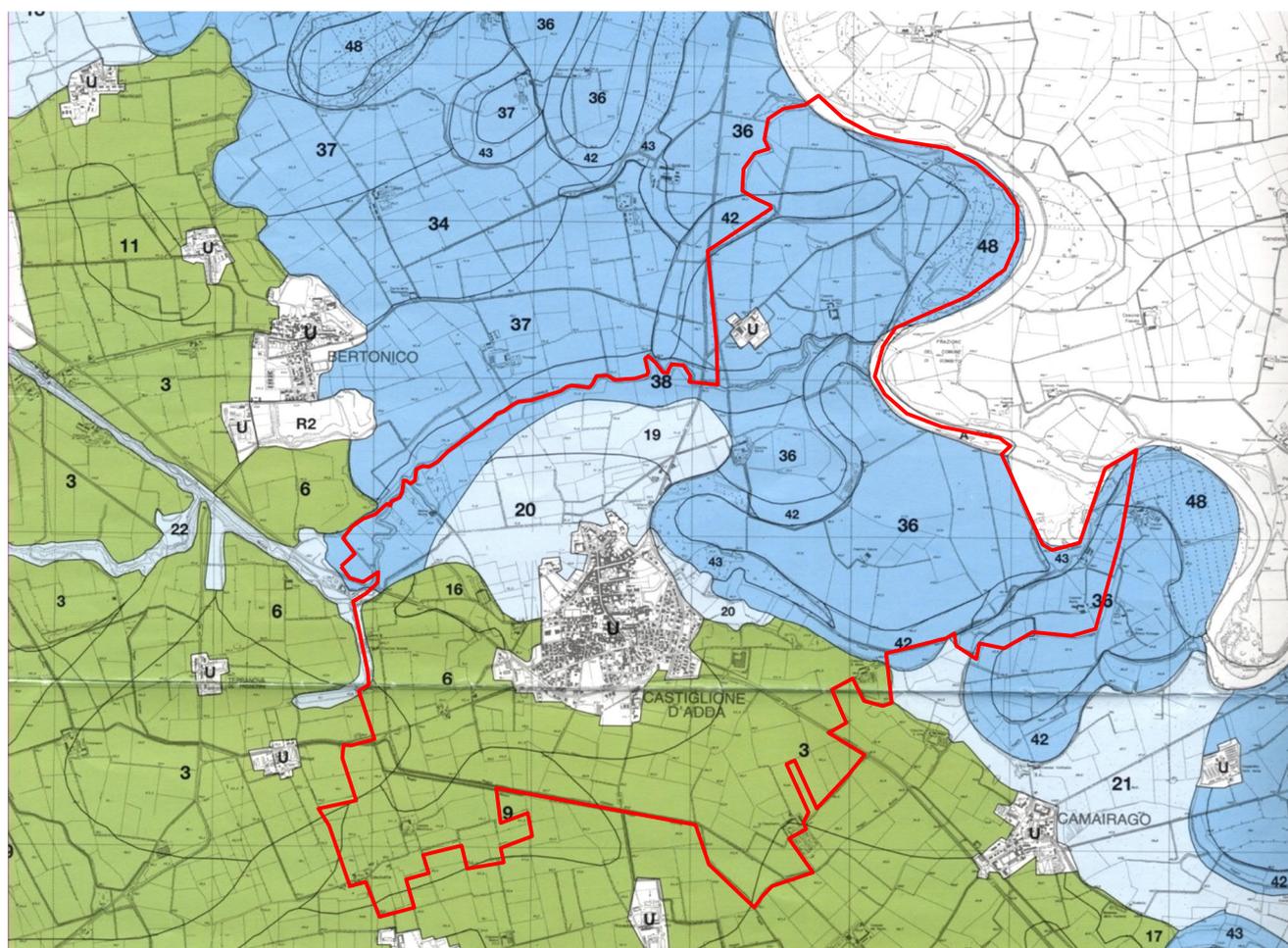


Figura 12: stralcio della carta pedologica dell'ERSAL – pubblicazione SSR 36.

⁵ Studio di fattibilità della sistemazione idraulica:- del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po,- del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda,- del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda. Relazione descrittiva e di analisi. Autorità di bacino del fiume Po, 03/06/2003

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

L'analisi formulata dagli autori è supportata da osservazioni del paesaggio condotte mediante la cartografia storica e le foto aeree, la realizzazione di numerose osservazioni puntuali (in media 1 profilo ogni 4 Km² e 4 trivellate al Km² (circa n° 52 nel solo territorio di Castiglione d'Adda) ed analisi chimiche e tessiturali sui campioni.

SINTESI DELLE CARATTERISTICHE PEDOLOGICHE DEL TERRITORIO DI CASTIGLIONE D'ADDA TRATTE DA: "I Suoli del Codognese" ERSAL SSR 36 - anno 2002											m ² a Castiglione d'Adda			
Caratteristiche comuni dei suoli individuati in territorio di Castiglione d'Adda:														
Affisuoli: suoli caratterizzati, principalmente, dalla presenza di un orizzonte profondo di accumulo di argilla illuviale (argillico). (U.C. 3, 6, 9, 16)														
Inceprisuoli: suoli con profilo scarsamente differenziato, con presenza di un orizzonte profondo di alterazione sufficientemente distinguibile dal materiale di partenza per sviluppo di struttura, colore o decarbonatazione. (U.C. 19, 20)														
Entisuoli: suoli privi di orizzonte diagnostico, su substrati di recente deposizione o erosione o con intenso disturbo antropico. (U.C. 36, 38, 42, 43, 48)														
Assenza di orizzonti o proprietà diagnostiche legate ad antiche fasi pedogeniche (es fragipan).														
Regime idrico ustico: il suolo è secco, totalmente o parzialmente, per almeno 90 giorni cumulativi e per meno di 45 giorni consecutivi in estate, almeno 6 anni su 10.														
Classe mineralogica mixed: tutti i minerali diversi dal quarzo e dai feldspati sono presenti in misura minore del 40%.														
Saturazione di basi nel complesso di scambio (TSB) è > del 75%														
Note: le caratteristiche indicate con due termini separate da sbarretta (es. subacida/neutrali), indicano rispettivamente il valore del parametro nella parte superficiale del suolo ed in quella profonda. Il preciso significato dei termini utilizzati, in particolare di espressioni quali buono, permanente, temporaneo ecc, è riportato nel GLOSSARIO PEDOLOGICO e, in parte, nella pubblicazione SSR 36 dell'ERSAL qui sintetizzata.														
SOTTOSISTEMA DI PAESAGGIO	Unità Cartografica	UNITA' DI PAESAGGIO (codice ERSAL)	UNITÀ TASSONOMICA ERSAL	FAMIGLIA GRANULOMETRICA / TESSITURA	PROFONDITÀ SUOLO in cm	SUBSTRATO	REAZIONE	TSB	DRENAGGIO	classificazione Soil Taxonomy USDA	NOTE: aspetti particolari ed applicativi - CLASSE di capacità d'uso	Capacità protettiva dei suoli per le acque profonde	totale escavo alveo Adda	% per unità di paesaggio
SOTTOSISTEMA DI PAESAGGIO (codice ERSAL LF): Porzione meridionale della pianura costituita esclusivamente da sedimenti alluvionali recenti e attuali (Colognese recente ed attuale). "Bassa pianura sabbiosa" : area di pianura alluvionale, a valle della fitta rete di canali per irrigazione a sommersione derivata dal canale Muzza. In funzione di questa tecnica si pratica generalmente il livellamento dei campi agricoli.	3	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. LF2.1) Superfici pianeggianti o lievemente ondate, ben drenate ed a substrato sabbioso.	LO01	limosa-fine / FRANCO SABBIOSA	110	sabbioso	neutra	media	buono	Ultic Haplustalfs	elevata riserva idrica (AWC 180 mm) CLASSE -IIs	MODERATA	12.555.000	
	6	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. LF2.2) Superfici pianeggianti o lievemente ondate a drenaggio mediocre e substrato latera costipato, con lievi manifestazioni di idromorfia legata alla bassa permeabilità di orizzonti profondi.	LRD1	fine / FRANCO ARGILLOSA	> 200	sabbioso	neutra	medio-alta	mediocre	Aquic Haplustalfs	drenaggio mediocre- permeabilità bassa-riserva idrica elevata (AWC 171 mm). CLASSE IIws	ELEVATA	1.909.310	15,2%
	9	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. LF2.2) Superfici pianeggianti o lievemente ondate a drenaggio mediocre e substrato latera costipato, con lievi manifestazioni di idromorfia legata alla bassa permeabilità di orizzonti profondi.	CHO1	limosa-fine / FRANCA	> 160	sabbioso	neutra	media	mediocre	Aquultic Haplustalfs	drenaggio mediocre- permeabilità moderata-riserva idrica molto elevata (AWC 215 mm). CLASSE IIw	MODERATA	1.243.540	9,9%
	16	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. LF5.1) Superfici per lo più pianeggianti, poste al margine del livello fondamentale della pianura, lievemente ribassate e non delimitate da dislivelli evidenti, con substrato sabbioso e liberamente drenate.	SVN2	franca-grossolana / FRANCO SABBIOSA	100	sabbioso	neutra	alta	buono	Typic Haplustalfs	permeabilità moderata e riserva idrica moderata (AWC 134 mm). CLASSE IIs	MODERATA (permeabilità moderata)	695.890	5,5%
SOTTOSISTEMA DI PAESAGGIO (codice ERSAL VT): Superfici terrazzate costituite da "alluvioni antiche o medie" sulle pianure alluvionali (Colognese antiche). "Valli alluvionali corrispondenti ai piani di deagguato dei corsi d'acqua attivi o fossili, rappresentanti il reticolo idrografico discente."	19	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VT 1.1) Superfici pianeggianti o lievemente ondate appartenenti al sistema fluviale dell'Adda, talora in lieve pendenza verso l'asta fluviale, con substrati sabbiosi o sabbioso limosi.	GRR1	franca-grossolana / FRANCO LIMOSA	95	sabbioso o sabbioso limoso con falda permanente	sub-alcalina	alto	mediocre	Aquic Ustochrepts	drenaggio mediocre- permeabilità moderatamente bassa, riserva idrica molto elevata (AWC 209 mm) CLASSE IIw	MODERATA (permeabilità moderata)	1.009.408	8,0%
	20	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VT 1.1) Superfici pianeggianti o lievemente ondate appartenenti al sistema fluviale dell'Adda, ubicate al margine del terrazzo wurmiano. Sono presenti condizioni di idromorfia con falda permanente da moderatamente profonda a profonda.	ADA1	franca-grossolana / FRANCO LIMOSA	80	sabbioso o sabbioso limoso con falda permanente	neutra	alta	lento	Aquic Ustochrepts	drenaggio lento- permeabilità moderata, riserva idrica elevata (AWC 176 mm). CLASSE IIw	BASSA	476.650	3,8%
	36	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 8.1) Superfici pianeggianti, appartenenti alla pianura fluviale dell'Adda, con depositi a granulometria varia.	BAE1	franca-grossolana / FRANCO SABBIOSA	200	vario	alcalina	medio-alto	mediocre	Aquic Ustifluvents	drenaggio mediocre - permeabilità moderata, riserva idrica moderata (AWC 120 mm). CLASSE IIw	MODERATA	1.001.000	8,0%
SOTTOSISTEMA DI PAESAGGIO (codice ERSAL VA): Depressioni costituite da sedimenti recenti e attuali (Colognese recente ed attuale).	38	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 8.2) Superficie appartenente alla pianura fluviale dell'Adda, interessata dal tracciato del canale Muzza.	GRR2	franca-grossolana / FRANCO LIMOSA	105	falda permanente	subalcalina	alto	mediocre	Aquic Ustochrepts	drenaggio mediocre - permeabilità moderata, riserva idrica molto elevata (AWC 220 mm). CLASSE IIw	MODERATA	3.723.900	29,7%
	42	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 7.2) Depressioni meandriformi corrispondenti a tratti abbandonati di alveo fluviale dell'Adda, con depositi prevalentemente sabbiosi e moderate condizioni idromorfe.	VZS1	franca-grossolana / FRANCA	45	falda permanente	subcalcinosa	alto	lento	Aeric Endoaquepts	drenaggio lento - permeabilità moderata, riserva idrica moderata (AWC 123 mm). CLASSE IIw	BASSA	839.456	6,7%
	43	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 7.3) Tratti di alveo abbandonato del fiume Adda, caratterizzati da condizioni di intensa idromorfia per falda permanente poco profonda, spesso con acque stagnanti.	CCU1	limosa fine / FRANCO LIMOSA	35	falda permanente	subacida	medio	molto lento	Typic Endoaquepts	drenaggio molto lento - permeabilità moderata, riserva idrica bassa (AWC 70 mm). CLASSE IIw	BASSA	511.830	4,1%
	48	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 6.2) Aree potenzialmente inondabili durante le piene ordinarie (golene aperte).	VE1	franca-grossolana / FRANCO SABBIOSA	85	alcalina	alto	buono	buono	Typic Ustifluvents	drenaggio buono - permeabilità moderata, riserva idrica elevata (AWC 152 mm). CLASSE IIws	MODERATA	392.910	3,1%
	48	SOTTOUNITA' DI PAESAGGIO (cod. VA 6.2) Aree potenzialmente inondabili durante le piene ordinarie (golene aperte).	VE1	franca-grossolana / FRANCO SABBIOSA	85	alcalina	alto	buono	buono	Typic Ustifluvents	drenaggio buono - permeabilità moderata, riserva idrica elevata (AWC 152 mm). CLASSE IIws	MODERATA	530.070	4,2%

Figura 13: unità pedologiche da ERSAL SS32 "i Suoli del Codognese", anno 2002.

Si premette che nei territori di pianura l'attività agricola si sovrappone in modo determinante ai fattori naturali di pedogenesi (tempo, clima, substrato e morfologia delle

superfici), producendo il rimescolamento dell'orizzonte superficiale e di parte degli orizzonti diagnostici, ed in numerosi casi realizzando la decapitazione o la sepoltura del profilo originario con lavori di livellamento.

I suoli sono stati classificati adottando il sistema elaborato dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti (USDA) chiamato Soil Taxonomy, per il quale è di primaria importanza l'individuazione del regime di umidità prevalente. Per ragioni connesse ad esigenze di continuità nella cartografia regionale, l'ERSAL ha classificato tutti i suoli dell'area ammettendo la prevalenza di un regime di umidità *ustico* (suolo è secco, cioè l'acqua è trattenuta dal suolo con una tensione > 15 atm, totalmente o parzialmente per almeno 90 giorni cumulativi e per meno di 45 giorni consecutivi in estate, almeno 6 anni su 10), benché tale regime rappresenti solo una minoranza dei casi ottenuti nell'elaborazione dei dati climatici con suoli che presentano una AWC (quantità d'acqua in un suolo che può essere estratta dalle radici delle piante) pari a =170 mm, e sia invece prevalente nell'area il regime di umidità *udico* (vi è umidità, cioè l'acqua è trattenuta dal suolo con una tensione < 15 atm, in qualche parte della sezione di controllo, per 90 o più giorni cumulativi e per almeno 6 anni su 10).

I suoli presenti sulla piana pleistocenica hanno normalmente subito processi pedogenici per tempi significativamente più lunghi rispetto ai suoli delle superfici oloceniche, e ciò ha consentito la lisciviazione delle basi di scambio (soprattutto Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) dagli orizzonti superficiali e la formazione di un accumulo di argille sotto l'orizzonte arato, tipico dei suoli appartenenti all'Ordine *Alfisol*s. Il ferro liberato dall'alterazione del sedimento di origine si trova per lo più legato al complesso argillo-umico e conferisce all'orizzonte argilloso caratteristiche colorazioni bruno rossastre, mentre i carbonati sono stati rimossi dall'orizzonte superficiale e talora si accumulano in profondità con formazione dell'orizzonte calcico.

Da rilevare che alla progressiva riduzione di granulometria dei depositi fluviali originari che caratterizza il territorio lodigiano in direzione Nord- Sud, pare associabile la maggiore frequenza di orizzonti calcici che si riscontra in direzione sud. La presenza di depositi sabbioso-limosi rende spesso lenta la velocità di percolazione delle acque nel profilo del suolo, ed aumenta la possibilità che i carbonati presenti nei sedimenti originari vengano disciolti nelle parti superiori del profilo e si ridepositino in forma di concrezioni nelle parti inferiori.

Alla diminuzione della granulometria pare anche associabile il contestuale aumento del tasso di saturazione basica, che lungo un parallelo passante da Lodi, separa il territorio provinciale in aree con $TSB < 75\%$ (a nord) da quelle con $TSB > 75\%$. Il parametro, che esprime il rapporto percentuale tra dei cationi alcalini e alcalino-terrosi (Ca, Mg, Na, K) fissati sul complesso di adsorbimento, e la capacità di scambio cationico, ha influenza sulla collocazione dei suoli nel sistema di classificazione e costituisce un importante fattore di fertilità.

Le differenze principali individuate negli alfisuoli presenti nel territorio di Castiglione d'Adda riguardano la tessitura, che è argillosa per l'Unità Cartografica 6 e franca o franco sabbiosa nelle altre unità (3,9,16). Conseguentemente la permeabilità è bassa per l'U.C. 6 e

moderata o superiore nelle altre unità, e tale condizione ha elevati effetti sulla carta della vulnerabilità.

La reazione negli alfisuoili è neutra, mentre nei terreni di seguito descritti è da sub alcalina ad alcalina, ad esclusione dell'unità 43, coincidente con la parte allagata dell'Adda Morta, dove è subacida per la presenza di notevole materiale organico in condizioni di saturazione.

I suoli posti a valle della scarpata principale sono distinti nei due sottosistemi di paesaggio indicati nella tabella, e sono formati da entisuoli e inceptisuoli, cioè suoli poco evoluti di profilo A-C, con debole differenziazione dell'orizzonte superficiale (suoli fluvents, U.C. 36 e 48), e suoli poco evoluti, dove l'orizzonte B, se presente, è privo di argilla illuviale tipica dei più maturi alfisuoili.

Entro il sottosistema VT si segnalano solo moderate differenze di drenaggio e di permeabilità, mentre in tutti i casi il substrato è sabbioso o sabbioso limoso con falda permanente, e nell'unità 20 sono presenti anche condizioni idromorfe. Tale situazione non è stata riscontrata nello scavo osservato a fianco della prova CPT1 e in un sondaggio eseguito 200 m SE del Mulino Muzza, ne appare plausibile sulla base dell'andamento della soggiacenza della prima falda ricostruito con tutte le informazioni disponibili, dove l'area interessata dai suoli della sottounità VT è caratterizzata da valori compresi tra 3 e 5 m.

Entro il sottosistema VA i suoli presentano una tessitura piuttosto varia, da franco limosa a franco sabbiosa e una permeabilità costantemente moderata. La documentazione segnala una falda permanente nelle U.C. 38, 42 e 43, e tale condizione è coerente con quanto rilevato e stimato in merito al deflusso della falda per l'area del paleoalveo dell'Adda Morta, mentre appare molto improbabile per l'U.C. 38.

5.3.2 *Aspetti applicativi delle caratteristiche pedologiche*

L'analisi condotta consente agli Autori di formulare alcune valutazioni di utilità pratica mediante l'utilizzo di procedure codificate, e in particolare la classe di qualità agronomica dei suoli (capacità d'uso), e il giudizio sulla capacità protettiva dei suoli nei confronti delle "acque profonde" (in realtà intese come acque sotterranee di prima falda).

La capacità d'uso è individuata in un sistema ripartito in 8 classi, numerate da I a VIII in funzione della gravità e del numero delle limitazioni difficilmente correggibili che restringono il campo delle possibili pratiche colturali. Solo le prime 4 classi individuano suoli adatti all'agricoltura, mentre le classi dalla V alla VII sono riferite a suoli adatti solo al pascolo ed alla forestazione. La classe VIII individua suoli non utilizzabili ai fini agro-silvo-pastorali.

Nel territorio di Castiglione d'Adda nessun suolo appartiene alla classe I, mentre gran parte del territorio è collocato nella classe II. I suoli U.C. 20, 42 e 48 sono in classe III, mentre in classe IV ricadono solo i territori coincidenti con l'Adda Morta

CLASSE I : suoli con limitazioni assenti o molto lievi.

CLASSE II: suoli con alcune limitazioni facilmente controllabili, che riducono la scelta delle colture e richiedono moderati interventi di conservazione.

CLASSE III : suoli con severe limitazioni che riducono la scelta delle colture (oppure la scelta dei periodi di semina, raccolta lavorazione del suolo), e richiedono particolari pratiche di conservazione, costanti e di difficile attuazione.

CLASSE IV : suoli con limitazioni molto severe che riducono ulteriormente la scelta delle colture e/o richiedono importanti ed accurate pratiche di conduzione.

Il tipo di limitazione che interviene nel definire le classi è fornito dai seguenti simboli, che compaiono nella tabella di Figura 13:

- s = limitazioni di tipo pedologico, quali scarsa profondità del suolo, bassa saturazione del complesso di scambio (TBS) o altro, specificato tra parentesi a fianco della classe;
- w = eccesso idrico nel profilo, per drenaggio mediocre o presenza della falda nel profilo;
- e = rischio di erosione;
- c = limitazioni climatiche

La capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee esprime l'attitudine dei suoli a funzionare da barriera naturale nei confronti della propagazione di inquinanti idrosolubili. Tale capacità protettiva costituisce un elemento fondamentale nella valutazione della vulnerabilità delle acque sotterranee all'inquinamento, la cui determinazione contempla però la valutazione di numerosi altri parametri, quali la topografia, le caratteristiche di dispersività dell'inquinante nell'insaturo (sotto il suolo) e nel saturo (falda), e le caratteristiche dinamiche della falda stessa.

Si riporta di seguito lo schema di analisi applicato dall'ERSAL, con alcune semplificazioni relative alla classe granulometriche, e con la traduzione dei termini originariamente in inglese. Lo scopo attuale, infatti, è di rendere comprensibile al lettore la procedura seguita, mentre per una precisa individuazione della metodologia occorre riferirsi al *"manuale per la compilazione delle schede delle unità cartografiche"* disponibile presso l'ERSAL.

La permeabilità in particolare rappresenta un parametro di complessa definizione, che deve essere valutato in campagna osservando le principali caratteristiche del suolo che influenzano la velocità d'infiltrazione dell'acqua (tessitura, porosità, struttura etc.), e non pare necessario riportare per esteso le categorie occorrenti a tale determinazione.

Il valore indicato assieme al giudizio qualitativo rappresenta la stima della velocità di infiltrazione che gli Autori del metodo (USDA) ritengono di poter associare alle caratteristiche pedologiche individuate, e non il risultato di misure appositamente eseguite.

I valori di pH e C.S.C. che vengono utilizzati nella procedura sono i più alti tra quelli riscontrati entro i 100 cm.

Classi di capacità protettiva	PARAMETRI			
	PERMEABILITÀ (velocità in m/sec)	PROFONDITÀ DELLA FALDA	CLASSI GRANULOMETRICHE	ph e C.S.C. (in meq/100 gr)
ELEVATA	Bassa $10^{-6} \div 10^{-8}$	> 100 cm	Argillosa, argillosa limosa, argilloso-franca, limoso grossolana, franca, argilloso scheletrica, più tutte le classi fortemente contrastanti in cui il primo termine sia argillosa o argilloso limosa	> 5 > 10
MODERATA	Moderata $10^{-5} \div 10^{-6}$	50-100 cm con permeabilità bassa > 100 cm con permeabilità moderata	Franca grossolana e franco scheletrica, più tutte le classi fortemente contrastanti in cui il primo termine non sia argillosa o argilloso limosa	4,5-5,5 5-10
BASSA	Elevata $10^{-4} \div 10^{-5}$	< 50 cm con permeabilità bassa < 100 cm con permeabilità moderata	Sabbiosa, sabbioso scheletrica, frammentale più tutte le classi fortemente contrastanti in cui il primo termine sia sabbiosa, sabbioso scheletrica o frammentale	< 4,5 < 5

Nell'analisi realizzata dall'ERSAL i suoli del territorio di Castiglione D'Adda presentano una capacità protettiva da ELEVATA a BASSA in funzione dell'abbondanza della frazione sabbiosa nel profilo, e dei correlati valori di permeabilità e di C.S.C.

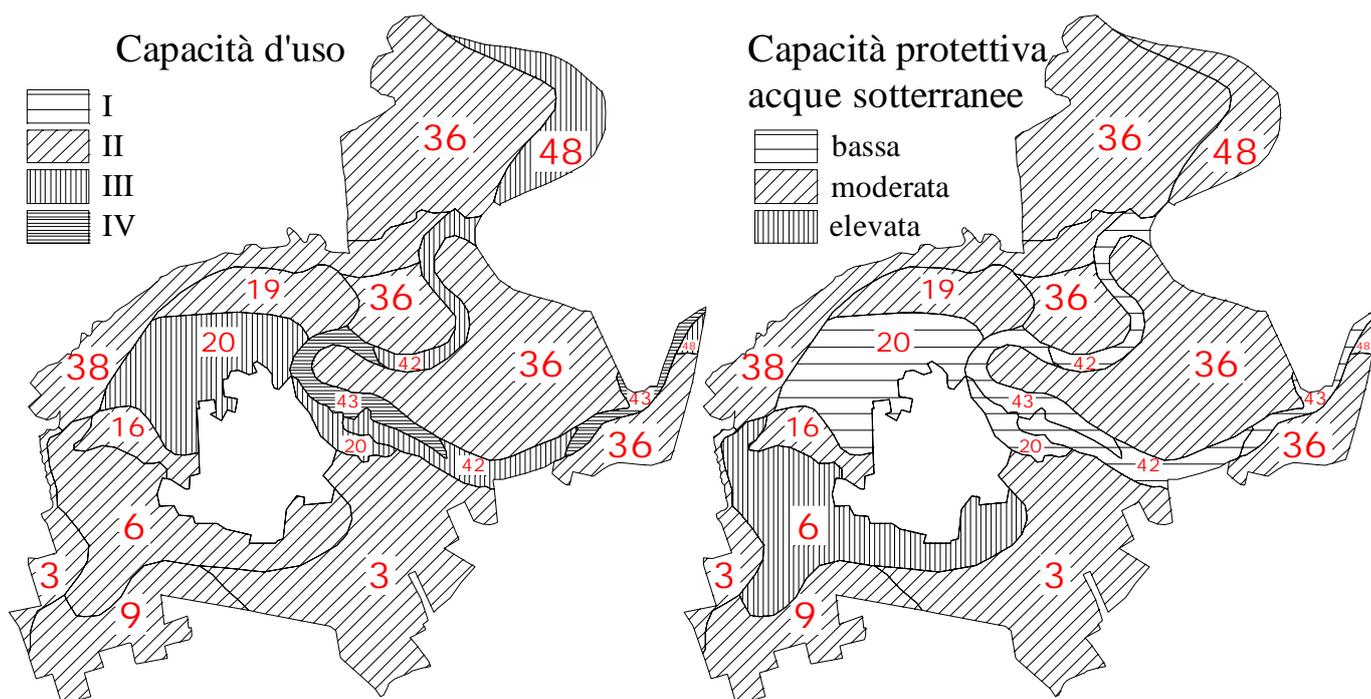


Figura 14 rappresentazione cartografica delle classi d'uso e della capacità protettiva della falda da dati ERSAL

6 Idrografia e idrologia

7 Idrogeologia - aspetti generali

7.1 CARATTERISTICHE GENERALI E STRATIGRAFIA DEI POZZI

Quanto descritto nel paragrafo 3 in merito agli aspetti strutturali, delinea l'ambito nel quale si manifesta l'accumulo ed il moto delle acque sotterranee.

La successione di terreni prevalentemente sabbiosi attribuiti alle fasi glaciali giacciono, come detto, su sedimenti più fini formati in ambienti di transizione (litoranei e deltizi). I primi presentano una porosità tra i granuli (detta primaria) mediamente di circa il 25%, che è saturata dall'acqua proveniente dalle piogge e dall'irrigazione, infiltratasi attraverso gli strati più superficiali.

L'acquifero della Pianura Padana è sostanzialmente costituito da un monostrato di sabbie e ghiaie, localmente compartimentato da livelli lentiformi semipermeabili detti "acquitards", e caratterizzato da un moto delle acque grossomodo parallelo al gradiente topografico, drenante verso il fiume Po. In corrispondenza degli acquitards possono avvenire scambi idrici verticali tra acquiferi sovrapposti dotati di differenti carichi idraulici (fenomeno della drenanza), che si manifestano con movimenti d'acqua ascendenti o discendenti.

Lo spessore di questo complesso di corpi permeabili saturi (acquiferi), dal quale si emunge l'acqua per usi potabili, zootecnici, civili ed industriali, è condizionata dalle strutture del substrato marino in precedenza descritte.

Secondo quanto esposto dall'IRSA⁶, " ...la coltre alluvionale assume potenze di poche decine di metri lungo gli assi degli alti strutturali (Villanterio, Chignolo Po), mentre raggiunge i 70 - 80 m in corrispondenza degli interposti bassi strutturali (Villanova Sillaro, Ossago) [l'asse della depressione passa in corrispondenza dell'abitato di Castiglione d'Adda, Figura 3]. Per quanto attenuate, le predette deformazioni del substrato si ripetono negli strati basali della sequenza continentale. In tutto il sottosuolo della Bassa Lodigiana la litologia dominante delle alluvioni è caratterizzata da ripetute ed irregolari alternanze di strati sabbiosi ed argillosi. A questa regola fanno però eccezione, anche in questo caso, le fasce sviluppatesi ai lati delle aste fluviali attuali e antiche (fiume Adda, fiume Serio e subordinatamente fiume Lambro).

Gli acquiferi sotterranei racchiusi in seno ad orizzonti sabbioso-grossolani sono piuttosto modesti - sia come numero che come consistenza - in corrispondenza delle dorsali sepolte di Villanterio-Codogno e di Bascapè-Caviaga. Divengono invece relativamente più cospicui in prossimità dell'Adda."

Gli aspetti idrogeologici generali del territorio sono inoltre descritti in un importante studio di ricerca applicata di carattere regionale⁽⁷⁾, che "...ha permesso di aggiornare in modo

⁶ I.R.S.A. - C.N.R.: (1981) : *Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura padana*. Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, 28 (II), Roma.

⁷ Regione Lombardia, ENI Divisione Agip, 2002. *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia* a cura di Cipriano Carcano e Andrea Piccin. S.EL.CA.(Firenze). Scala originale 1:250.000.

significativo le conoscenze sulla struttura e sull'evoluzione sedimentaria del bacino alluvionale Padano.".

Gli Autori hanno elaborato un modello tridimensionale della struttura interna e dei limiti fisici degli acquiferi Padani lombardi, con l'intento di delimitare gli acquiferi più profondi e maggiormente protetti, di mappare le aree di ricarica diretta degli acquiferi, e di fornire uno strumento utilizzabile per il calcolo dei bilanci delle risorse idriche sotterranee.

Gli Autori hanno ritenuto di individuare nella successione sedimentaria lombarda pleistocenica alcune unità idrostratigrafiche di rango superiore denominandole GRUPPI acquiferi **A, B, C, D**, costituite da complessi di strati con geometrie e caratteri petrofisici variabili, ma depositi in ambienti sedimentari contigui ed in continuità di sedimentazione, definiti a tetto e a letto da barriere impermeabili o semipermeabili di estensione regionale. Conseguentemente i flussi idrici sono prevalentemente paralleli ai limiti dell'unità (ad eccezione delle aree di ricarica diretta), e il livello piezometrico misurabile negli acquiferi presenti in ogni Gruppo è distinto e indipendente da quello degli acquiferi contenuti in altri gruppi in corrispondenza di una medesima verticale. All'interno dei gruppi è possibile distinguere localmente "complessi acquiferi" formati da Sistemi Acquiferi (corpi geologici formati da prevalenti depositi poroso-permeabili), separati da barriere di permeabilità locali e da Sistemi Acquitardi (corpi geologici formati da prevalenti depositi fini scarsamente permeabili).

In estrema sintesi, dal punto di vista stratigrafico i gruppi rappresentano uno o più cicli sedimentari compresi tra due fasi trasgressive principali (avanzamento del mare sul continente) che apportano argille marine e sedimenti continentali fini di chiusura del ciclo, mentre per effetto di oscillazioni climatico-eustatiche si producono Sequenze Deposizionali Elementari che costituiscono cicliche alternanze di corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente fine.

Le relazioni stratigrafiche dei Gruppi con le altre unità stabilite in letteratura, è riassunto nel seguente schema:

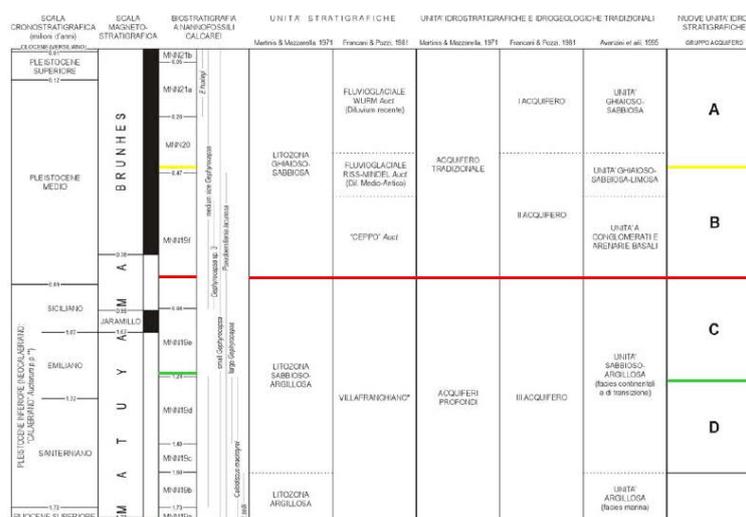


Figura 15: schema dei rapporti stratigrafici aggiornato al 2005 a seguito di nuove analisi su sondaggi eseguiti nel 2004 e 2005

Di seguito si fornisce una sintetica descrizione della sedimentologia dei gruppi acquiferi a partire dalla superficie topografica, la cui rappresentazione planimetrica è data nelle due figure relative ad ogni gruppo, che descrivono l'andamento delle isobate del limite inferiore di ogni gruppo (quota riferita al livello mare), e lo spessore cumulativo degli intervalli poroso permeabili presenti nel gruppo stesso, parametro che dà indicazione sulle potenzialità delle riserve d'acqua dolce disponibili (a prescindere dagli aspetti connessi alla ricarica).

A tali notazioni si aggiunge, nelle immagini a sinistra, con le **linee rosse** continue, la misura delle **isopache** dei singoli gruppi, cioè del loro spessore complessivo. Le tavole quindi descrivono la profondità di esplorazione necessaria per la ricerca d'acqua in acquiferi distinti.

Gruppo acquifero **A**: Il gruppo occupa la posizione stratigrafica più elevata e comprende le litologie più grossolane presenti nelle successioni considerate. I caratteri sedimentologici dei depositi paiono connessi a sistemi fluviali ad alta energia conseguenti al deterioramento climatico dei cicli glaciali pleistocenici. Si denota una chiara variazione graduale di facies da nord verso sud, con aumento delle litologie sabbiose a scapito di quelle ghiaiose, e la comparsa nelle posizioni più distali di intercalazioni decimetriche di argilla ed argilla siltosa che determinano confinamenti locali della falda.

La profondità del limite basale di tale gruppo a Castiglione d'Adda è collocata dagli Autori intorno a -50,0 m s.l.m. (da -115 m a -95 m dalla superficie) e con riferimento a tale schema si deve osservare che i pozzi dell'acquedotto, ad esclusione della porzione inferiore del pozzo 003 e tutti i pozzi privati sono stati interamente perforati nel solo gruppo A. In conseguenza di ciò il grado di separazione della porzione di acquifero captato con i filtri dei pozzi pubblici può definirsi di carattere locale.

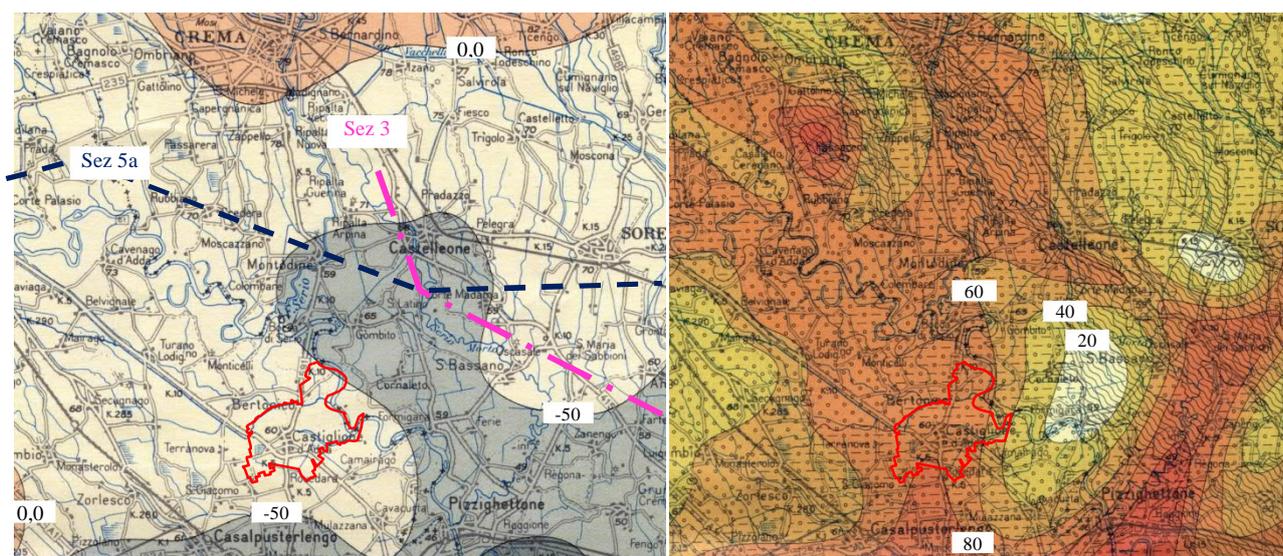


Figura 16 : profondità del limite basale dal livello mare e spessore cumulativo dei depositi poroso-permeabili del gruppo A.
 - - - - - Tracce delle sezioni idrostratigrafiche NNW- SSE e W-E di Figura 20.

Lo spessore dei depositi poroso-permeabili è stimato in 80 m in corrispondenza del confine meridionale, e decresce in direzione nord fino a circa 60 m. Le stratigrafie dei pozzi

pubblici di Castiglione d'Adda, indicano invece valori superiori di circa il 10 %, con 87 m di depositi porosi nel pozzo 003 e 85 m nel pozzo 002.

Gruppo acquifero **B**: Il gruppo presenta forti analogie con il sovrastante gruppo A. L'ambiente di sedimentazione è esclusivamente continentale, con sistemi di deposizione di piana alluvionale dominata da sistemi fluviali a canali intrecciati (braided) ad alta energia. Si ritiene che l'instaurarsi di tale ambiente vada posto in relazione al rapido deterioramento del clima connesso alle fasi glaciali pleistoceniche. La successione sedimentaria mostra un generale aumento verso l'alto della granulometria dei sedimenti ed è suddivisibile in due cicli di circa 20 m di spessore a gradazione normale (diminuzione della granulometria verso l'alto). Il ciclo inferiore è rappresentato in prevalenza da sabbie da fini a grossolane grigie e grigio giallastre, in strati da sottili a molto spessi (da 3-10 a > 100 cm), con intercalazioni subordinate di argilla siltosa verde e presenza di frustoli e tronchi. Il ciclo superiore è caratterizzato da granulometrie più grossolane, con chiara prevalenza delle ghiaie nelle aree più prossime a quelle alpine di alimentazione, e di sabbie in quelle più meridionali.

Nel territorio di Castiglione d'Adda la base del Gruppo B è collocata a una profondità di circa -200 m s.l.m. nella porzione NE del territorio (circa -250 m dalla superficie), e risale fino a circa -100 m s.l.m. (-160 m dalla superficie) poco a sud dell'abitato, raggiungendo la quota di -50 m s.l.m. all'estremità SW in località Cascinette - Fornaci. Poco a sud la grande macchia blu identifica l'area di erosione o di mancata deposizione dell'unità, coincidente con l'asse dell'anticlinale sepolta descritta nel capitolo dedicato agli elementi strutturali. Le linee rosse continue nella figura indicano lo spessore totale dei depositi del gruppo B saturo di acqua dolce.

Lo spessore totale dei depositi poroso permeabili è molto inferiore a quello del gruppo A, ed è di circa 40 m dall'abitato fino al confine settentrionale, mentre mostra valori progressivamente decrescenti verso sud, avvicinandosi all'altro strutturale.

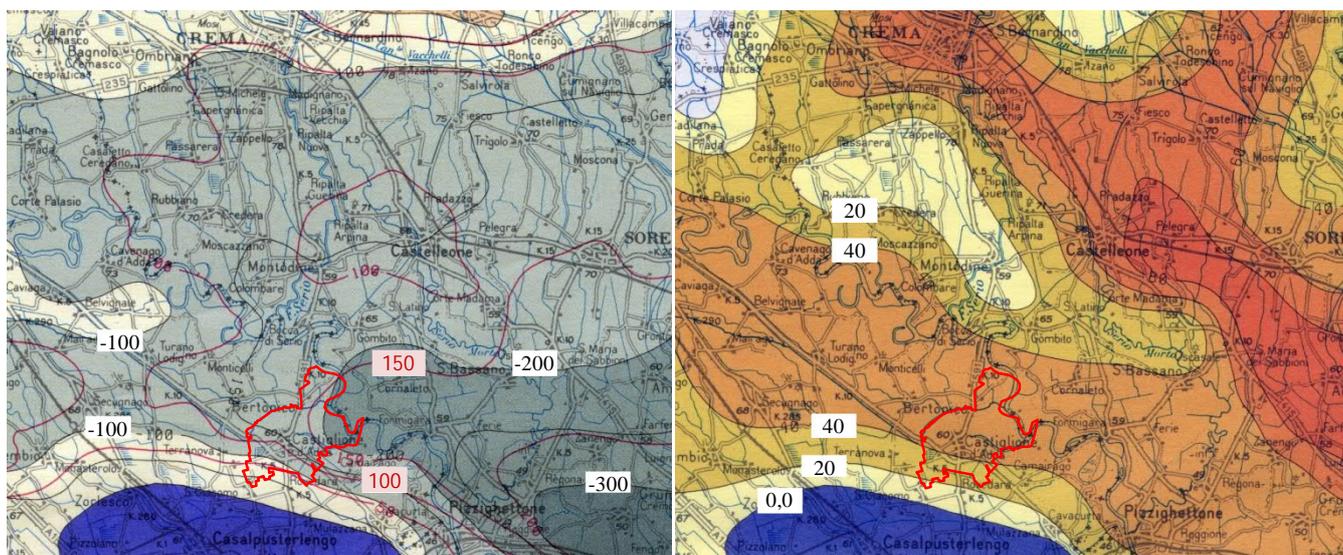


Figura 17 : profondità del limite basale dal livello mare del gruppo B. Le linee rosse continue indicano lo spessore totale dei depositi. A destra è indicato lo spessore cumulativo dei depositi poroso-permeabili del gruppo B.

Gruppo acquifero **C**: l'unità presenta notevole varietà sedimentaria, rappresentata da alternanze di depositi marini di piattaforma silicoclastica, depositi di transizione deltizi e litorali, depositi continentali di pianura alluvionale con sistemi fluviali a meandri. Gli intervalli sabbiosi dei sistemi deltizi e litorali formano serbatoi caratterizzati da significativo spessore (10-30 m), buona continuità laterale e buone caratteristiche di permeabilità e porosità (sabbie fini e medie, classate, prive di intercalazioni argillose). I depositi di piana alluvionale sono rappresentati da alternanze di sabbie grigie di buone caratteristiche idrogeologiche e argille verdi che localmente determinano condizioni di confinamento. Un'importante fase trasgressiva, con deposizione di argille marine, suddivide il gruppo in due distinti acquiferi su ampio settore della pianura lombarda.

Nel territorio di Castiglione d'Adda il Gruppo C è presente con spessori di circa 100 m nell'area centrale e settentrionale, e diminuisce progressivamente verso sud riducendosi fino a circa 50 metri. Lo spessore dei depositi poroso permeabili incrementa da sud verso nord, passando da pochi metri a oltre 40 m nel settore a nord del colatore Muzza.

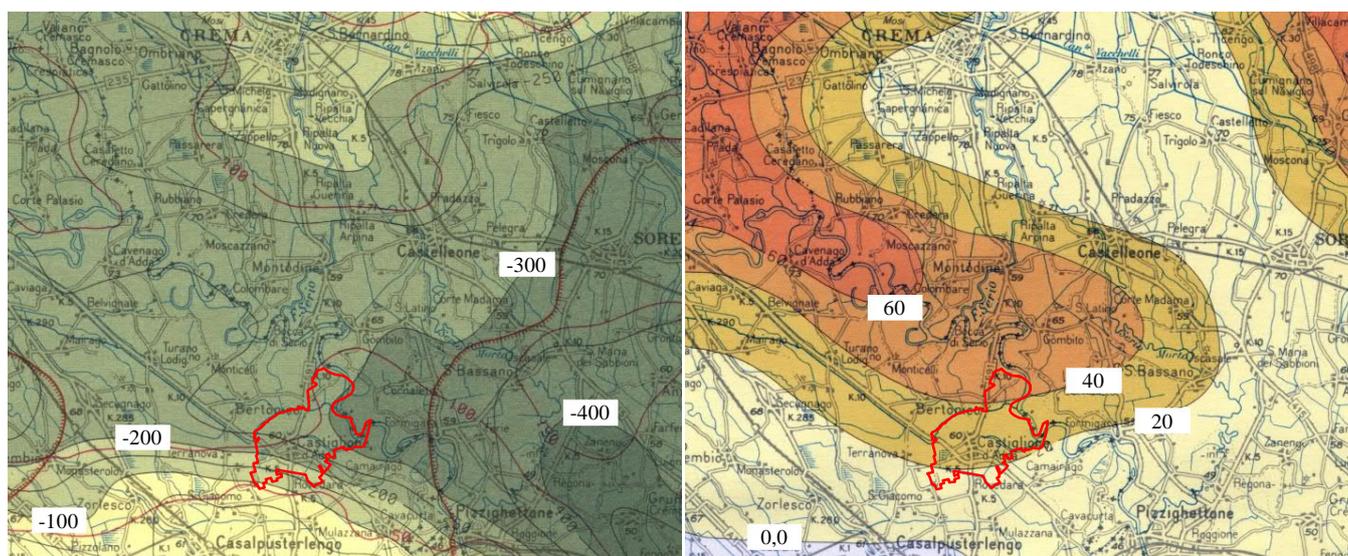


Figura 18 : profondità del limite basale dal livello mare, spessore totale (linee rosse continue), e , a destra, spessore cumulativo dei depositi poroso-permeabili del gruppo C.

Gruppo acquifero **D**: è formato da argilla siltosa e silt con intercalazioni di sabbia fine alla base, sabbia fine e media bioturbata nella parte intermedia e ghiaia alternata a sabbia nella parte alta; sistema deposizionale di delta-conoide progredante da nord verso sud.

In gran parte del territorio comunale il gruppo D mostra un limite inferiore a oltre -300 m s.l.m., che risale rapidamente nella porzione meridionale fino a quasi -100 m s.l.m. I depositi poroso permeabili contenenti acqua dolce presentano uno spessore di 20 metri che appare costante in tutto il territorio.

La struttura sopra descritta è sinteticamente illustrata dalle due sezioni della figura successiva (indicate come n.3 e n. 5a nella documentazione originaria), passanti a pochi chilometri ad est e a nord del territorio di Castiglione d'Adda, le cui tracce planimetriche sono indicate nella Figura 16.

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

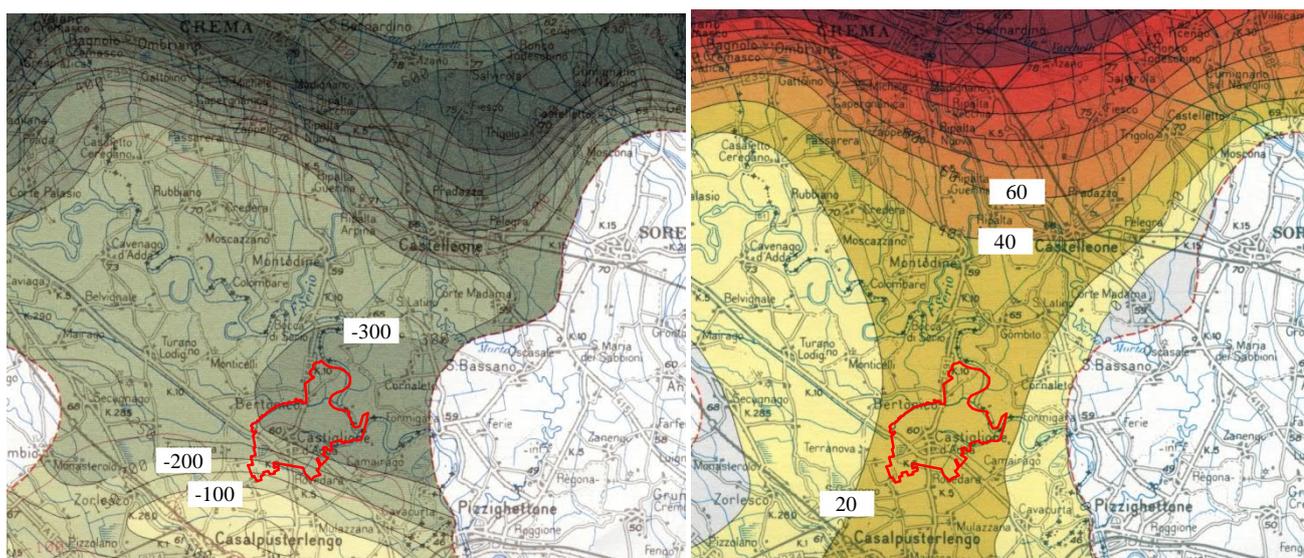


Figura 19 : profondità del limite basale dal livello mare. A destra, spessore cumulativo dei depositi poroso-permeabili del gruppo D contenenti acqua dolce.

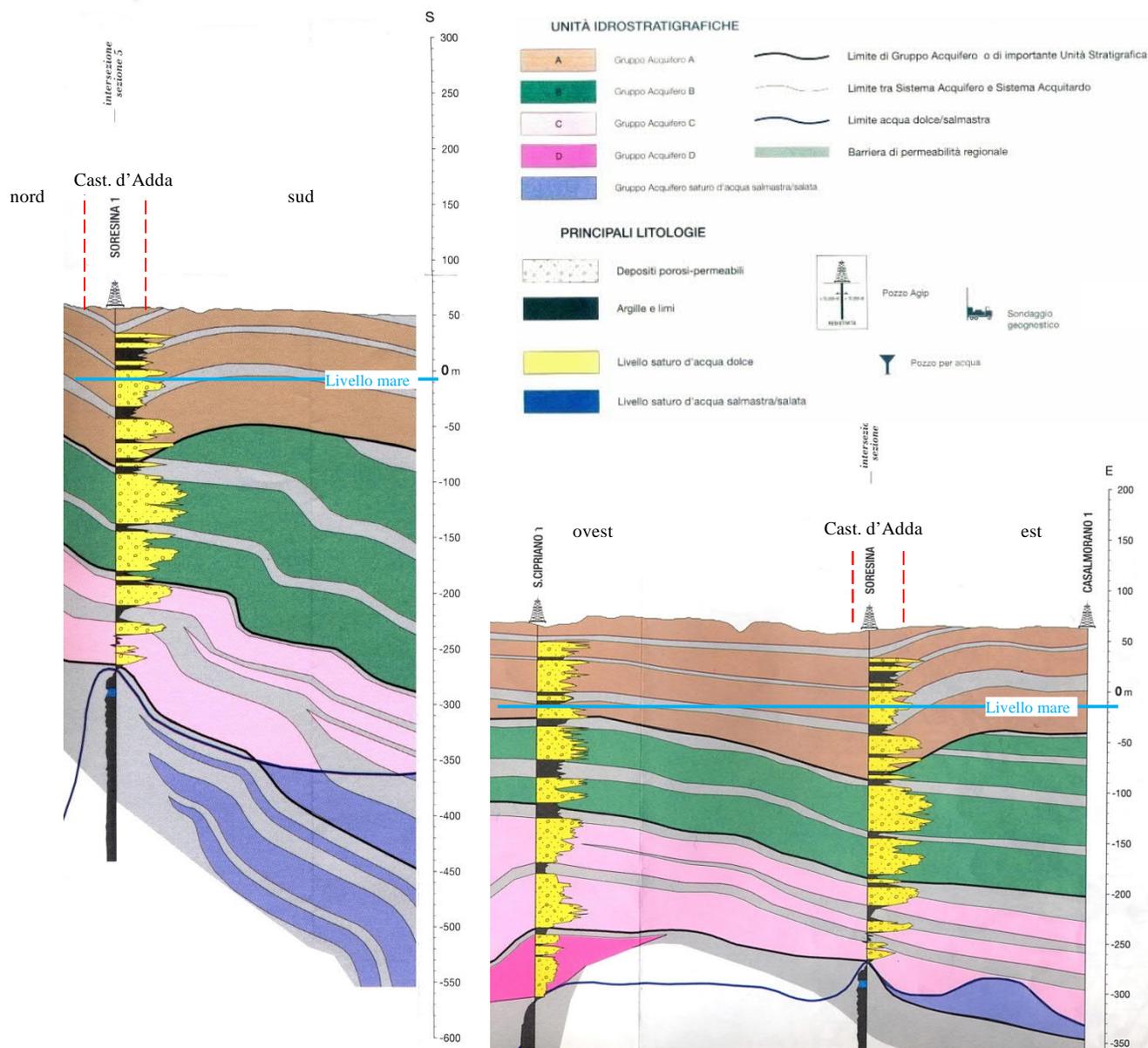


Figura 20 sezione N-S ed W-E, le cui tracce planimetriche sono riferite in Figura 16.

Sono distinti i gruppi sopra illustrati, ed indicata la posizione dell'abitato di Castiglione d'Adda, proiettato circa 10 Km da SW. Il rapporto di scala (verticale /orizzontale) è 50: 1.

In pratica nel territorio di Castiglione d'Adda la ricerca d'acqua può essere estesa con buone probabilità di successo fino a profondità di circa -350 m dalla superficie, dove sussistono anche condizioni di elevata protezione degli acquiferi dai rischi di contaminazioni superficiali. A profondità maggiori tale ricerca deve essere esclusa sia per la presenza di acque salmastre, sia perché i terreni mostrano una minore frequenza di depositi permeabili. La documentazione non entra nel merito delle caratteristiche di qualità delle acque né della velocità di ricarica degli acquiferi, fattori che possono rendere assai problematiche la gestione di tali falde.

La giacitura e la genesi dei depositi che formano l'unità idrostratigrafica A sopra descritta, l'unica attualmente captata dai pozzi presenti nel territorio Castiglione d'Adda, è stata delineata in un articolo pubblicato su "Il Quaternario"⁸, che fornisce una sezione geologica interpretativa riportata in stralcio in Figura 21 (ridisegnata). La sezione è parallela al lato est dell'autostrada ed è quindi a circa 9 Km di distanza dal centro di Castiglione d'Adda.

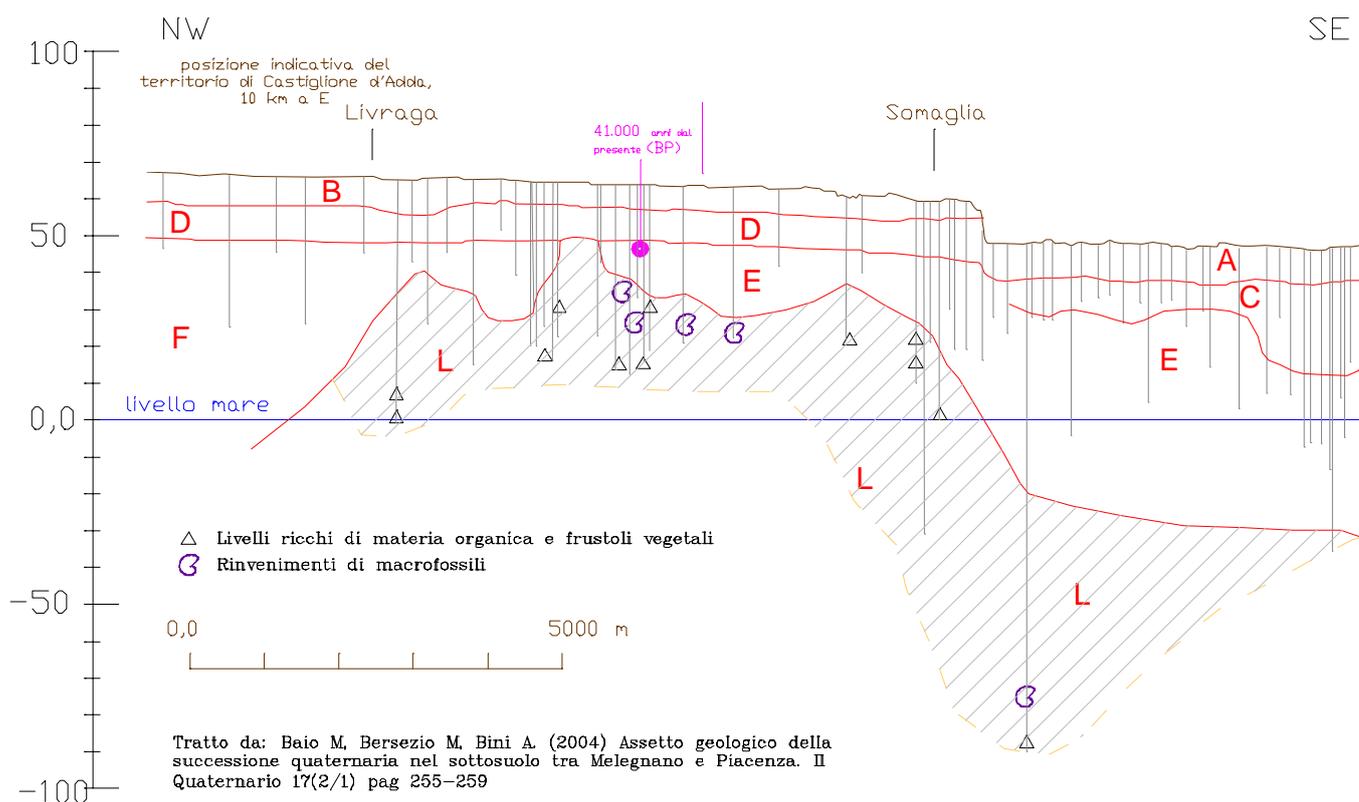


Figura 21: stralcio ridisegnato della sezione geologica NW-SE del territorio basso lodigiano riferita in Baio M, Bersezio M, Bini A. (2004). La sezione è stata realizzata principalmente con i **sondaggi effettuati per la realizzazione della T.A.V., che sono graficamente indicati con le linee grigie verticali.** Scala orizzontale 1: 100.000; scala verticale 1: 2.000. Il rapporto di scala (verticale /orizzontale) è 50: 1.

⁸ Baio M, Bersezio R., Bini A. (2004) "Assetto della successione quaternaria nel sottosuolo tra Melegnano e Piacenza". Il quaternario 17(2/1) pag. 355-359

Lo studio ha consentito la ricostruzione bidimensionale di un esteso tratto di pianura, che è stato convenzionalmente suddiviso, a partire da nord, in tre settori: "Lodigiano", "San Colombano" e "Po". In quello settentrionale, che è di diretto interesse, si sono distinte sei unità stratigrafiche fluvioglaciali e fluviali di provenienza alpina, di età compresa tra il pleistocene medio (?) e l'Olocene, che poggiano a sud sui sedimenti fini di ambiente marino e transizionale della Formazione di San Colombano (Pliocene–Pleistocene inf.), coinvolta nelle rampe del sollevamento appenninico quaternario.

Nel settore di "San Colombano", individuato circa a sud di Borghetto Lodigiano, la formazione omonima giunge fino quasi alla superficie topografica, ed è incisa a tetto da profonde erosioni vallive, successivamente ricoperte dai depositi fluvioglaciali e fluviali del pleistocene medio e superiore sia sul fianco settentrionale sia su quello meridionale.

Il settore "Po" si sviluppa a sud della scarpata morfologica principale della pianura a Somaglia, e non è di interesse per la presente indagine.

Le Unità definite dagli Autori sono le seguenti:

Unità B, sabbiosa: costituisce la porzione più superficiale dei depositi quaternari, ed è presente con continuità nella pianura lodigiana, da Melegnano alla scarpata principale che la delimita a sud. Si tratta in prevalenza di sabbie di colore da bruno a giallo oliva, organizzate in sequenze metriche coronate da facies fini limoso argillose talora ricche in materia organica. Localmente sono presenti depositi più grossolani in corrispondenza di paleovalvei. Lo spessore massimo è dell'ordine di 10 metri. Nella composizione petrografia prevalgono elementi litici sedimentari su quelli metamorfici e magmatici. Un campione prelevato alla base dell'unità ha fornito un'età di 19.909-20785 anni B.C. (21.917-22.793 B.P.).

Gli autori rilevano l'attuale difficoltà a fornire una chiara attribuzione cronostratigrafica dell'intero deposito, poiché l'età rilevata alla sua base corrisponde con il periodo di massima espansione dell'ultima glaciazione (Last Glacial Maximum – LGM), mentre le parti sommitali non sono state datate e mal si prestano ad essere interpretate come depositi fluvioglaciali distali. Per questo gli autori ipotizzano che gli stessi possano essere attribuiti alle fasi di ritiro dell'ultima glaciazione, o ad una fase postglaciale.

Unità D, sabbioso ghiaiosa: è presente nella pianura lodigiana fino alla scarpata principale che la interrompe. Si tratta di sequenze positive di ghiaie passanti a sabbie di colore grigio, coronate da sedimenti limo argillosi. La composizione petrografia delle ghiaie mostra una marcata differenza rispetto a quelle dell'Unità B, per la prevalenza di litici magmatici e metamorfici su quelli sedimentari.

Due campioni prelevati a tetto e a letto dell'unità hanno fornito una datazione di 22035 ± 300 e 23145 ± 140 anni B.P.

Secondo gli Autori l'unità D è attribuibile fasi fluvioglaciali precedenti l'LGM, probabilmente correlabili per facies ed età all'allogruppo di Besnate. Questi è costituito da varie alloformazioni riconosciute nell'area verbanica e lariana, deposte durante distinte fasi

glaciali, e costituite da diamicton ⁽⁹⁾, ghiaie e sabbie, limi e argille in facies di till, fluvioglaciali e lacustri (A. Bini 1997).

La sezione mostra che lo spessore di quest'unità varia tra 6 e 10 metri circa, e che sia il tetto sia il letto sono regolarmente paralleli alla superficie topografica.

Unità F: **ghiaioso sabbiosa**. È principalmente presente a nord della dorsale di San Colombano, ed a sud si pone in contatto eteropico con l'Unità E lungo i fianchi orientali della dorsale stessa, poggiando sui depositi fini dell'unità L lungo una superficie di erosione.

Si tratta nel complesso di due successioni ghiaiose sovrapposte dello spessore totale di circa 40 m. La superiore sfuma verso sud nell'unità E, e localmente è formata da sequenze sedimentarie minori ghiaioso sabbiose, con livelli limo argillosi sottili e poco frequenti. La composizione petrografia delle ghiaie è data dalla prevalenza di elementi litici metamorfici e magmatici su quelli sedimentari, e la provenienza è sud alpina.

Entrambe le unità E ed F secondo gli autori sono depositi fluvioglaciali attribuibili ad episodi glaciali precedenti a quello di formazione dell'Allogruppo di Besnate, o ai più antichi episodi di formazione dello stesso.

Unità G e H (sottostanti la F, individuate a nord di Cornegliano Laudense): **sabbie limose e argillose**. Sequenze cicliche positive localmente coronate a tetto da un livello limoso argilloso metrico, la cui continuità laterale è interrotta dalla superficie erosionale a letto dell'Unità F.

La base dell'unità H non è raggiunta dai sondaggi, ma a sud è si ritiene che poggia sui sedimenti fini dell'Unità L caratterizzati da una superficie erosionale molto irregolare.

Unità L: argilla limosa. L'unità soggiace la successione fluviale e fluvioglaciale sopra descritta, ed è profondamente erosa nella porzione sommitale. È costituita da sottili alternanze di limi, sabbie fini limose e limi argillosi, associati a limi sabbiosi, sabbie e sabbie fini limose, ed argille di colore nero ricche di sostanze organiche, a limi argillosi con tasche di macrofossili e livelli di torba. I caratteri litologici di questa unità sono del tutto confrontabili con quelle della Formazione di San Colombano (Pleistocene inferiore – Pliocene? Avanzati et al 1967), e sono parimenti attribuibili ad ambienti marini e di transizione.

La forte risalita di quota osservata nel settore di San Colombano, e la profonda incisione che caratterizza il tetto dell'Unità L, confermano il coinvolgimento della stessa nella struttura tettonica positiva di San Colombano.

La successione sopra descritta e rappresentata in Figura 21, essendo in sostanza costante in tutto il tratto tra Melegnano e Livraga, può essere ritenuta adatta a tracciare la porzione superficiale dei depositi a Castiglione d'Adda. La chiusura verso sud dell'unità F avviene a

⁹ Diamicton (o diamict) è un sedimento molto assortito, formato da ghiaia mescolata con matrice fine. Il termine diamicton non è un termine genetico, sebbene la più frequente origine sia l'attività glaciale. I sedimenti direttamente depositati dai ghiacciai nelle morene sono caratterizzati da grande assortimento e mostrano grandi variazioni di spessore, composizione e tessitura.

Castiglione d'Adda con minore rapidità perché l'anticlinale responsabile del sollevamento dell'unità L lungo l'allineamento Colle di San Colombano – Casalpusterlengo si attenua verso est, ed a Codogno i primi depositi contenenti fossili, seguiti a breve distanza da acque salmastre, si rinvencono intorno alla profondità di 40 metri.

Le prove penetrometriche realizzate entro il terrazzo tardo pleistocenico, ad esclusione della n.25 (CPT 1/1 agosto '07) eseguita poco a sud del limite meridionale del territorio in loc. Cascinette, sono terminate entro gli 8 – 10 metri, e si può ritenere che le stesse abbiano interessato esclusivamente l'unità B sopra descritta. La CPT 25 individua sottili alternanze di sabbie di media densità e dense, o forse ghiaiose, oltre i -10 m, e che ragionevolmente formano la parte superiore dell'unità D sopra descritta.

La grande estensione delle unità B e D in tutto il settore "lodigiano", suggerita dalla sezione del 2004, consente di ipotizzarne la sua estensione in tutta l'area del terrazzo tardo pleistocenico, e di massima di ritenere che la stessa formi ovunque un substrato di buone caratteristiche meccaniche, analoghe a quelle osservate con la prova 25.

La sezione riferita con l'allegato 1, riporta tutte le stratigrafie disponibili sul territorio.

A luglio 2008 è stata verificata l'assenza di dati più aggiornati presso l'Ufficio Acqua, Aria ed Energia Pozzi della provincia di Lodi e presso l'ARPA, ovvero l'assenza di nuove perforazioni o la dismissione di esistenti dal 2001. Le informazioni verbali acquisite portano a ritenere che nei 13 anni trascorsi dall'acquisizione della documentazione sopra citata non sia stata rilasciata alcuna nuova concessione di pozzi per acqua, ma tale informazione non è stata al momento attestata dal rilascio di informazioni ufficiali.

Di seguito si fornisce l'elenco dei pozzi noti presenti sul territorio fornito dall'ARPA a luglio 2008. Tutti i pozzi segnalati come attivi nel documento SIF sono riportati nella tavola 2.

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

codice pozzo	Pubblico PRivato	uso	profondità	stratigrafia / misurabile		Log.	Lat.	indirizzo	proprietà
				stato					
0980140001	PU	26-apr-88	63	Cementato	si / no	1554434	5007725	Piazza Municipio	AMIACQUE S.r.l.
0980140002	PU	P	61	Attivo	si / si	1554363	5007637	Piazza Parrocchiale	AMIACQUE S.r.l.
0980140003	PU	P	117	Attivo	si / si	1554288	5006894	Via Astronauti	AMIACQUE S.r.l.
0980140004	PR	P-Z	18	Attivo	no / no	1553192	5006126	C.na Barattera	Squintani F.Lli
0980140005	PR	P	16	Attivo	no / no	1553105	5005872	C.na Cascinette	Galluzzi Carlo
0980140006	PR	P	16	Attivo	no / no	1553002	5005887	F.Ne Cascinette	Fedeli Giuseppe
0980140007	PR	P	16	Attivo	no / no	1552960	5005845	C.Na Cascinette	Comasini Giovanni
0980140008	PR	P	15	Attivo	no / no	1552882	5005812	F.Ne Cascinette	Galluzzi Angelo
0980140009	PR	P	20	Attivo	no / no	1555690	5006156	C.Na Bignami	Quadrifoglio S.P.A.
0980140010	PR	7-lug-98	12	disuso	no / no	1555628	5006166	C.Na Bignami	Quadrifoglio S.P.A.
0980140011	PR	P-Z	20	Attivo	no / no	1556180	5007132	C.Na S.Maria	Dornetti Angelo
0980140012	PR	P	16	Attivo	no / no	1557430	5007569	C.Na Rotta	Gennari Olivari Annamaria E Gorla
0980140013	PR	P	18	Attivo	no / no	1555880	5009414	C.Na Bosco Griffini	Clementina
0980140014	PR	P	15	Attivo	no / no	1555288	5009344	C.Na Vinzaschina	Burana Giovanni
0980140015	PR	P-Z	20	Attivo	no / no	1555413	5009345	C.Na Vinzaschina	Burana Giovanni
0980140016	PR	P-Z	18	Attivo	no / no	1555353	5009290	C.Na Vinzaschina	Burana Giovanni
0980140017	PR	P-Z	25	Attivo	no / no	1555342	5008519	C.Na Gerra	Danesi Luigi
0980140018	PR	P-Z	18	Attivo	no / no	1555330	5008585	C.Na Gerra	Danesi Luigi
0980140019	PR	P	24	Attivo	no / no	1554733	5008352	Via Crema N 17	Scotti
0980140020	PR	P	16	Attivo	no / no	1554802	5008291	Viale Italia N 100	Star Lodi
0980140021	PR	P	14	Attivo	no / no	1554754	5008215	Via Crema N 15	Cavanna G.
0980140022	PR	P	16	Attivo	no / no	1554875	5008440	Via Crema N 15	Cavanna Giacomo
0980140023	PR	P	20	Attivo	no / no	1553460	5008023	C.Na Mulino Muzza	Giupponi - Manzoni
0980140024	PR	P	18	Attivo	no / no	1552972	5007360	C.Na Grande	Rossi Angelo Fusari F.Lli
0980140025	PR	P-Z	24	Attivo	no / no	1553018	5007272	C.Na Grande	Gruppi - Bersani
0980140026	PR	P-Z	22	Attivo	no / no	1553415	5008026	C.Na Mulino Muzza	Giupponi - Manzoni
0980140027	PR	P-Z	16	Attivo	no / no	1554625	5007237	Via Roma	Oppizzi Franco Olivari Annamaria E Gorla
0980140028	PR	P	20	Attivo	no / no	1555870	5009486	C.Na Bosco Griffini	Clementina
0980140029	PR	IR	22	Attivo	no / no	1556137	5009256	C.Na Vinzaschina	Burana Giovanni
0980140030	PR	1-gen-95	16	disuso	no / no	1553790	5007226	C.Na Melu'	Cavalli Giuseppe Squintani Angelo, Piero E
0980140031	PR	P-Z	20	Attivo	no / si	1553209	5006105	C.Na Barattera	Andrea Sdf
0980140032	PR	P-Z	24	Attivo	no / no	1556095	5007136	C.Na S. Maria	Dornetti Angelo
0980140033	PR	P	22	Attivo	no / no	1554734	5008194	Via Crema N. 11	Ragguaglio Luigi
0980140034	PR	I	24	Attivo	no / no	1554651	5006810	Via Emilia N. 2	Dragoni Liliana
0980140035	PR	IR	35	Attivo	si / si	1555012	5007279	Campo Sportivo	Comune

USO: I= industriale; Z= zootecnico; A= agricolo in genere, compreso innaffio orti; C= usi civili in genere; P= potabile; IR = irriguo
 PROFONDITA'= profondità massima del pozzo; (p)=profondità indicata dal proprietario, in assenza di documentazione;
 CODICE: dal "catasto pozzi e piezometri" del SIF.

Figura 22 : elenco pozzi conosciuti a Castiglione d'Adda. Dati ARPA Lodi.

7.2 ALIMENTAZIONE E DEFLUSSO DEGLI ACQUIFERI DI CASTIGLIONE D'ADDA

Il deflusso della falda freatica nel basso lodigiano è caratterizzato dalla presenza di un asse di alimentazione collocato in posizione intermedia fra il Lambro e l'Adda (a nord di Lodi vi è buona corrispondenza con il percorso del canale Muzza), e dal drenaggio esercitato da questi fiumi che scorrono ad una quota inferiore mediamente di circa 15 m rispetto al livello fondamentale della pianura.

Il gradiente idraulico medio varia dal 1 al 2 ‰ in direzione NW – SE ma a partire da una distanza di circa 6 Km dall'alveo dell'Adda il deflusso delle acque sotterranee subisce una forte rotazione disponendosi in direzione W – E, perpendicolarmente al corso dell'Adda; tale fenomeno a sud di Castiglione d'Adda risulta particolarmente accentuato e la direzione di deflusso assume un andamento da SW verso NE, probabilmente in relazione alla presenza di un asse di anticlinale posto in direzione W – E che ha ridotto lo spessore dei depositi quaternari continentali elevando i terreni più antichi caratterizzati da una minore permeabilità.

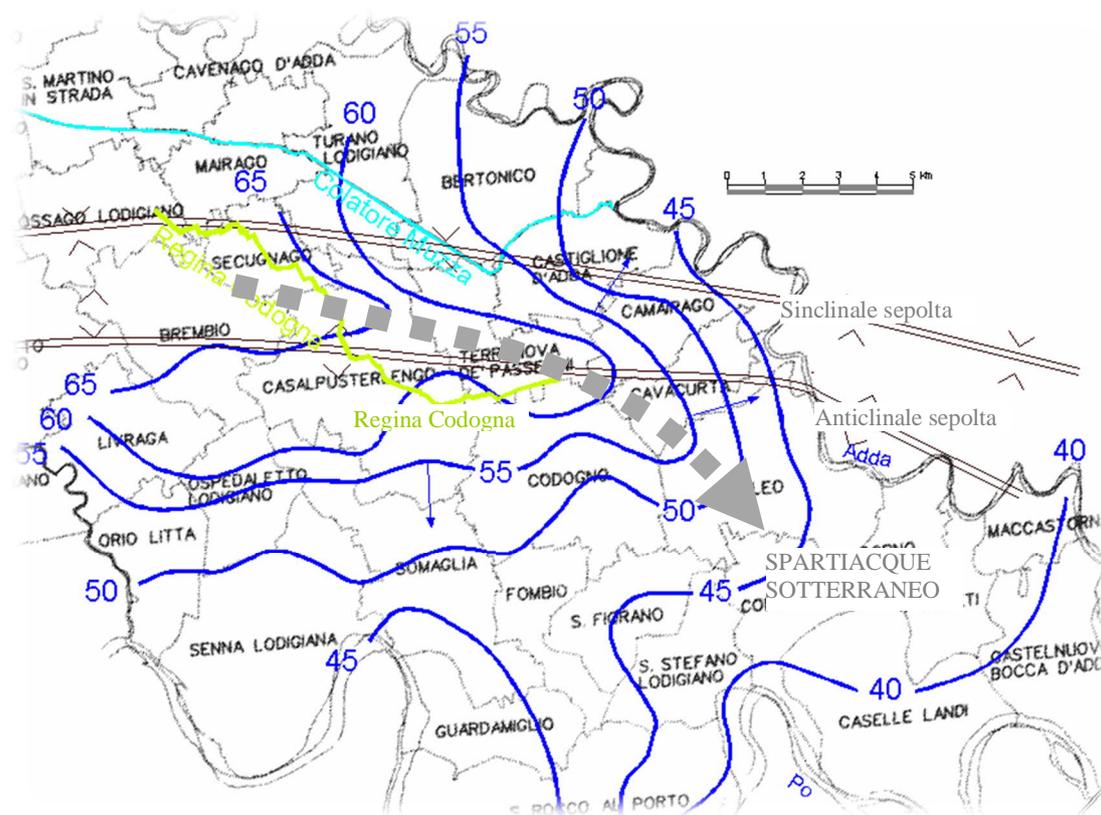


Figura 23: schema delle isopiezometriche della prima falda nel basso lodigiano. tratto da "IL LAMBRO LODIGIANO E LA SUA VALLE" Consorzio del Lodigiano Febbraio 1994. Sono indicate le principali strutture sepolte indicate in letteratura ed il percorso della roggia Regina Codogna che alimenta numerose derivazioni lungo l'asse centrale del basso lodigiano, e del colatore Muzza che ha costantemente funzione drenante della falda.

Il documento riportato nella Figura 23, tratto da "Il Lambro lodigiano e la sua valle" del Consorzio del Lodigiano (Febbraio 1994), individua le caratteristiche salienti del campo di moto nel basso lodigiano, che manifestano complesse relazioni con i fiumi principali e le strutture sepolte.

Si distingue nella parte centrale una fascia di larghezza di circa 1 Km che costituisce uno spartiacque sotterraneo di importanza locale, che congiunge Brembio con Terranova dei Passerini, passando a nord est di Codogno per poi piegare ed attenuarsi verso SE.

Questa struttura separa un flusso prevalentemente da nord a sud, in direzione del fiume Po, che interessa i territori ad ovest e a sud di Codogno, da quello verso est e nord est che interessa i territori rivieraschi dell'Adda.

Lo spartiacque trova buona corrispondenza con la struttura anticlinale passante a tra Brembio e Cavacurta riferita nella cartografia geologica ufficiale (Foglio 60 Piacenza), e con un altro importante fattore di alimentazione della falda, rappresentato dal percorso della roggia Codogno e delle sue derivazioni, schematicamente riferita nella figura precedente.

L'area di Castiglione d'Adda secondo tale rappresentazione, è interessata da una falda in direzione SW-NE con gradienti compresi tra l'7,0 ed il 2,5 ‰, che si attenuano entro le alluvioni oloceniche dell'Adda a causa della maggiore permeabilità di questi depositi.

Un'altra rappresentazione della falda freatica è fornita dalla tavola 3 "Carta idrogeologica delle direzioni di deflusso" redatta per il piano cave della provincia di Lodi a gennaio 2003. Lo stralcio della tavola, rappresentata nella figura seguente, delinea una situazione del tutto analoga a quella vista in precedenza, dove però i gradienti sono costanti, con valori prossimi al 3,3 ‰ tra le isopiezometriche 50,0 e 55,0 m s.l.m. , e si attenuano fino ad un minimo dell'1,0 ‰ in prossimità dell'Adda.

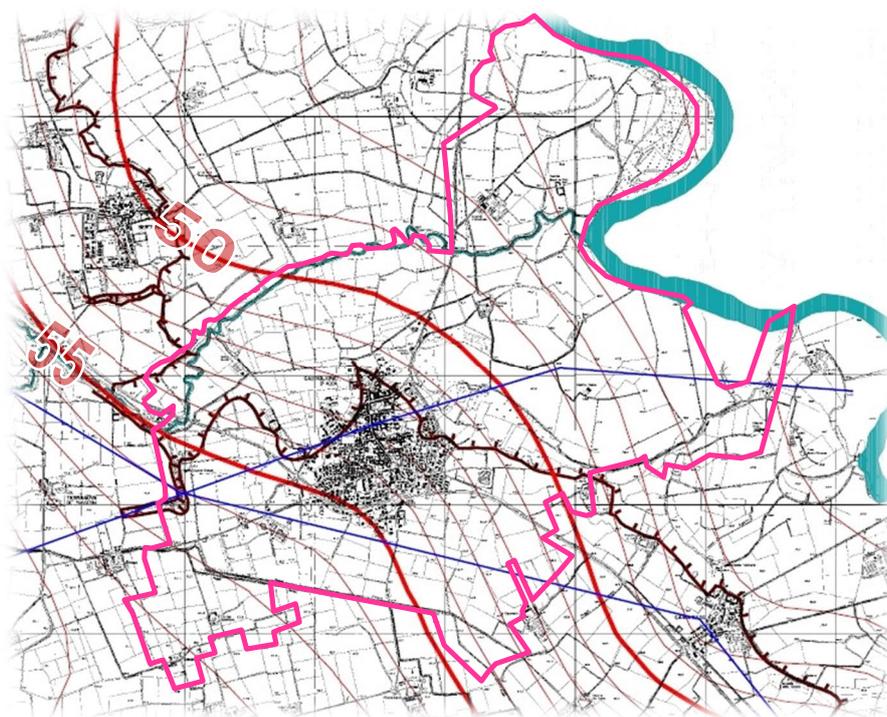


Figura 24: isopiezometriche stralcio della "Carta idrogeologica delle direzioni di deflusso" redatta per il piano cave della provincia di Lodi a gennaio 2003.

L'alimentazione della falda freatica, come detto, è riferibile principalmente all'irrigazione e subordinatamente alle precipitazioni efficaci.

Per valutare l'escursione stagionale del livello è opportuno citare i dati recentemente rilevati nel pozzo pubblico 003 di Castiglione d'Adda, che però presenta filtri nell'intervallo tra -88 m e -115 m, separati dalla superficie da alcuni strati argillosi di spessore metrico posti tra circa -50 e -80 m. Tale condizioni e l'esito delle misure eseguite in prossimità del pozzo nel piezometro collocato presso la CPT 3/3 2008, dove l'acqua è risultata quasi sempre assente fino a -9,6 m (una misura il 16.08.08 ha segnalato acqua al fondo, ma la stessa non appare del tutto affidabile), portano a ritenere che il comportamento osservato nel pozzo sia rappresentativo di una falda debolmente in pressione (circa 2,8 m), e non della falda freatica.

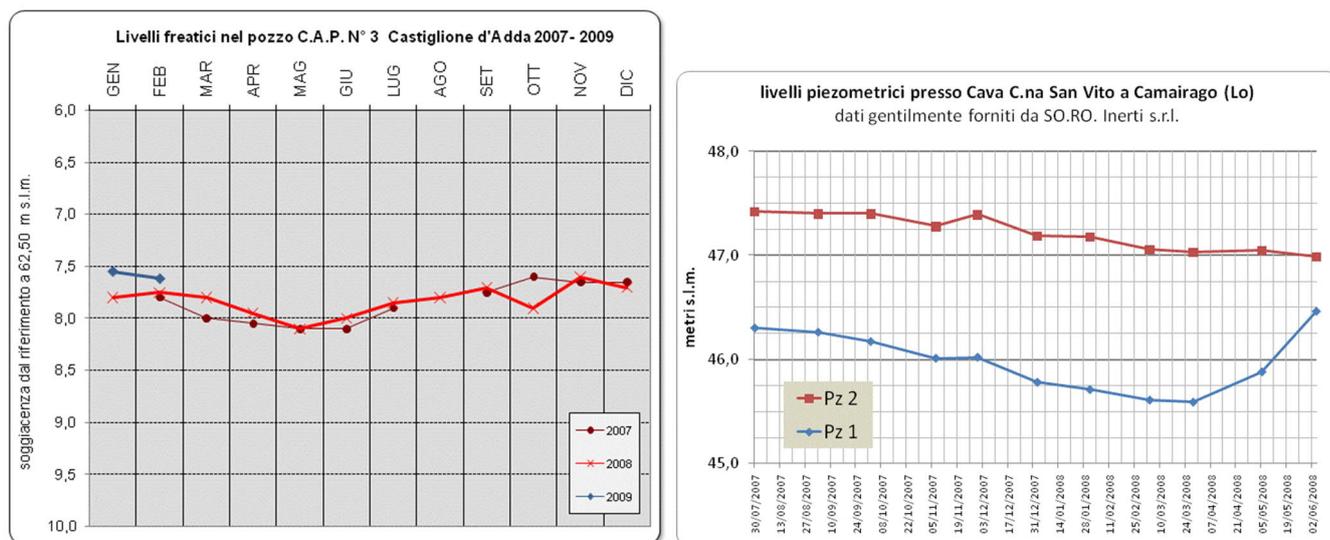


Figura 25: misure piezometriche nel pozzo 003 e in due piezometri della cava Soro dal 30.07.2007 al 04.06.2008

I due anni disponibili segnalano un'escursione molto regolare, tipico delle aree irrigue della pianura, caratterizzato da un minimo tardo primaverile in corrispondenza dell'asciutta irrigua, ed un massimo a fine estate – inizio autunno. L'escursione è stata di 0,5 m in entrambi gli anni, e l'escursione complessiva nel periodo considerato di 0,55 m.

2,8 km ad est del pozzo 003 sono presenti due piezometri (Pz 1 e Pz 2) collocati in prossimità della cava So.Ro. Inerti di C.na San Vito a Camairago, che manifestano comportamento analogo, con escursioni totali rispettivamente di 0,87 m e 0,43 m, ed un minimo nei mesi primaverili.

Le informazioni sopra riferite riguardano un intervallo di tempo molto breve, e per avere una adeguata descrizione del probabile comportamento della falda nel tempo è opportuno considerare due "serie storiche" di misure mensili di livello di pozzi, estese per circa 20 anni. La prima riguarda il pozzo 001 di Camairago, posto 2,8 km a ESE del pozzo 003 di Castiglione d'Adda che presenta filtri nella falda superficiale tra -21 m e -31 m dalla superficie, il secondo il pozzo 002 di Maleo che presenta i filtri tra 29 e 34 m e tra 37 e 46 m entro una successione quasi esclusivamente sabbiosa. Il pozzo di Maleo è stato da alcuni anni trasformato in piezometro per il solo monitoraggio della falda freatica. I dati illustrati in Figura 26 indicano un andamento che nei valori media appare molto omogeneo, con un chiaro minimo nel mese di maggio, massimi tra agosto e settembre, ed escursioni dei valori medi di 0,56 m a Camairago e 0,30 m a Maleo.

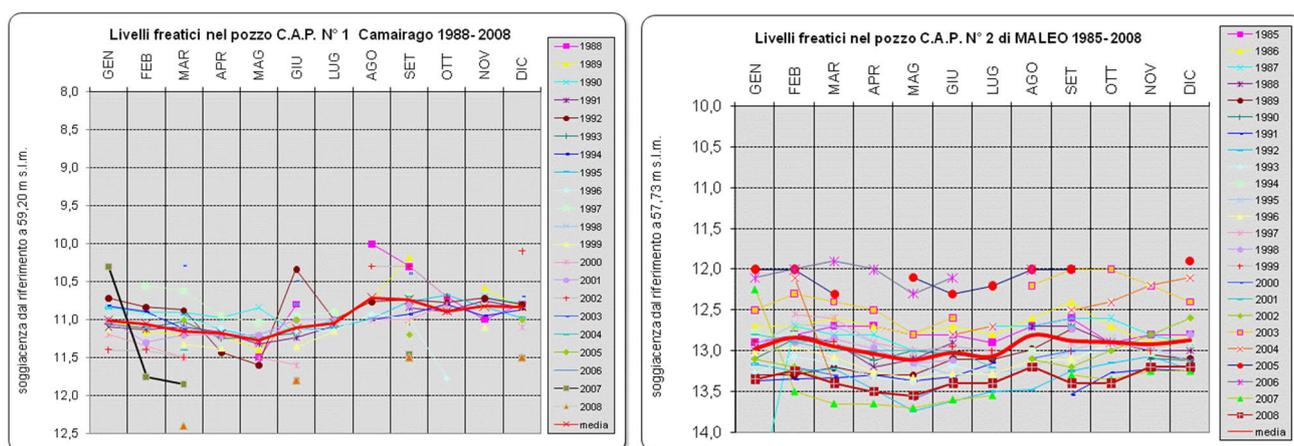


Figura 26: misure di soggiacenza della prima falda nei pozzi in prima falda Camairago 001 e Maleo 002.

Considerando i singoli anni il pozzo di Camairago presenta escursioni comprese tra 0,23 m e 1,5 m dal 1988 al 2001. La stima è però poco affidabile perché sono disponibili solo il 75% delle misure mensili nel periodo considerato. Dal 2002 al 2008 sono disponibili solo letture circa trimestrali, ma l'escursione stimata è analoga a quella del periodo precedente. L'escursione totale nel periodo considerato, ossia il massimo assoluto meno minimo assoluto, è di 2,4 m.

Per il pozzo di Maleo i rilievi sono più completi (81 % dei dati mensili), e l'escursione annua è compresa tra 0,30 e 1,45 m (scartando due valori estremi che paiono dubbi), con media di 0,65 m, valori in linea con quelli evidenziati per il pozzo di Camairago. L'escursione totale nel periodo considerato è di 3,0 m.

Con riferimento agli anni 2007 e 2008 si nota che l'andamento descritto dai valori mensili del pozzo di Maleo, sicuramente in falda freatica, è molto simile a quello del pozzo 003 di Castiglione d'Adda, sia nell'entità dell'escursione annua, sia nella stagionalità.

Tale condizione, se verificata nel tempo, consente di ipotizzare che l'alimentazione della seconda falda, lievemente in pressione, abbia lo stesso andamento stagionale della falda freatica. L'alimentazione proviene dalla falda libera sovrastante dalla quale risulta separata da intervalli limo argillosi discontinui o semipermeabili, e non subisce significativi ritardi nelle risposte all'infiltrazione verticale.

I dati disponibili, in sintesi, descrivono escursioni annue stagionali generalmente modeste, inferiori al metro, ed occasionalmente la possibilità che si manifestino escursioni prossime a 2,0 m. Si conferma infine lo stretto legame delle fluttuazioni con la pratica irrigua.

Ad agosto 2008, nel mese che generalmente coincide con il massimo livello freatico, è stato eseguito un rilievo delle isofreatiche che però a causa degli scarsa quantità di punti di misura della soggiacenza è stato integrato con alcuni dati rilevati in precedenza.

Per l'area perfluviale dell'Adda e del colatore Muzza, dove sono del tutto assenti dati di livello piezometrico, si è formulata l'ipotesi che il fiume fosse in condizione circa di piena ordinaria (tempo di ritorno di 2 anni), derivando le quote di pelo libero dalle recenti

elaborazioni predisposte dall'Autorità di bacino del Po¹⁰, ed assimilando tali quote a quelle locali della falda. Nella formazione della carta si è ipotizzato che il medesimo gradiente interessasse sia il colatore Muzza sia l'Adda Morta. Il flusso definito dalle misure è da SW verso NE, perpendicolarmente al margine del terrazzo tardo pleistocenico, con gradiente del 5‰, e di circa l'1‰ nella piana olocenica, drenante verso l'Adda.

La profondità della falda freatica è compresa tra 6 e 14 metri entro il terrazzo tardo pleistocenico, incrementando dalla località Cascinette verso l'abitato di Castiglione d'Adda ed il margine della scarpata. Nella piana olocenica la soggiacenza varia tra 4 e 6 metri nell'area compresa tra il piede del terrazzo e il colatore Muzza all'altezza della SS 591, ed è compresa tra 1 e 3 metri nell'area delle alluvioni recenti tra la statale e l'alveo attivo dell'Adda, risultando subaffiorante lungo l'Adda Morta e nei terreni adiacenti.

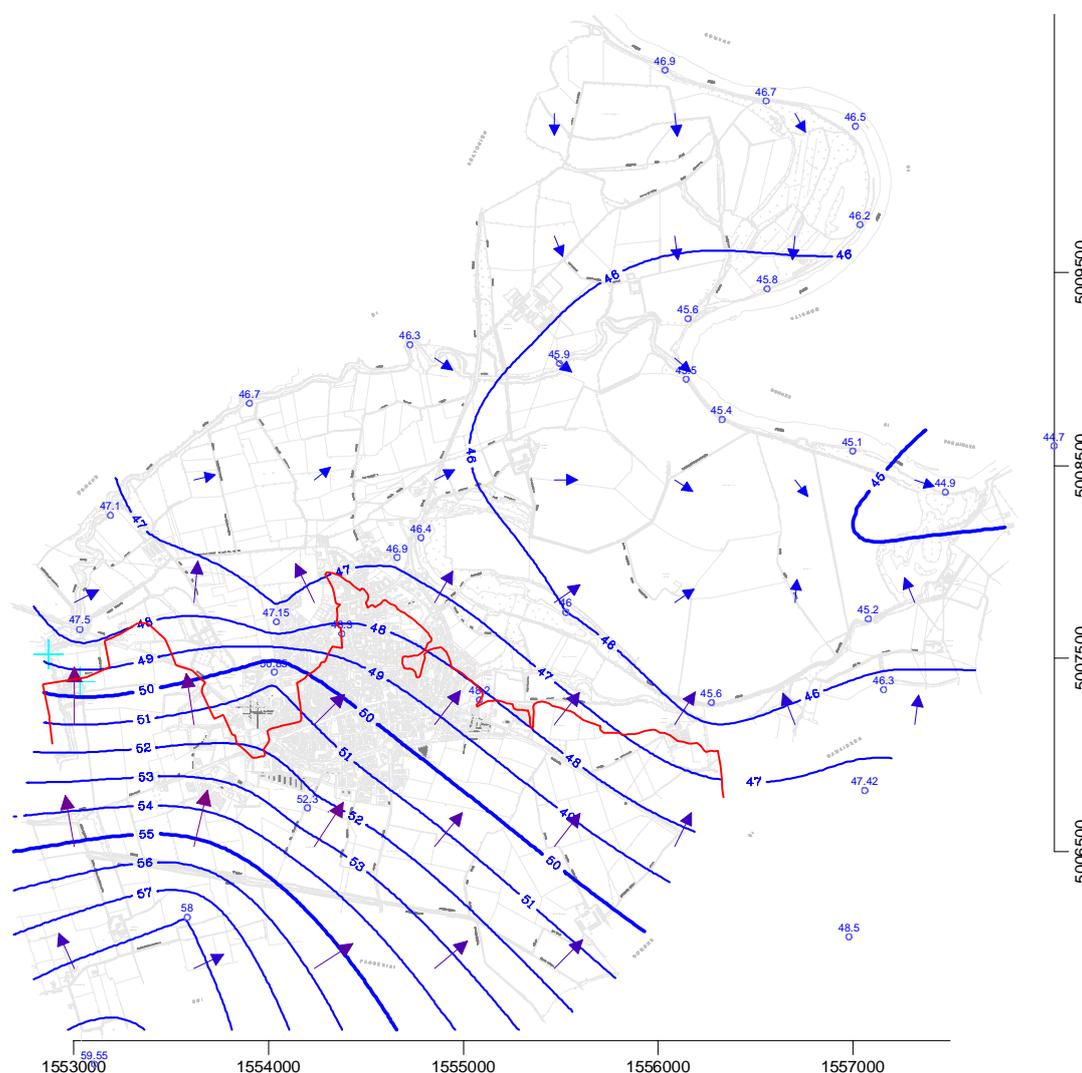


Figura 27: isopiezometriche della prima falda ottenute con le soggiacenze minime disponibili.  Ciglio scapata principale

¹⁰ Studio di fattibilità della sistemazione idraulica:- del fiume Adda nel tratto da Olginate alla confluenza in Po,- del fiume Brembo nel tratto da Lenna alla confluenza in Adda,- del fiume Serio nel tratto da Parre alla confluenza in Adda. Attività 3.X.2.1.: Definizione delle portate di piena di riferimento. Elaborato 3.X.2.1./1/1R: Relazione descrittiva e di analisi. Autorità di bacino del fiume Po, 03/06/2003.

Sottraendo alla superficie topografica quella della falda freatica è stato possibile individuare la distribuzione planimetrica della soggiacenza minima.

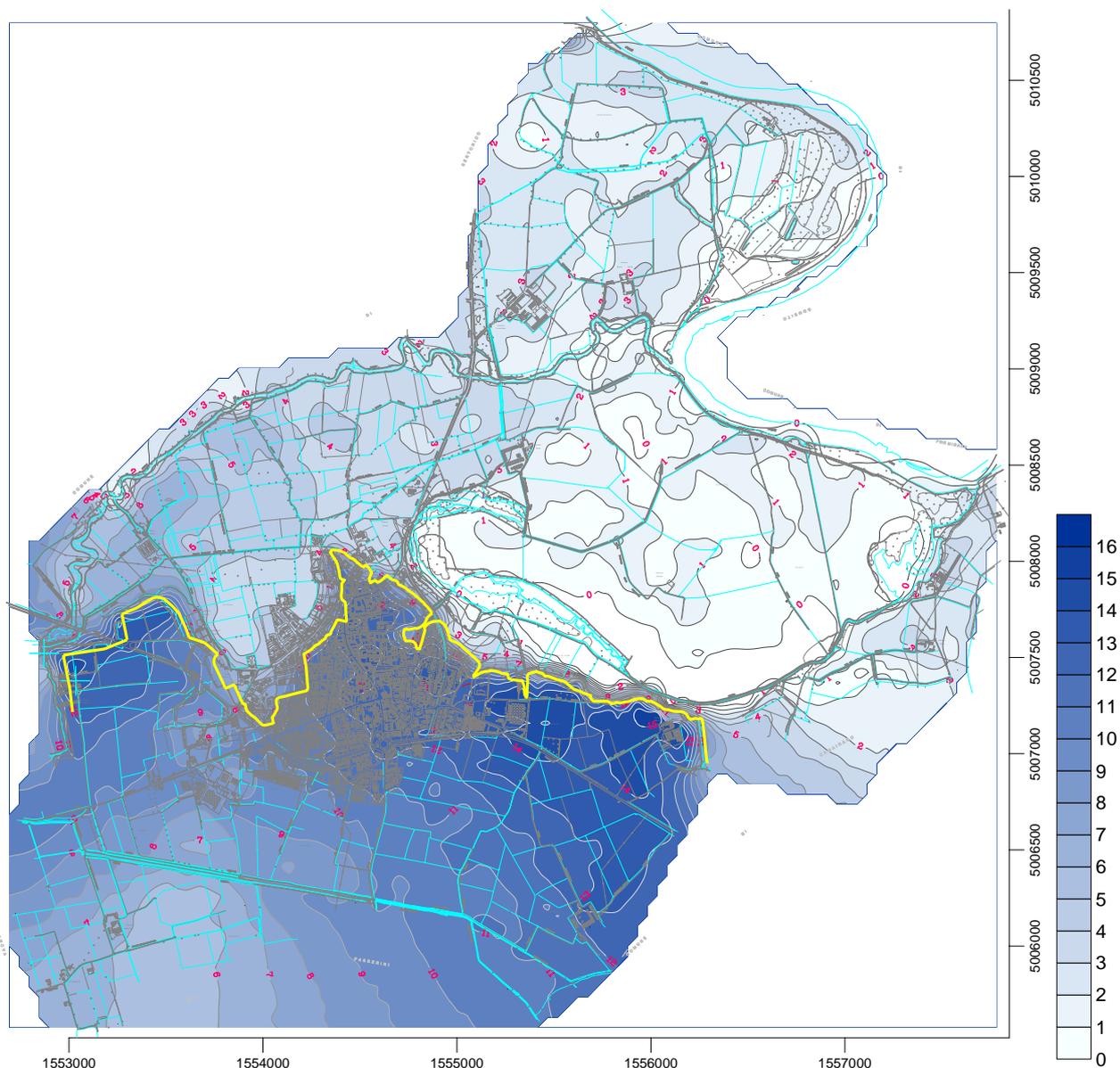


Figura 28: soggiacenza della falda in metri dal piano campagna (differenza tra quota topografica e quota di falda).

 Ciglio della scapata principale.

L'esito è riferito nella Figura 28, che evidenzia presenza di valori minimi di 6 – 7 metri all'estremità SW del territorio, che incrementano verso nord e nord est fino ai valori massimi di 13 metri nell'area tra la C.na Grande e cimitero, e di 13 – 15 metri lungo la fascia tra la porzione centrale dell'abitato e la cascina Grande, in corrispondenza o poco a monte del ciglio della scarpata morfologica principale.

A valle della stessa si hanno valori di 5 – 6 metri nell'area di sbocco del colatore Muzza nella piana olocenica, intorno al Mulino Muzza, che diminuiscono gradualmente fino a 3 metri in corrispondenza della SS 591 – cascina Gerra. La restante superficie è caratterizzata da valori

di soggiacenza variabili irregolarmente in relazione a singolarità della superficie topografica, tra 1 e 2 metri a nord del tratto terminale del colatore Muzza, e tra 0 e 2 metri a sud dello stesso fino alla riserva Adda Morta Lanca della Rotta.

7.3 CARATTERI IDRAULICI E GEOCHIMICI DELL'ACQUIFERO DI CASTIGLIONE D'ADDA

Per determinare una stima dei valori caratteristici dell'acquifero è possibile fare riferimento ai valori di portata specifica individuati all'atto della costruzione dei pozzi, che si ritiene possano essere rappresentativi della massima efficienza del pozzo stesso.

Il degrado cui sono soggetti i filtri a causa della deposizione di ossidi, in genere connessi all'attività microbica, determina condizioni probabilmente lontane da quelle di perfetta efficienza che rappresenta l'ipotesi alla base delle relazioni che consentono la stima dei parametri dell'acquifero a partire dalle portate specifiche.

I valori di portata specifica Q_s dei pozzi considerati (v. Tabella 1) variano da 3,2 a 9,4 l/s*m, risultando simile o inferiore a quella determinata in altri pozzi pubblici del basso lodigiano finestrati nel primo acquifero. Ad esempio il pozzo S. Stefano 1, finestrato negli intervalli sabbioso ghiaiosi da 31 a 53 m, presenta una portata specifica di 15,4 litri/s per metro di abbassamento, analoga a quella di Maleo (12÷14 l/s*m), ma nel Pozzo di Corno Vecchio il valore (8,4 l/s*m) è simile a quello medio di Castiglione d'Adda (6,6 l/s*m).

Si deve sottolineare che nelle aree prossime ai depositi olocenici dei principali fiumi si assiste in genere ad un considerevole incremento di tale parametro, che in territorio cremonese raggiunge valori massimi di 31,3 l/s m nel pozzo Pizzighettone 11 (Studio idrogeologico della Provincia di Cremona, 1992, cit.).

Una stima della trasmissività (T) a partire da tali dati è ottenibile mediante il metodo di Cassan¹¹ (1980) impostando la risoluzione dell'equazione

$$\ln s_0/J_0 r_p = s_0 \frac{2\pi T}{Q} + \ln s_0 \frac{2\pi T}{Q}$$

con metodo numerico, analogamente a quanto indicato in una recente pubblicazione della Provincia di Milano¹².

dove: - J_0 rappresenta il gradiente piezometrico: il valore utilizzato è di 0,004-0,005, desunto dalle curve isopiezometriche della prima falda sulla base dei rilievi di agosto 2008;
- r_p è il raggio del pozzo in corrispondenza delle finestre: = 0,08 m a 0,178 m;
- s_p è l'abbassamento in m di livello misurato nel pozzo durante il collaudo per le varie portate.

Il risultato del calcolo conduce alla seguente tabella:

Pozzo	Data collaudo	Portata l/s	liv statico	liv dinamico	abbassamento s_0 (m)	portata specifica (l/s * m)	j_0	r_p	$\ln s$	q/T	q+lnq	T (m ² /s)
002	giu-69	49	10,1	18,7	8,6	5,7	0,005	0,155	9,31	1103	9,31	6,6E-03

¹¹ Cassan M.(1980) : Les essais d'eau dans la reconnaissance del sols – Ed Eyrolles, Paris.

¹² SIF- Provincia di Milano (2000) : le risorse idriche sotterranee nella Provincia di Milano. , volume II° - Stato qualitativo della acque.

003	ott-84	25	5,4	9,0	3,6	6,9	0,005	0,178	8,31	905	8,31	7,1E-03
035	apr-04	15	13,42	15,5	2,06	7,3	0,005	0,090	8,43	863	8,43	7,6E-03
001 Terranova Passerini	nov-79	41,6	3,3	15	11,7	3,6	0,004	0,168	9,77	1767	9,77	4,4E-03
002 Bertonico	lug-85	47	3,2	17,7	14,5	3,2	0,004	0,168	9,98	1938	9,98	4,1E-03
001 Camairago	nov-59	8	9,20	10,05	0,85	9,4	0,004	0,08	7,88	668	7,88	9,1E-03

Tabella 1 : elaborazione dei valori della trasmissività in base alle prove di collaudo dei pozzi.

Il valore medio espresso dai calcoli è di $T = 6,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, lievemente inferiore a quello medio riferito nella citata pubblicazione della Provincia di Milano (2000) per l'acquifero tradizionale nella porzione meridionale della stessa ($8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$). Il dato designa comunque la buona produttività dell'acquifero, peraltro sfruttata in modo esclusivo anche dai pozzi per uso agricolo e domestico presenti nel territorio comunale.

È stata inoltre utilizzata un'altra relazione empirica riportata da Celico¹³ per la stima della conducibilità idraulica K in m/s in pozzi incompleti in falda freatica:

$K = Q_p \log(a/l/r_p) / 2,73 l s_o$, con l = lunghezza dei filtri ed a = coefficiente variabile tra 1,32 e 1,60 se il pozzo è intestato sul substrato impermeabile, e pari a 0,66 se il pozzo non raggiunge il substrato.

Pozzo	Portata l/s	abbassa mento s _o (m)	r _p	Lunghezza filtri (m)	a	K (m/s)
002	49	8,6	0,155	16,4	0,66	2,35E-04
003	25	3,6	0,178	14,5	0,66	3,04E-04
035	15	2,06	0,090	7	0,66	6,52E-04
001 Terranova Passerini	41,6	11,7	0,168	9	0,66	2,24E-04
002 Bertonico	47	14,5	0,168	10,5	0,66	1,83E-04
001 Camairago	8	0,85	0,08	10	0,66	6,61E-04

Tabella 2: stima del valore di permeabilità dell'acquifero ottenuta dalle prove di collaudo dei pozzi.

L'intervallo di valori ottenuto ed il valore medio di $K = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, coincidono con i limiti attribuiti in letteratura agli acquiferi in sabbie fini e medie (es. Celico P. cit. tabella 7.5).

L'aspetto qualitativo delle acque sotterranee è valutato mediante le analisi chimiche delle acque grezze, eseguite da Amiacque Srl nell'ambito dei controlli interni effettuati dal gestore del servizio idrico integrato ai sensi dell'art. 7 del Decreto Legislativo 2 febbraio 2001, n. 31.

L'esito delle analisi riflette le condizioni strutturali e di circolazione precedentemente viste, definite dalla notevole spessore locale dei gruppi acquiferi A e B (Figura 16 e Figura 17), al quale si contrappone la posizione topograficamente elevata dei depositi transizionali e marini

¹³ Celico P. (1986): prospezioni idrogeologiche – VOL. I° , Liguori Ed. Napoli

del Pleistocene inferiore - Pliocene posti a sud di Castiglione d'Adda. Questi determinano un parziale ostacolo al flusso verso sud o SSE della falda freatica, ed una maggiore concentrazione in tali aree di sostanze caratteristiche di ambienti con basso potenziale ossidoriduttivo come l'ammoniaca, il ferro ed il manganese. Secondi gli autori ⁽¹⁴⁾ il ferro ed il manganese tendono ad essere presenti nelle medesime condizioni naturali dell'ammoniaca, ovvero in acque povere di ossigeno e con ridotto ricambio. La causa è l'accentuata presenza di depositi fini ricchi di sostanza organica e di livelli torbosi, presenti in forma di lenti o sparsi all'interno dei sedimenti stessi, che provocano il rilascio di ammoniaca.

La presenza di queste sostanze è diffusa in tutte le porzioni meridionali delle province di Lodi, Cremona e Mantova e comporta un generale e talora rilevante degrado qualitativo delle acque sotterranee.

Questi fenomeni si riscontrano in modo particolare in corrispondenza delle dorsali, come nel campo pozzi di Codogno, posto 5,3 Km a sud del pozzo Castiglione 003, ma non interessano in modo consistente l'acquifero di Castiglione d'Adda.

Si sottolinea infine che in contesti strutturali e geochimici analoghi a questo, gli autori segnalano la presenza nella pianura emiliana di arsenico in quantità superiori alla CMA. Le risultanze analitiche sulle acque di Castiglione d'Adda e di Codogno (dati di circa un decennio) consentono però di escludere la presenza significativa di tale tipo di contaminante.

Data	Pozzo	O2	Res.fis.	°C	pH	Cond.	Torbidità	Ossidab.	Durezza	Ca	Cl	NH4	NO2	NO3	SO4	P2O5	Cd	Cr	Pb	Ni	Cu	As	B	Materie	Fe	Mn
prelievo	mg/lt	mg/l	°C		mS/cm	mg/l SiO2	mg/l O2	tot. °F	mg/l	mg/lt	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	sosp.	mg/l	mg/l	
valori limite DL 31/01	1.500	12-25	6,5-8,5	<2,5	1-10	0,5-50	15-50	100	25-200	0,05-0,5	<0,1	<0,03	<1	13,0	<0,5	<1,0	<5	<20	<20	<5	7	<0,1	-	<0,2	0,02-0,05	
12.03.08	003	-	307	-	7,9	0,43	-	-	28,0	76,0	1,0	<0,1	<0,03	<1	13,0	<0,5	<1,0	<5	<20	<20	<5	7	<0,1	-	<0,2	0,063

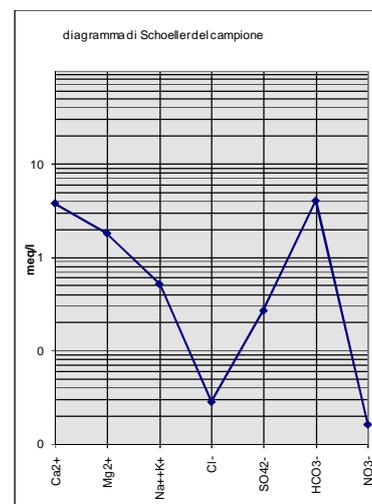
Tabella 3 valori analitici principali del campione prelevato il 12.03.2008

I dati della Tabella 3 consentono di classificare le acque in base alla conducibilità ed al residuo fisso come medio minerali (valori tra 260 e 1320 mS/cm e tra 200 e 1000 mg/l), e di media durezza (valori tra 22 e 33 °f).

Per stabilire la facies geochimica si è ricorsi al diagramma di Schoeller che consente di definire l'acqua a lieve dominanza bicarbonato calcica o priva di dominanza poiché tutte le coppie catione – anione sono presenti all'interno del medesimo ordine di grandezza.

Per trasformare i dati analitici espressi come mg/l in meq/l si sono divisi i valori analitici per il peso equivalente degli ioni come sotto indicato:

Grafico 1: diagramma di Schoeller



¹⁴ Amm. Prov. di Cremona (1994) "Aspetti idrogeologici del problema della presenza di azoto ammoniacale nelle acque sotterranee della provincia di Cremona" Pitagora ed. Bologna

ione	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
Peso equiv.	20,04	12,15	22,99	39,10	61,02	48,03	35,46	62,00

Il D.Lgs. 152/06 presenta una classificazione dell'acquifero distinguendo uno stato quantitativo, che riguarda la natura litologica, le caratteristiche di permeabilità e di immagazzinamento ed il regime di sfruttamento, ed uno stato chimico definito in base a sette parametri:

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 0
Cond. El a 20°C (mS/cm)	≤ 400	≤ 2500	≤ 2500	≥ 2500	≥ 2500
Cloruri (mg/l)	≤ 25	≤ 250	≤ 250	≥ 250	≥ 250
Nitrati (mg/l)	≤ 5	≤ 25	≤ 50	≥ 50	
Solfati (mg/l)	≤ 25	≤ 250	≤ 250	> 250	> 250
Ione ammonio (mg/l)	≤ 0,05	≤ 0,5	≤ 0,5	> 0,5	> 0,5
Ferro (mg/l)	≤ 200	≤ 200	> 200	> 200	> 200
Manganese (mg/l)	≤ 20	≤ 50	≤ 50	> 50	> 50

* se la presenza di tali sostanze è di origine naturale, così come appurato dalle Regioni o dalle Province autonome, verrà automaticamente attribuita la classe 0

Le acque di Castiglione d'Adda, per l'elevata presenza di manganese, sono collocabili nella classe 4, ovvero ritenuta naturale l'origine delle sostanze, nella classe 0.

La normativa individua inoltre una serie di parametri addizionali distinti in inquinanti inorganici (alluminio, antimonio, argento, arsenico, bario, berillio boro, cadmio, cianuri, cromo tot., cromo VI, fluoruri, Hg, Ni, NO₂, Pb, Cu, Se, Zn) che nelle analisi (qui non riferite) presentano concentrazioni inferiori di almeno un ordine di grandezza rispetto ai valori limite, ed organici che contemplano composti alifatici alogenati, pesticidi, Acrilamide, Benzene, Cloruro di vinile, Idrocarburi Policiclici aromatici, Benzo(a)pirene, che non sono completamente considerati nelle analisi e che quindi consentono l'espressione di un giudizio secondo le modalità indicate dalla normativa.

Una valutazione delle caratteristiche qualitative delle acque destinate al consumo potabile è stata proposta da Civita¹⁵, sulla base di dati di analisi più comunemente disponibili. I parametri considerati sono 8, suddivisi in due gruppi: parametri chimico fisici (5 parametri) e sostanze indesiderabili (3 parametri).

Per ogni parametro sono stabiliti degli intervalli di valori che individuano le classi di qualità per le acque: ottima (classe A), media (classe B) e scadente (classe C).

Gli autori suggeriscono l'uso di un grafico che consente una rapida visualizzazione e confronto della qualità delle acque. Utilizzando i seguenti valori del campione di acqua grezza del 12.03.08 del pozzo 003 si ottiene una qualità di base definita con il codice A1C2:

			valori
Gruppo 1	TH (durezza)	(°f)	28
	Conduc. Ele.	mS/cm	426
	Cl ⁻	mg/l	1,0
	SO ₄ ²⁻	mg/l	13

¹⁵ Civi et al (1993). Proposta di classificazione e mappatura della qualità delle acque sotterranee. In Inquinamento n°12

Gruppo 2	NO ³⁻	mg/l	<1,0
	NH ₄ ⁺	mg/l	<0,1
	Fe ²⁺	mg/l	<0,02
	Mn ²⁺	mg/l	0,063

In sostanza l'acqua di Castiglione d'Adda è da ritenersi ottima per i parametri del gruppo 1 e scadente per quelli del gruppo 2.

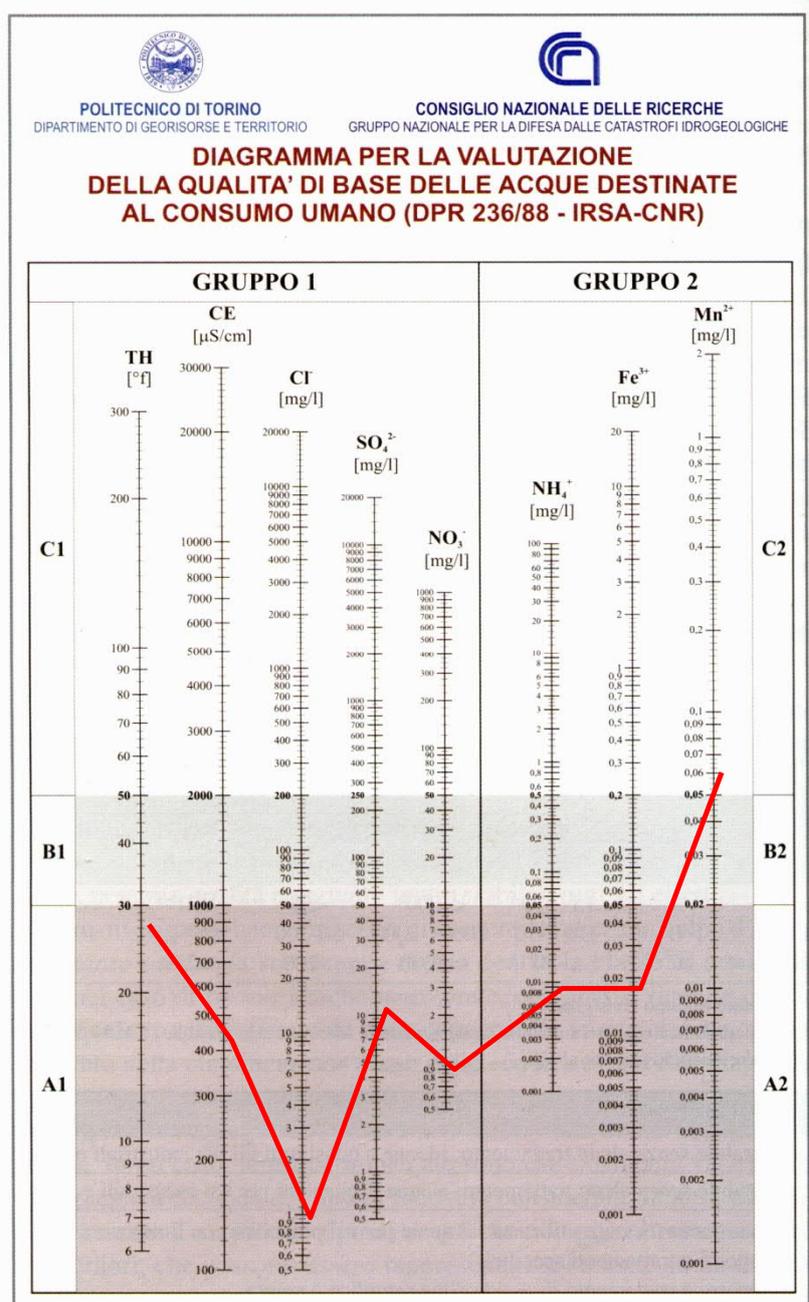


Grafico 2: classificazione secondo Civita et al. (1993) della qualità di base delle acque grezze del pozzo 003.

7.4 CARATTERISTICHE DELL'ACQUIFERO RIFERITO NEL PTUA 2006

Il piano di Tutela e Uso delle acque della Regione Lombardia (PTUA, marzo 2006), delinea alcuni aspetti tecnici generali, quantitativi e qualitativi, sulle caratteristiche dei bacini idrografici di superficie e sulle acque sotterranee, e definisce numerose prescrizioni immediatamente vincolanti (art. 51 NTA) che in parte riguardano il territorio di Castiglione d'Adda.

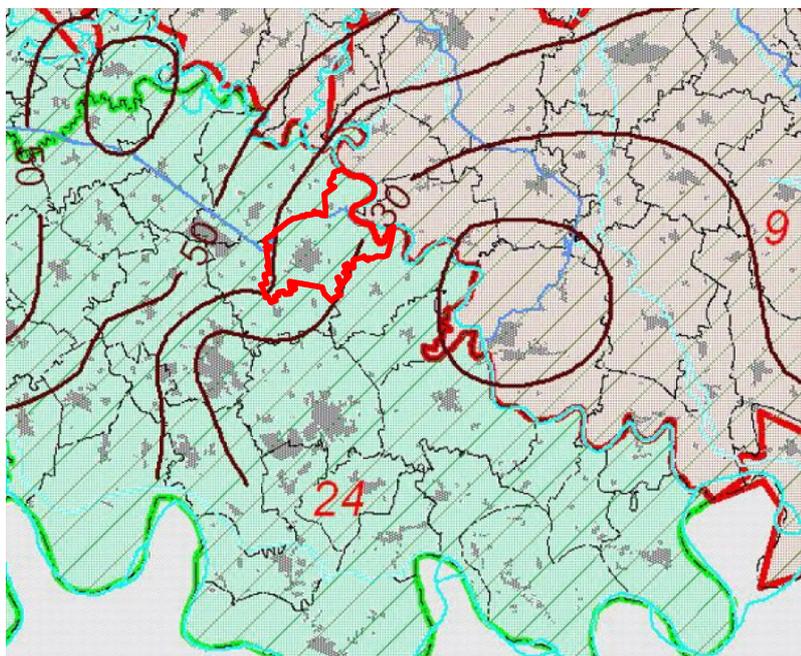
L'analisi riferita nello studio interpreta gli acquiferi della pianura lombarda come un monostrato compartimentato, comprendente una falda freatica chiamata "*Superficiale*" (primo acquifero) ed un acquifero semiconfinato sottostante (secondo acquifero). L'insieme di questi due acquiferi forma l'acquifero detto "*Tradizionale*" così definito in quanto storicamente sfruttato dalla maggior parte dei pozzi presenti nella pianura.

La suddivisione tra i due acquiferi non è continua: nella parte settentrionale della pianura la superficie di contatto fra i due acquiferi è molto ampia, in quanto i livelli argilloso-limosi che separano gli stessi non hanno grande continuità areale, tanto da poter considerare il sistema come un unico complesso acquifero.

A sud di Milano i livelli argillosi impermeabili s'ispessiscono ed estendono tanto che nella media e bassa pianura è possibile individuare con continuità falde in pressione (oltre i 70 m di profondità) sottostanti la falda freatica. Localmente e soprattutto in coincidenza dei maggiori corsi d'acqua, la separazione diviene meno netta o scompare dando luogo al mescolamento delle acque dei due acquiferi.

Nella parte dove compaiono i due acquiferi, come nel caso di Castiglione d'Adda evidenziato dalle letture dei livelli piezometrici del pozzo 003, si ha mediamente la seguente suddivisione:

- acquifero superficiale (freatico) = presente fino ad una profondità di 40-45 metri dal piano campagna;
- setto di separazione (aquitard) = con uno spessore di circa 5-20 metri;
- acquifero semiconfinato = con una profondità variabile tra 80 e 120 metri dal piano campagna.



L'andamento della base del primo acquifero consente di identificare le aree di massima trasmissività, corrispondenti con le aree prossime agli attuali corsi d'acqua.

Figura 29: isobate della base dell'acquifero superficiale in m. s.l.m.

Si nota infatti che le quote più elevate della base dell'acquifero

coincidono con la zona di spartiacque fra due bacini idrografici, e quelle inferiori all'alveo degli attuali fiumi.

L'andamento del substrato delineato in Figura 29 individua una profondità dalla superficie topografica variabile da 11 m a 33 m, con valori inferiori nella piana olocenica dell'Adda, e valori superiori a 20 metri nell'area tardo pleistocenica. Tale superficie indica ai sensi dell'articolo 12 e dell'articolo 18 delle NTA la profondità oltre la quale il prelievo di acqua mediante pozzi deve essere effettuato esclusivamente dietro verifica della indisponibilità delle fonti alternative, e che ai sensi dell'art. 96 del D. l.g.s 152/2006 e dell'art. 14 del Regolamento regionale n. 2 del 24 marzo 2006 comporta un onere di concessione triplicato.

Per quanto concerne lo spessore del secondo acquifero, gli autori segnalano un'area di visibile approfondimento della base del substrato nella pianura fra Adda e Oglio, fino a raggiungere la confluenza di Serio e Adda (2 – 4 Km a nord di Castiglione d'Adda) dello spessore di circa 120 m.

In riferimento a quanto indicato in Figura 15 non si può tacere che le profondità dell'acquifero tradizionale rappresentate nel modello del PTUA sono circa la metà di quelle della somma dei gruppi A e B, il cui insieme, nella figura citata, è correlato all'acquifero tradizionale stesso.

Gli autori per valutare le condizioni di bilancio idrogeologico degli acquiferi del bacino Ticino – Adda hanno suddiviso la superficie in numerosi settori, tra i quali il n. 24 "Casalpusterlengo" comprendente il territorio di Castiglione d'Adda.

Le classi definite dal D.Lgs. 152/1999 implicano la determinazione dell'equilibrio idrogeologico, inteso come sfruttamento della risorsa non solo in termini di prelievi/ricariche, ma anche di tendenza piezometrica. Secondo tale classificazione, la sostenibilità idrica è strettamente correlata all'impatto antropico: a un impatto antropico nullo corrisponde sostenibilità su lungo periodo così come un impatto antropico significativo ha una notevole incidenza sulla disponibilità della risorsa idrica. Tale corrispondenza non è sempre verificata: non è detto che a situazioni di squilibrio tra prelievi e ricariche (per esempio per eccesso di prelievi rispetto alle ricariche) corrisponda la non sostenibilità della risorsa idrica (diminuzione del livello di falda rispetto a quello di riferimento).

Allo scopo di verificare la sostenibilità della risorsa idrica e di pianificare gli interventi, sono stati considerati i risultati ottenuti dalla classificazione del livello piezometrico attuale rispetto a quello di riferimento e i parametri indicativi della tendenza piezometrica.

Come riferimento è stato considerato il livello del 1982, anno per il quale si dispone di una carta piezometrica a scala regionale, con isolinee ogni 10 metri.

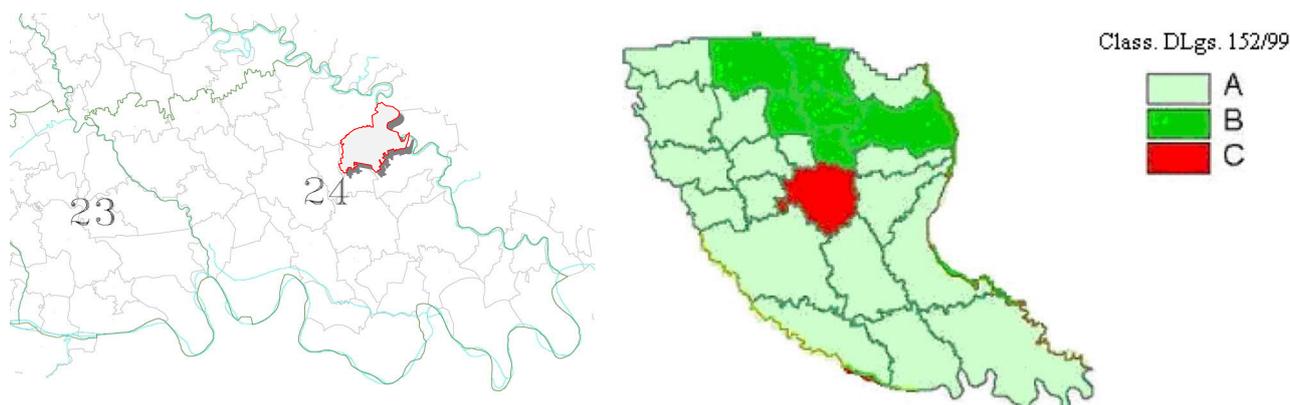


Tabella 2.5 - Classificazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei ai sensi del D.Lgs. 152/1999: definizione e colori corrispondenti.

Classificazione ai sensi del D.Lgs. 152/1999	Definizione
Classe A ₁₅₂	L'impatto antropico è nullo o trascurabile con condizioni di equilibrio idrogeologico. Le estrazioni di acqua o Alterazioni della velocità naturale di ravvenamento sono sostenibili sul lungo periodo.
Classe B ₁₅₂	L'impatto antropico è ridotto, vi sono moderate condizioni di disequilibrio del bilancio idrico, senza che tuttavia ciò produca una condizione di sovrasfruttamento, consentendo un uso della risorsa sostenibile sul lungo periodo.
Classe C ₁₅₂	Impatto antropico significativo con notevole incidenza dell'uso sulla disponibilità della risorsa evidenziata da rilevanti modificazioni agli indicatori generali sopraesposti. (1)
Classe D ₁₅₂	Impatto antropico nullo o trascurabile, ma con presenza di complessi idrogeologici con intrinseche caratteristiche di scarsa potenzialità idrica.

(1) Nella valutazione quantitativa bisogna tener conto anche degli eventuali surplus incompatibili con la presenza di importanti strutture sotterranee preesistenti

Figura 30: Ubicazione e classe del settore 24

La descrizione e i principali risultati della modellazione matematica del flusso idrico sotterraneo e del bilancio sono commentati dagli autori come segue:

Il settore n. 24 presenta una struttura idrogeologica caratterizzata da due acquiferi, l'acquifero tradizionale e quello superficiale, separati da un acquitardo compreso tra le quote di 50 e 20 m s.l.m. La trasmissività media oscilla tra $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ e $8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (quest'ultima nella zona dei Fiumi Adda e Po). Si osserva che tale stima è 4,5 volte superiore a quella individuata dal valore medio di Tabella 1.

L'area è caratterizzata dal forte drenaggio esercitato dal Fiume Po, compensato elevati apporti irrigui, in particolare del Canale Muzza, e dall'infiltrazione efficace. La ricarica ha in questo settore un'entità superiore a quella dei settori circostanti (13 l/s per km^2).¹⁶

Il settore si colloca nella classe quantitativa A con un rapporto prelievi/ricarica inferiore rispetto a quello calcolato nel 1996 (rapporto prelievi/ricarica circa pari a 0,1).

La carta delle differenze piezometriche (rispetto al 1996) mostra delle zone in cui si è verificato un sostanziale abbassamento della falda, causato dall'effetto drenante che il Po ha sulla fascia meridionale di quest'area. L'effetto drenante dei Fiumi Adda, Po e Lambro è

¹⁶ La stima precedentemente esposta nel § 6, corrispondente a circa 90 l/s per km^2 , è relativa al periodo di massima irrigazione, mentre quelle qui riferita deve intendersi come valore medio annuo.

l'elemento fondamentale delle uscite del bilancio di massa, rappresentando da solo il 90% delle uscite totali.

Si denota che le informazioni impiegate per valutare l'evoluzione piezometrica derivano in gran parte dai dati del pozzo pubblico 98010003 di Casalpusterlengo, posto in prossimità di numerosi altri pozzi attivi ed in area di limitato spessore degli acquiferi. Per quanto più volte osservato dallo scrivente, il pozzo ha un comportamento fortemente anomalo rispetto ai pozzi e piezometri presenti nel medesimo settore 24, che non hanno manifestato nell'ultimo decennio alcuna tendenza all'abbassamento.

Elementi del bilancio idrico:

Prelievo medio areale	1,01	l/s·km ²
Entrate:		
Afflusso della falda da monte Settore n. 21	0,30	(m ³ /s)
Infiltrazione (piogge efficaci + irrigazioni)	5,17	(m ³ /s)
TOTALE	5,47	(m³/s)
Uscite:		
Drenaggio del fiume Lambro	0,70	(m ³ /s)
Drenaggio fiumi Adda e Po	4,30	(m ³ /s)
Prelievi da pozzo	0,47	(m ³ /s)
Fontanili	0,00	(m ³ /s)
TOTALE	5,47	(m³/s)

Classe Quantitativa:

(Prelievi/Ricarica = 0,1)

Situazione attuale di compatibilità tra disponibilità ed uso della risorsa. Uso sostenibile delle acque sotterranee senza prevedibili e sostanziali conseguenze negative nel breve-medio periodo.

Classificazione livello di falda

3

Classificazione stato quantitativo secondo D.Lgs. 152

A

Lo stato qualitativo delle acque sotterranee è riferito in estrema sintesi da quanto indicato nella Figura 31, dove l'area comprendente Castiglione d'Adda appare collocata nella classe 0 a causa, come detto in precedenza, della presenza di sostanze indesiderate di origine naturale presenti nell'acquifero, e in specie per un lieve eccesso di manganese.

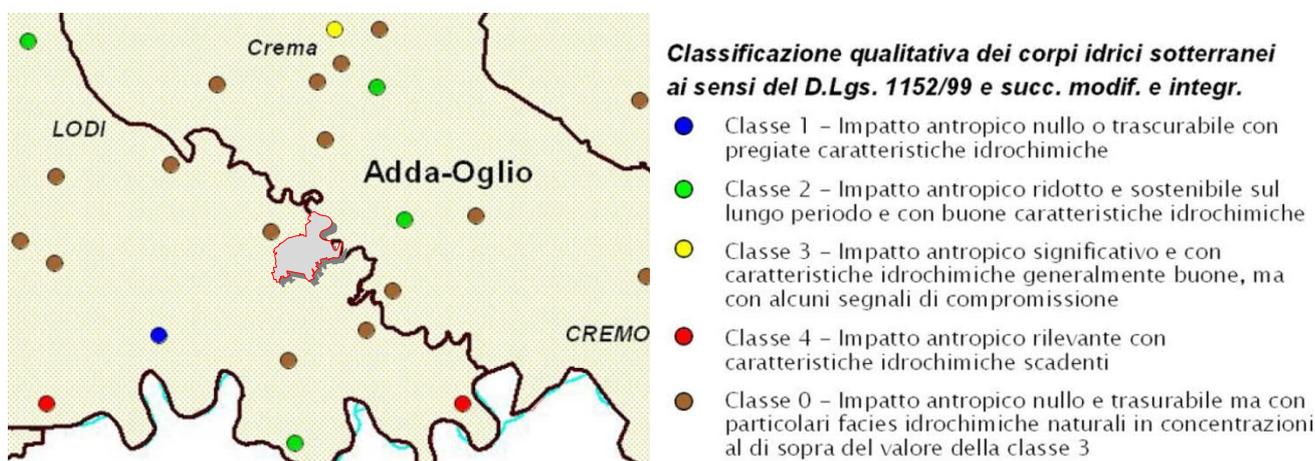


Figura 31: valutazione qualitativa ai sensi della normativa della qualità delle acque sotterranee.

Si precisa infine che il territorio di Castiglione d'Adda ai sensi della d.g.r. 11 ottobre 2006 n. 8/3297, che ha parzialmente modificato le prescrizioni dello stesso PTUA, rientra tra quelli interamente compresi nelle aree vulnerabili da nitrati di origine agricola ai sensi del D.lgs 152/2006.

Su tutta la superficie comunale vi è quindi l'obbligo da parte delle aziende agricole operanti di adeguarsi alle prescrizioni, ai criteri ed alle procedure indicate nella d.g.r. 21 novembre 2007 n. 8/5868 (Il supplemento straordinario al BURL n. 49 del 06 dicembre 2007) per quanto concerne l'utilizzo agronomico degli affluenti di allevamento e di altri composti azotati.

7.5 ELABORATI PRODOTTI PER IL PTUA 2016

La Direttiva 2000/60/CE *"Quadro per l'azione comunitaria in materia di acque"* (direttiva quadro acque – DQA) stabilisce che la tutela delle acque sia affrontata a livello di "bacino idrografico" e individua nel Piano di Gestione di distretto lo strumento attraverso cui gli Stati devono applicarne i contenuti. Seguendo tali indirizzi, nel dicembre 2015 è stato pubblicato l'aggiornamento del Piano di Gestione del distretto idrografico del Po (PdGPo 2015), che recepisce anche i criteri della Direttiva 2006/118/CE *"sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento"*.

La pubblicazione con delibera regionale n. 6990 del 31 luglio 2017 (BURL Serie Ordinaria n. 36 - Lunedì 04 settembre 2017) della prima revisione del PTUA (Programma di Tutela e Uso delle Acque, 2016) della Regione Lombardia si configura come una specificazione a scala regionale di quanto previsto dal PdGPo.

Il documento ha modificato molti aspetti del precedente piano del 2006, mediante un *"approfondimento conoscitivo effettuato durante il 2014 e che ha portato a rivedere l'identificazione dei corpi idrici rispetto alle precedenti pianificazioni"*. ...*"La procedura di identificazione dei corpi idrici sotterranei prevede un approccio "gerarchico" che parte dall'identificazione dei Complessi Idrogeologici e attraverso ulteriori suddivisioni porta ad identificare i sub-complessi idrogeologici (Figura 32) e le tipologie di acquiferi, per poi individuare gli acquiferi sulla base di considerazioni di natura idrogeologica ed in particolare sulla base dei flussi significativi e dei quantitativi significativi"*.

L'elaborazione è stata attuata attraverso la predisposizione di sezioni idrogeologiche longitudinali e trasversali, che hanno consentito l'identificazione delle basi degli acquiferi freatici e delle idrostrutture profonde. L'analisi delle piezometrie storiche e di nuova elaborazione ha permesso l'identificazione dei principali spartiacque sotterranei e delle principali direzioni di flusso. Lo scopo è stato quello di giungere alla definizione di un modello concettuale, che rappresenta la *"una schematizzazione idrogeologica semplificata del sottosuolo e una prima parametrizzazione degli acquiferi"*. Gli studi che riguardano la pianura commissionati da regione Lombardia sono:

1. *Approfondimento specialistico relativo ai corpi idrici sotterranei (cod. TER13016/001)*, realizzato da Éupolis Lombardia nel febbraio 2015 in collaborazione con Studio Idrogeotecnico Applicato Sas e Idrogea Servizi Srl;
2. *Nuova regolamentazione punti di captazione di acqua destinata al consumo umano (cod. TER15011/003)*, realizzato da Éupolis Lombardia nel 2016 in collaborazione con Università degli Studi di Milano - Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio".

Figura 4 - Corpi idrici sotterranei: individuazione dei subcomplessi idrogeologici

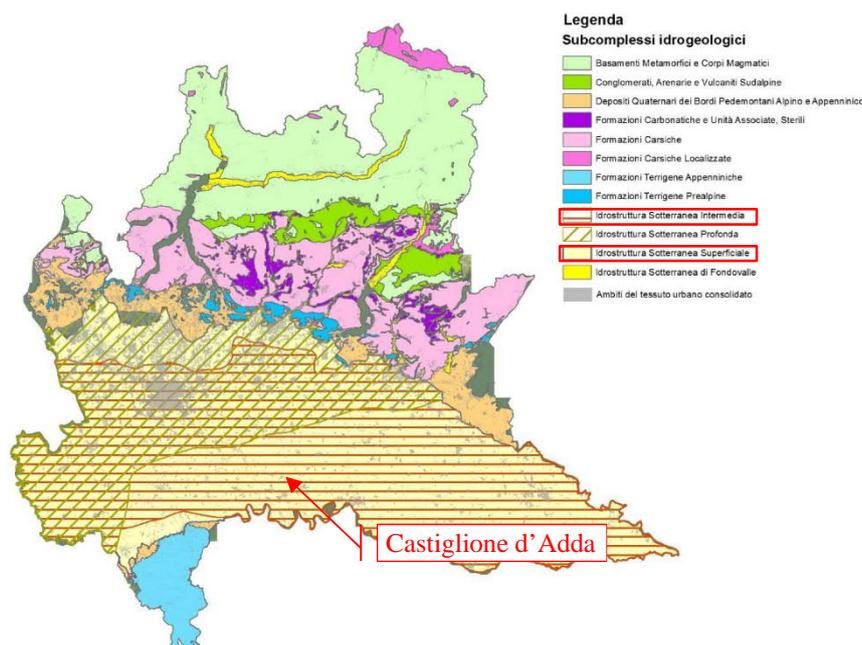


Figura 32: individuazione dei subcomplessi idrogeologici nella Relazione generale del PTUA 2016

Il primo degli studi citati è disponibile solo come informazione di SINTESI presso il sito

<http://www.polis.lombardia.it/wps/portal/site/polis/pubblicazioni/studi-e-Documenti>, il secondo non è apparso consultabile né nel sito della regione né in quello di Polis Lombardia e quindi le sezioni e le valutazioni di dettaglio operate non sono utilizzabili. Le ragioni di tale scelta allo scrivente non paiono comprensibili, perché rendono più incerto e privo di argomenti l'adeguamento dei progetti alle disposizioni regionali. L'esito degli studi sopra citati, riassunti nella *Relazione Generale* e nell'elaborato 2 "*caratterizzazione, monitoraggio e classificazione dei corpi idrici sotterranei*", individuano nell'ambito dei complessi idrogeologici dei depositi quaternari, tre idrostrutture principali di seguito elencate:

- ISS (Idrostruttura Sotterranea Superficiale), sede dell'acquifero libero, comprendente i Gruppi Acquiferi A e B¹⁷ nei settori di alta pianura Lombarda, e la porzione superiore del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A1) nella media e bassa pianura.

- ISI (idrostruttura Sotterranea Intermedia), sede di acquiferi da semiconfinati a confinati, comprende la porzione profonda del Gruppo Acquifero A (denominata Unità A2) e il Gruppo Acquifero B presente nella media e bassa pianura.

¹⁷ I Gruppi acquiferi sono una suddivisione operata nel documento di Regione Lombardia, ENI Divisione AGIP (2002) *Geologia degli acquiferi padani ...cit.*

• I SP (idrostruttura sotterranea profonda), sede di acquiferi confinati, comprende il Gruppo Acquifero C nei settori di alta e media pianura in cui esso è conosciuto tramite indagini dirette e captato.

Nella Figura 32 si evidenzia che nell'area comunale, così come in tutto il lodigiano centrale e meridionale, sono riconosciute presenti solo le idrostrutture ISS e ISI, ovvero i dati disponibili non hanno consentito di riconoscere la presenza dell'idrostruttura profonda.

L'ISS è l'idrostruttura che interessa le prime decine di metri dalla superficie è costituita da uno o più corpi acquiferi caratterizzati da permeabilità da alta a media, sede dell'acquifero libero, localmente semiconfinato, i cui limiti coincidono con:

- la superficie topografica (top);
- la superficie di separazione dal sottostante ISI alla base;
- i confini delle idrostrutture di pianura.

L'ISS è il subcomplesso maggiormente vulnerabile da un punto di vista sia quantitativo sia qualitativo, essendo posto in diretta comunicazione con la superficie topografica e con i corsi d'acqua superficiali che localmente ne riducono lo spessore complessivo.

L'idrostruttura costituisce un corpo idrico serbatoio attraverso cui i sottostanti subcomplessi (ISI e ISP) sono ricaricati e scaricati e l'andamento della superficie di base si trova a quote tra +300 nell'alta pianura e -50 m s.l.m. in corrispondenza della bassa pianura mantovana. A Castiglione d'Adda la profondità della base è compresa tra pochi metri nella parte meridionale a circa +20 s.l.m. all'estremità nord e quindi lo spessore del corpo idrico considerato è di 55 metri a sud e circa 30 m a nord, come mostrato in dettaglio nella cartografia a destra di Figura 37.

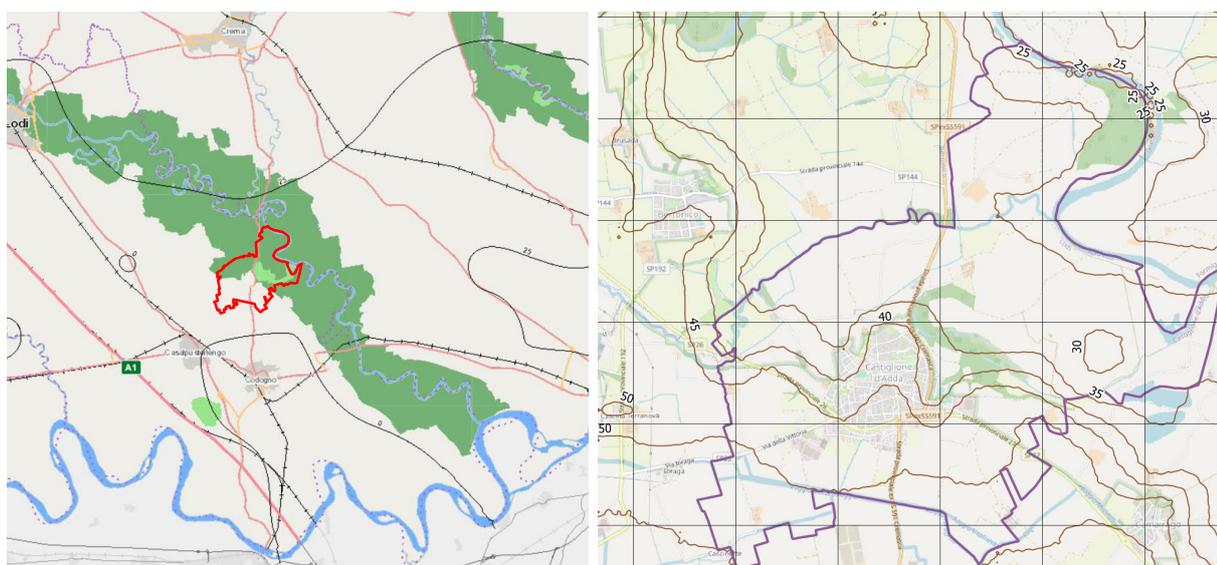


Figura 33: quota s.l.m. della base dell'ISS, da Geoportale Regione Lombardia e a destra dal file in formato raster presente nella sezione del portale di Regione Lombardia dedicato al PTUA.

L'idrostruttura Sotterranea Superficiale è suddivisa nel territorio regionale in 13 singoli Corpi Idrici e il lodigiano tra i fiumi Lambro Settentrionale e Adda appare collocato in quella

denominata GWBISSMPLAS (*Ground Water Body Idrostruttura Sotterranea Superficiale Media Pianura Lambro-Adda Sud*).



Il corpo idrico appare esteso dalla porzione meridionale della Provincia di Milano e comprende la quasi totalità dei comuni della Provincia di Lodi.

“L'idrostruttura si approfondisce gradualmente verso S da quote comprese tra 65 m s.l.m. a nord a circa 10 m s.l.m. a sud, ad eccezione dell'area di San Colombano al Lambro-Borghetto Lodigiano in cui si assiste alla risalita dell'idrostruttura profonda e alla conseguente riduzione del corpo idrico in questione. I massimi spessori dell'unità raggiungono i 70

m (Codogno), mentre i minimi si attestano a 35 m nei dintorni della zona dell'alto di San Colombano.”.

Nella proposizione sopra riportata si riconosce quindi la presenza della struttura di elevazione del substrato solo nell'area prossima a San Colombano, mentre non è fatta alcuna menzione della sua continuità verso est, in particolare in corrispondenza della parte settentrionale dell'abitato di Codogno dove sorge il campo pozzi dell'acquedotto e dove i dati delle perforazioni consentono di connotare che la base dell'acquifero freatico giace su sedimenti argillosi continui presenti a partire da profondità comprese tra 33 e 43 metri, accompagnati da fossili e acque salmastre.

La descrizione riportata nel PTUA del corpo idrico GWBISSMPLAS, specifica che l'acquifero contenuto nei depositi formati da sabbie e sabbie ghiaiose è localmente compartimentato da livelli limoso-argillosi di spessore fino a 20 m e discreta continuità areale, che ne conferiscono un carattere da libero a semiconfinato.

L'Idrostruttura Sotterranea Superficiale è stata suddivisa in due ulteriori corpi idrici sulla base dei dati di monitoraggio idrochimico e quello che interessa il territorio di Codogno è denominato *“Corpo idrico sotterraneo superficiale di Media pianura Bacino Lambro – Adda Sud”*.

I documenti del PTUA non forniscono dettagli sulle caratteristiche idrogeologiche dell'unità ma riportano le isopiezometriche della prima falda con la cartografia riprodotta in stralcio nella Figura 34, che mostra il rilevante ruolo drenante dei fiumi Lambro e Adda per i bordi dell'unità e del Po per le aree centrali.

In corrispondenza del territorio di Castiglione d'Adda le isopiezometriche indicano una quota di 55-56 m s.l.m., inferiore di circa 3,0 metri rispetto al valore riferito nella Figura 27 di circa 50 m s.l.m. al centro dell'area urbana in buon accordo con il valore riferito in Figura 27 e di 45 – 43 m s.l.m. in prossimità dell'Adda, dove la quota appare inferiore di 2 -3 metri rispetto ai valori considerati in Figura 27.

Un ultimo aspetto da considerare riguarda le escursioni del livello freatico, che nel caso in esame sono descritte dai dati raccolti da ARPA nell'ambito degli studi di

aggiornamento e monitoraggio previsti dal PTUA, messi a disposizione dalla Provincia di Lodi sul proprio sito istituzionale.

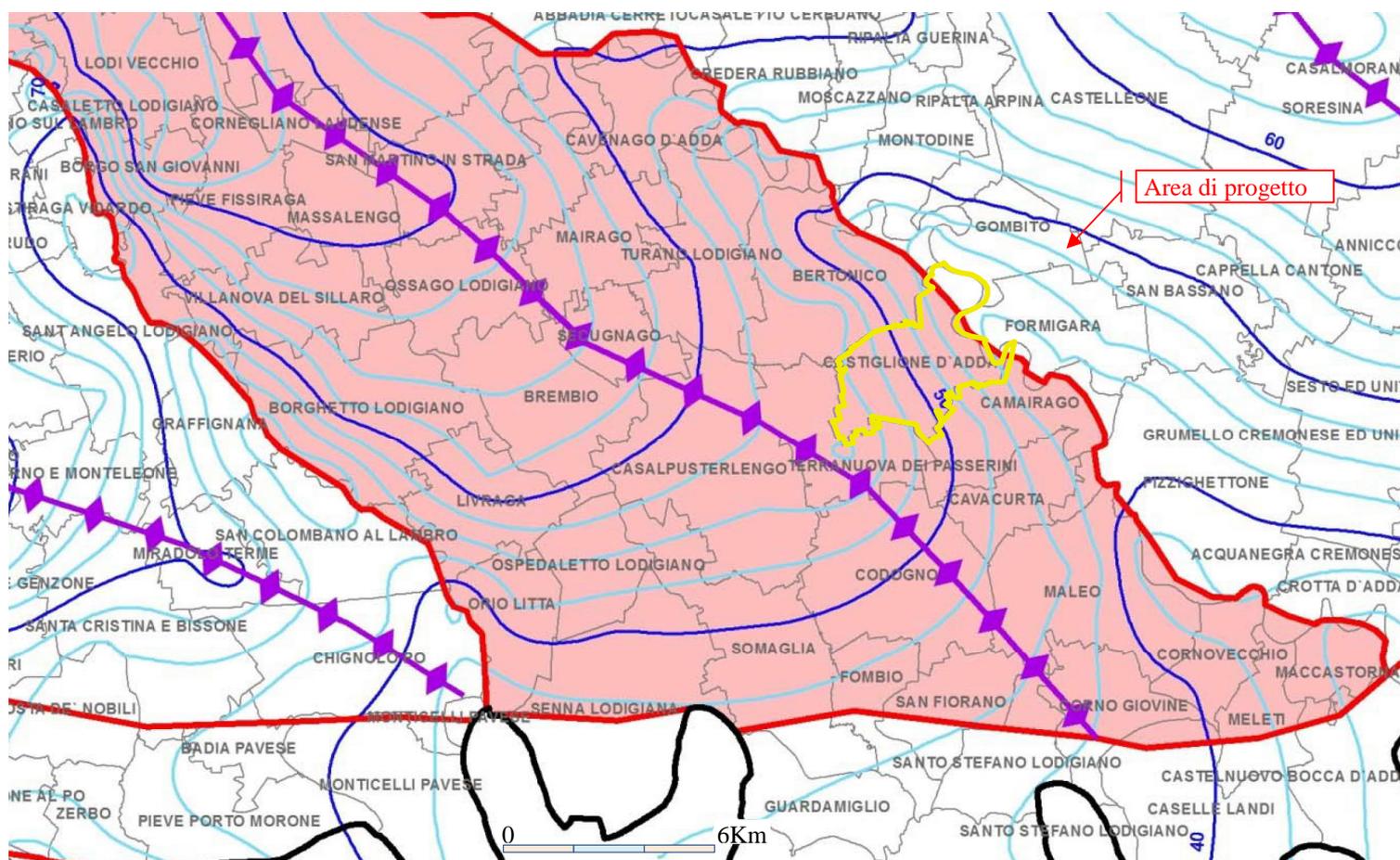


Figura 34: Corpo idrico superficiale della media pianura Lambro - Adda Sud. Le isopiezometriche (linee azzurre a blue) sono state rilevate a maggio 2014. La linea viola con rombi indica la posizione dello spartiacque. Da figura 28 dell'elaborato 2 PTUA. Riproduzione in scala 1:200.000.

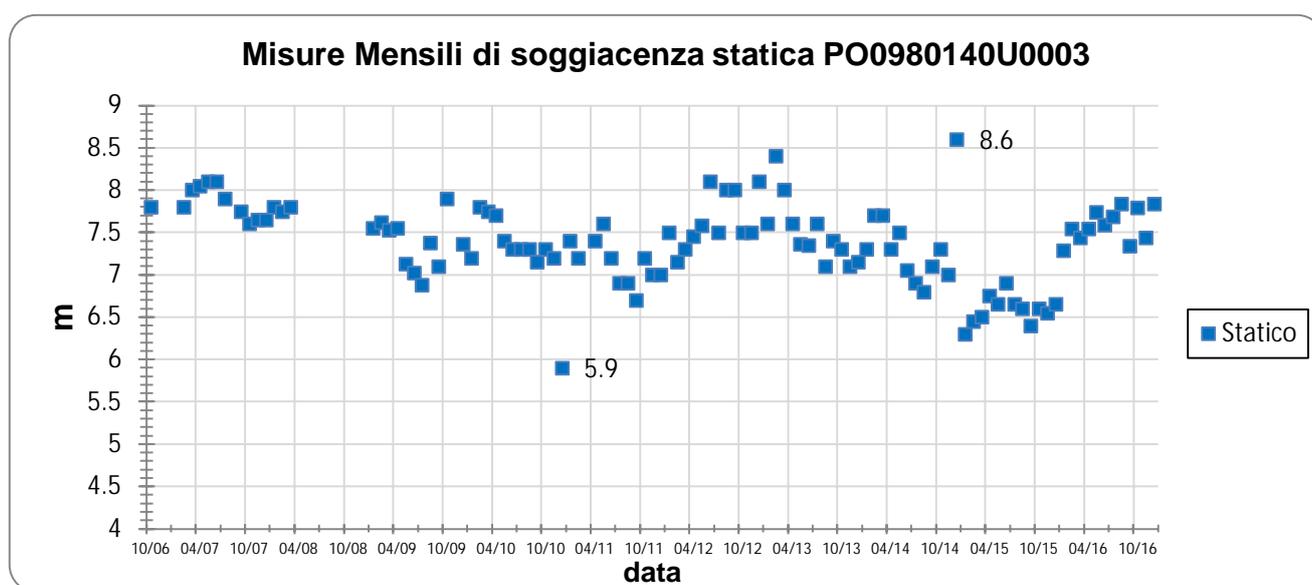


Figura 35: livelli freatici misurati nel pozzo PO0980140U0003 in via Apollo a Castiglione d'Adda. Quota riferimento 63,135m s.l.m.

I rilievi riportati in Figura 35 mostrano valori oscillanti tra -5,6 e -8,6 metri con media di 7,4 metri, corrispondente a una quota di 55,7 m s.l.m. Questo valore è superiore di circa 3,5 metri rispetto a quello indicato dai dati riferiti nella Figura 27, ma tale condizione è spiegabile considerando che il pozzo si trova a filtrare l'acquifero intermedio, che presenta una quota piezometrica in genere superiore di qualche metro, e non quello superficiale rappresentato dai dati della planimetria, come chiaramente indicato nelle sezioni e nei dati riportati nell'allegato 1 e nella Figura 36, dove si illustra, in una sezione W-E passante per il citato pozzo 3 di Castiglione d'Adda, che i filtri collocati oltre gli 88 metri dalla superficie sono posti nell'idrostruttura ISI e non nella ISS.

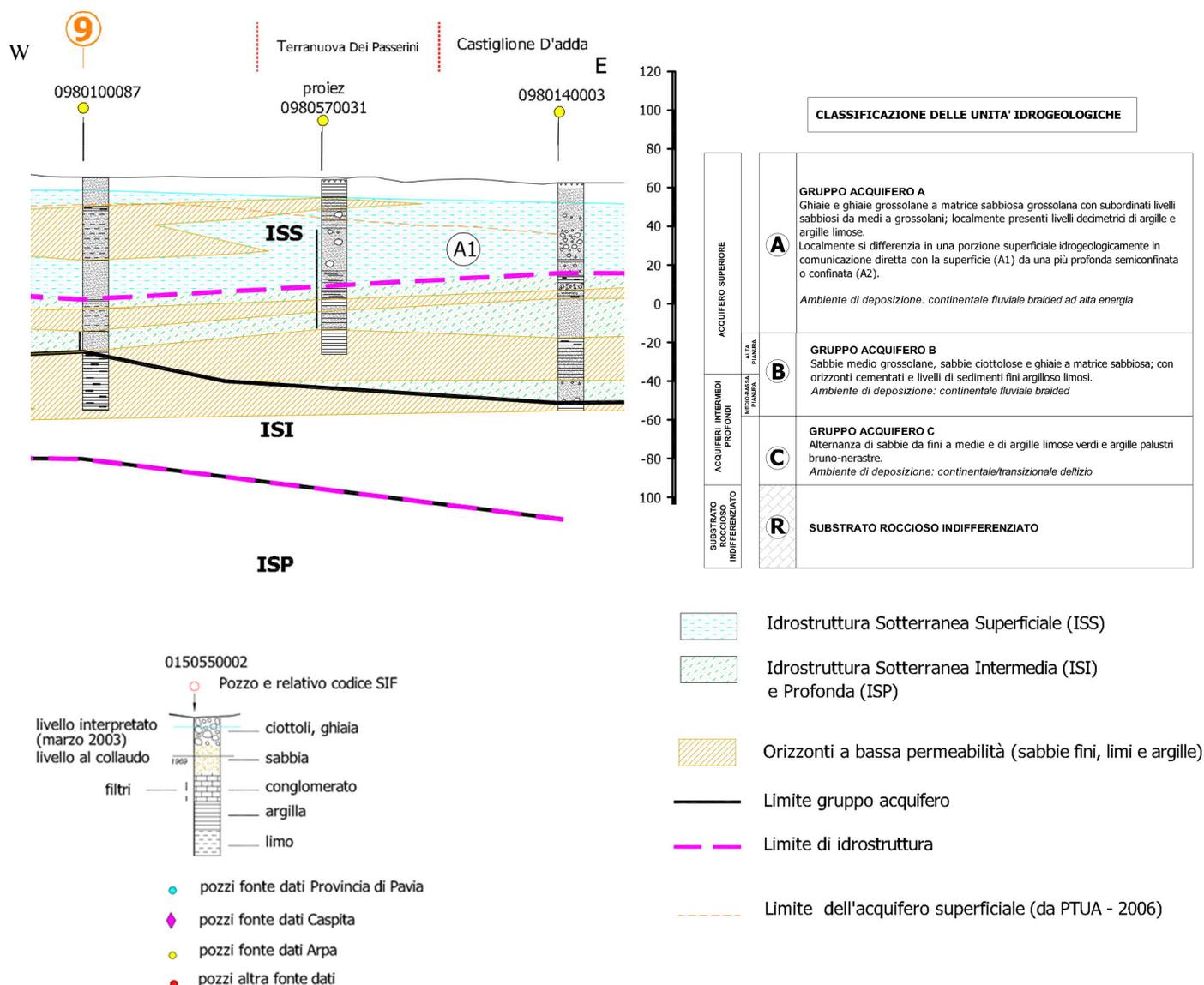


Figura 36: sezione 6 W-E passante per Castiglione d'Adda. Da Programma di Tutela e Uso delle Acque – Elaborato 2 – caratterizzazione, monitoraggio e classificazione dei corpi idrici sotterranei.

8 Vulnerabilità della falda freatica all'inquinamento

Capitolo omesso – si faccia riferimento al documento del 2009.

9 Aspetti geotecnici

9.1 DATI DISPONIBILI E DESCRIZIONE GENERALE

L'esame delle caratteristiche geotecniche è fondato sui dati di n. 27 (due aggiunte, eseguite nel 2001 e 2013) prove penetrometriche statiche standard CPT con punta meccanica Begemann e n. 3 prove penetrometriche dinamiche continue SCPT con punta non rivestita e maglio da 73 kg.

La denominazione, l'ubicazione e la profondità delle prove sono riassunte nella sottostante tabella:

N. prova	nome prova	ubicazione	longitudine WGS 84	latitudine WGS 84	quota p.c. m. s.l.m.	profondità dal p.c.
1	CPT 1/3-'08+Pz1	SS 591 - via Cavour	554632	5008005	50.3	5.2
2	CPT 2/3-'08	Loc. Garusa	554845	5006942	61.8	7.6
3	CPT 3/3-'08+Pz2	Via del Fossone	554173	5006707	61.9	9.6
4	CPT 1/2 - apr.'97	via Incoronata - tennis	555005	5007203	61	9.0
5	CPT 2/2 - apr.'97	via Incoronata - tennis	555009	5007232	61	9.0
6	CPT 1/3 - giu.'97	SS 591 - Fosso Gorgo	554806	5007809	50.8	8.0
7	CPT 2/3 - giu.'97	SS 591 - Fosso Gorgo	554737	5007908	50	7.8
8	CPT 3/3 - giu.'97	SS 591 - Fosso Gorgo	554721	5007990	48.3	5.0
9	CPT 1/8 - febb.'98	Loc. Garusa	554745	5006987	61.4	8.6
10	CPT 2/8 - marz.'98	via Incoronata - campo sport.	555100	5007227	62	8.0
11	CPT 3/8 - febb.'98	via Principe Amedeo - Gorgo	554721	5007783	58.4	7.2
12	CPT 4/8 - febb.'98	Chiesa San Bernardino	554003	5007410	55.9	8.0
13	CPT 5/8 - febb.'98	via Mattei	553695	5006847	62.2	7.2
14	CPT 6/8 - febb.'98	via XXII Marzo	554292	5006860	62.5	8.0
15	CPT 7/8 - febb.'98	Garusa (sud)	554685	5006782	61.5	8.2
16	CPT 8/8 - febb.'98	via Enrico Fermi	554013	5007671	51.9	6.6
17	CPT 1/2 - magg.'01	via Papa Giovanni	554852	5007268	61.7	5.4
18	CPT 2/2 - magg.'01	via Papa Giovanni	554868	5007274	61.7	7.8
19	CPT 1/2 - aprile'06	via Roma	554596	5007198	62	5.8
20	CPT 2/2 - aprile'06	via Roma	554631	5007208	62	7.8
21	CPT 1/3 - giugno'06	v. Princ. Amedeo - v. Cavour	554632	5007803	57.1	9.8
22	CPT 2/3 - giugno'06	v. Princ. Amedeo - v. Cavour	554679	5007778	57.1	9.2
23	CPT 3/3 - giugno'06	v. Princ. Amedeo - v. Cavour	554628	5007763	57	7.2
24	CPT 1/1 - marz '98	via Apollo	553976	5006965	60.9	6.4
25	CPT 1/1 - ago. '07	via Cascinette (Terranova P.)	553080	5005380	63.6	15.8
26	SCPT 1/2 -marz.'98	via Apollo	553951	5007009	63.6	10.2
27	SCPT 2/2 -marz.'98	via Apollo	553973	5006994	63.6	10.2
28	SCPT 1/1- ago. '07	via Mattei- v. Pertini	553862	5006813	61.5	9.9
29	CPT 1/1 - novemb '13	via la Valle Bassa	554602	5008015	51.6	7.6
30	CPT 2/2 - novemb '11	Cascina Vinzaschina	555317	5009203	49.2	14.2

Tabella 4 : denominazione, ubicazione e profondità delle prove penetrometriche disponibili.

N. 3 prove sono state eseguite espressamente per il PGT a giugno 2008, mentre altre 8 prove sono state eseguite nel 1998 per il PRG. Le rimanenti prove sono state eseguite in altri momenti per singoli interventi sia pubblici che privati.

Come evidenziato in Figura 37 le prove sono state eseguite principalmente alla periferia dell'area urbana o entro la stessa, mentre una prova piuttosto estesa verticalmente è stata eseguita 400 m a sud di località Cascinette in comune di Terranova dei Passerini.

Per supportare l'interpretazione litostratigrafica nei primi metri sono stati eseguiti alcuni sondaggi manuali o trincee con escavatore (S o T negli allegati) a 1,5 - 2,5 m in prossimità delle prove indicate con i numeri 1, 3, 17, 21, 23 ed a -4,5 m nella n. 5 eseguita sul territorio di Terranova dei Passerini.

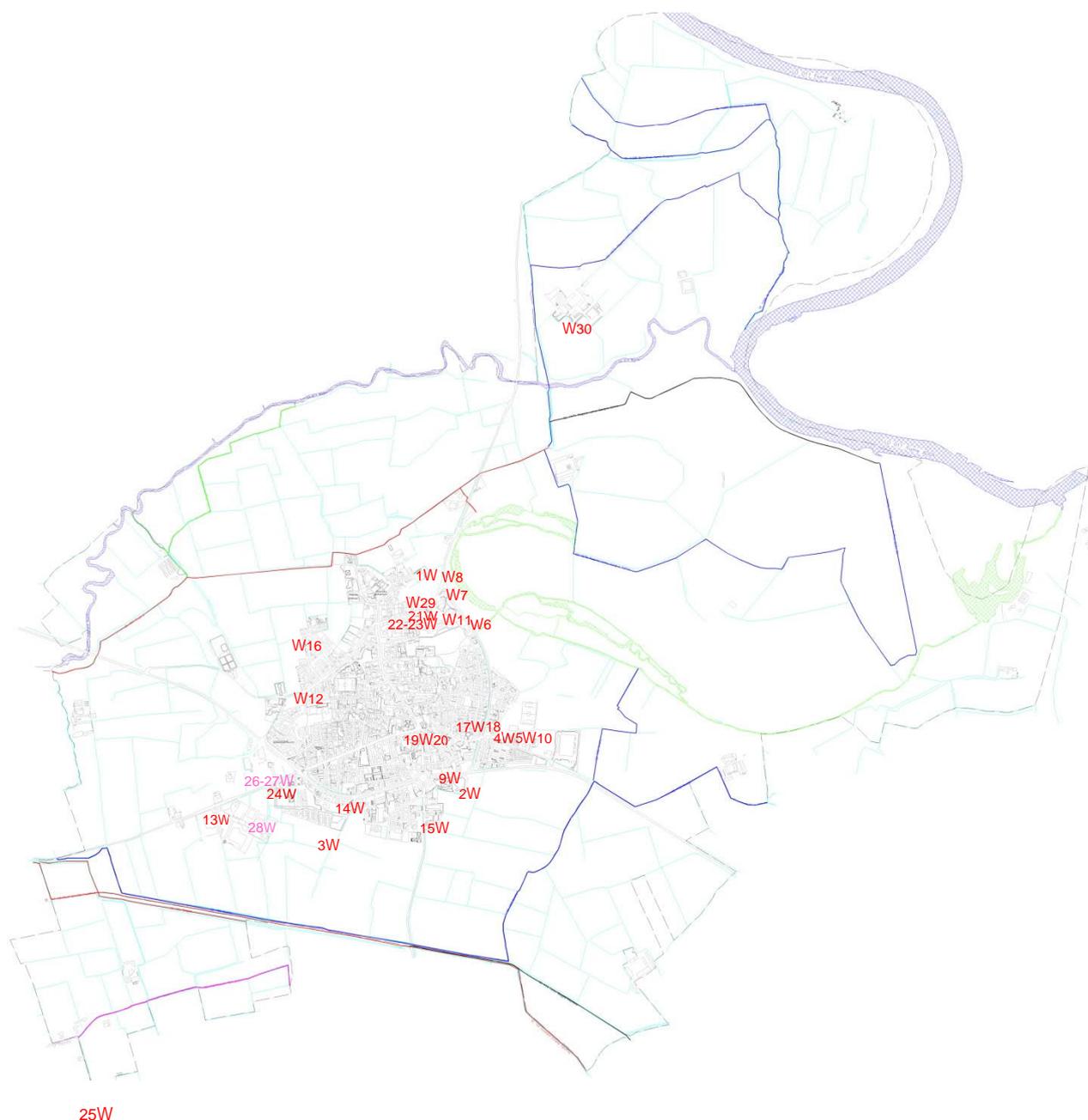


Figura 37: ubicazione prove penetrometriche W. La numerazione è riferita alla tabella. Le prove eseguite a breve distanza reciproca sono indicate con un unico simbolo, in posizione circa intermedia.

La distanza tra le singole verticali è compresa tra poche decine di metri ad alcune centinaia di metri (ad esclusione della n.25 che dista oltre 1 Km), e mediamente da 200 a 400 metri. Tale misura è troppo grande perché i depositi interposti possano essere ritenuti

uniformi, soprattutto nella porzione superficiale dove si registrano le più marcate variazioni, sia tessiturali che di resistenza meccanica. In profondità i caratteri appaiono più regolari, ma raramente è possibile individuare correlazioni attendibili.

Dall'insieme delle prove disponibili è possibile individuare alcuni gruppi di verticali che presentano maggiori analogie, e di conseguenza definire alcune "zone" grossomodo omogenee.

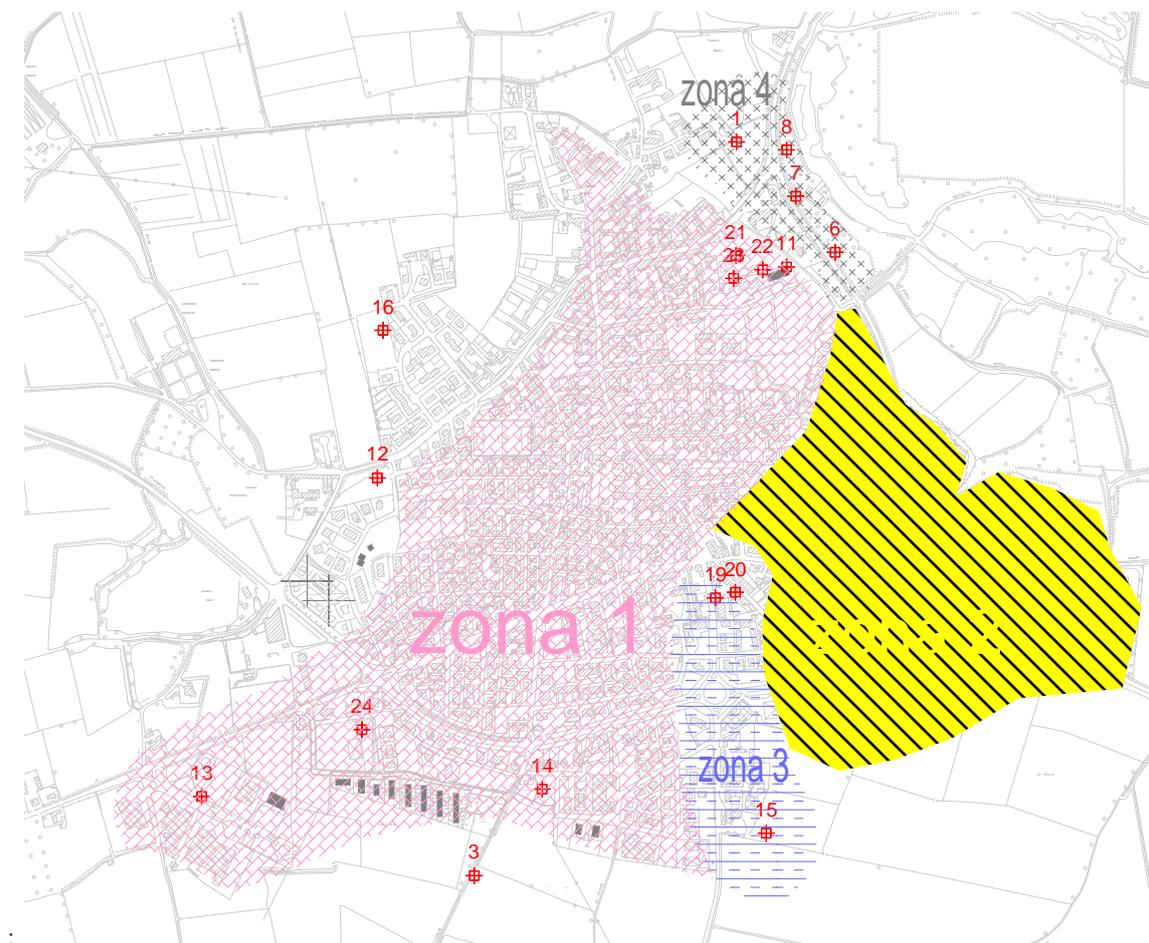


Figura 38: suddivisione grossolana del territorio esaminato con prove penetrometriche che presenta caratteri stratigrafici relativamente uniformi, **W** prove penetrometriche statiche, numerazione nella Tabella 4.

La zona 1 comprende buona parte dell'abitato e si estende da via Mattei – SP 22 all'estremità NE presso via del Gorgo – via Adda, delimitata a nord dal ciglio della scarpata e a sud dall'abitato posto ad ovest della SS 591. In quest'area il profilo, oltre il primo metro, è formato da sabbie di media ed elevata densità ($32 < f' < 36^\circ$), talora limose o fini nei primi 2 – 3 metri, che oltre tale profondità presentano bancate di elevata resistenza, forse formate da sabbie ghiaiose nell'area nord orientale.

La zona 2 occupa la porzione sud orientale dell'abitato, tra via Kennedy e la S.P. 27, estendendosi verso sud in località Garusa. La caratteristica principale che la distingue dalla precedente è data dalla costante presenza nei primi 2 metri di uno strato di media resistenza ($15 < q_c < 25 \text{ kg/cm}^2$), generalmente formato da limo argilloso sovraconsolidato, poggiante con contatto netto su sabbie di media densità ($31 < f' < 34^\circ$). A loro volta tali sabbie poggiano

a -5,5 / -6,0 m su sabbie di densità elevata ($33 < f' < 36^\circ$) che talora contengono una frazione ghiaiosa.

La zona 3 coincide circa con la parte meridionale della SS 591 in corrispondenza del centro abitato, e la sua prosecuzione verso nord con la prima parte della via Roma. Si sono riunite in tale gruppo le prove n. 15 e n.19 di Tabella 4 che mostrano un profilo di medio-bassa resistenza fino a 3,2 / 4,2 m ($10 < q_c < 32 \text{ kg/cm}^2$), formato da sabbie sciolte e di media densità ($29 < f' < 32^\circ$) o limi sciolti, che poggiano su sabbie limose o alternanze di sabbie con limo di bassa o media resistenza ($30 < q_c < 95 \text{ kg/cm}^2$).

L'ultima zona distinta è la n. 4 coincidente con una porzione delle alluvioni oloceniche antiche estese al piede della scarpata principale, nell'area a NW del Fosso del Gorgo. In questa area le prove CPT n. 1 e n. 8 mostrano oltre i primi 60 cm circa un profilo formato da sabbie talora debolmente limose di media densità ($31 < f' < 33^\circ$), poggianti alla profondità rispettivamente di -5 e -3 m su sabbie e ghiaie dense ($f' > 37^\circ$), che compaiono alla medesima quota assoluta, di circa 45,3 m s.l.m. Le prove n. 6 e 7 mostrano sabbie limose analoghe alle precedenti nei primi 3 metri, e sono seguite da regolari alternanze di sabbie limose e sabbie con ghiaia.

Le prove restanti, esterne alle "zone" sopra definite, mostrano alcune caratteristiche peculiari che le rendono poco correlabili con quelle limitrofe.

La n. 3 (CPT 3/3 giugno 2008) presenta da -1,0 a -2,2 metri uno strato limo argilloso molto tenero ($c_u \sim 25 \text{ kPa}$, deposito poco sovraconsolidato) assente nelle prove limitrofe, che comporta alcuni problemi pratici per lo scarso carico ammissibile e gli elevati cedimenti in caso di fondazioni superficiali. Il campionamento eseguito in prossimità della verticale ha evidenziato inoltre che i terreni fini sono totalmente saturi, mentre le sabbie dense sottostanti, che si estendono con continuità fino alla profondità esplorata, sono asciutte. La porzione superficiale del profilo trova buona corrispondenza con le caratteristiche del suolo presente nell'area (LRD 1 – tessitura franco argillosa), e rappresenta una garanzia di elevata protezione delle acque sotterranee da inquinanti superficiali, ma il substrato pedologico è differente da quello definito per l'unità tassonomica (sabbioso - v. Figura 13). Tali considerazioni e la totale assenza di continuità nelle verticali limitrofe rende impossibile valutare l'estensione territoriale del deposito limo argilloso tenero sopra descritto, e quindi delle aree con associate problematiche di carattere geotecnico.

La n. 12 (CPT 4/8 febbraio 1998) presenta un intervallo limo argilloso tra -2,0 e -3,6 m, suddiviso in due parti da uno strato di sabbia di circa 60 cm, ma in questo caso la resistenza penetrometrica è media e la sovraconsolidazione è apprezzabile ($c_u \sim 75 \text{ kPa}$). Il carico limite e i cedimenti per fondazioni superficiali risentono poco di questi strati relativamente teneri.

L'ultima prova che presenta un profilo non correlabile con le altre è la n. 16 (n° 8/8 - febr. '98), dove tra -2,0 e -4,2 m è presente uno strato limo argilloso molto tenero ($c_u \sim 30 \text{ kPa}$), poggiante su sabbie sciolte che passano rapidamente a ghiaie sabbiose dense ($f' > 37^\circ$). La quota della superficie di separazione con il substrato rigido è di 47,0 m s.l.m., ben

correlabile con quella delle prove CPT n. 1 e n. 8 (zona 4). L'origine del deposito coesivo tenero è dovuta al riempimento dell'antico paleoalveo, ben delineato tra il cimitero e la Cascina Castello e comprendente le abitazioni di via Marconi, via Galilei e via Fermi. Il deposito non appare in continuità con lo strato descritto in precedenza per la prova n. 12 che si trova a quote superiori di circa 4 metri e presenta una resistenza quasi tripla (q_c media rispettivamente 6,3 e 14,8 Kg/cm²).

Le prove dinamiche SCPT (n. 26, 27 e 28 nell'elenco di Tabella 4), confermano la prevalenza di sabbie di media densità e dense fino a 10 metri nell'area a SE della SP 22, ma per limiti intrinseci al metodo non consentono di individuare i dettagli stratigrafici presenti in particolare nei primi metri e che hanno consentito le suddivisioni sopra operate.

9.2 STIMA DEL CARICO LIMITE, DEI CEDIMENTI E DELLE VS DAI DATI CPT

9.2.1 Criteri di valutazione

Per fornire un elemento di distinzione tra le aree basate su aspetti pratici, nonché una valutazione immediatamente utile per la progettazione nell'area urbana, si sono elaborate le prove penetrometriche in modo da ottenere l'andamento planimetrico di tre "parametri informali".

I primi due scaturiscono dall'ipotesi che sul terreno gravino fondazioni superficiali ordinarie aventi le seguenti caratteristiche geometriche: larghezza $B = 0,6$ m; lunghezza $L = 6,0$ m; profondità posa dal piano campagna $D = 0,8$ m

Utilizzando l'esito delle sole prove penetrometriche statiche (CPT) si è quindi calcolato il CARICO LIMITE (q_{ult} = carico a rottura; quindi, privo di coefficiente di sicurezza ai sensi del D.M. 11 marzo 1988) ed i cedimenti nell'ipotesi che le fondazioni trasmettano al terreno carichi di 120 kPa e 180 kPa (7,34 e 11,03 ton/m).

La stima del carico limite per brevità, e per evitare l'uso di parametri derivati che sempre risentono di scelte soggettive, è stata eseguita impiegando la relazione riferita nella figura seguente, tratta da una recente pubblicazione di un autorevole studioso delle prove CPT, utilizzando i valori medi di q_c sotto la fondazione ipotizzata, fino a profondità $-1,1 B$.

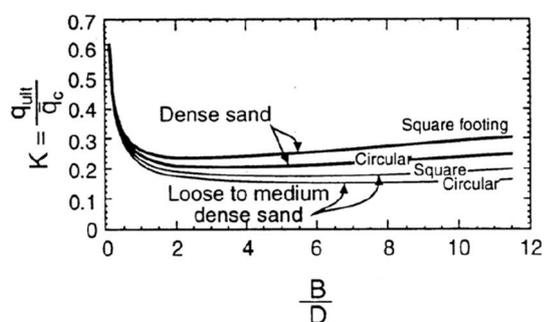


Figura 39 : Correlation between bearing capacity of footing on cohesionless soils and average cone. Eslaamizaad, S., and Robertson, P. K. "Cone Penetration Test to Evaluate Bearing Capacity of Foundations in Sands." Submitted to 49th Canadian Geotechnical Conference, St. John's, Newfoundland. 122 - 22 - 1996.

Tratto da: Guide to Cone Penetration Testing For Geotechnical Engineering By P. K. Robertson and K.L. Cabal (Robertson). Gregg Drilling & Testing, Inc. 3rd Edition January 2009

Cautelativamente il valore impiegato con substrati prevalentemente sabbiosi è stato di $K = 0,16$.

In presenza di suoli coesivi, come suggerito da P. K. Robertson (2009), $q_{ult} = K_{su} q_c (av) + \gamma D$ con $K_{su} =$ da 0,30 a 0,60 in funzione del rapporto B/D, della forma e del valore di sovraconsolidazione OCR. In generale si assume $K_{su} = 0,30$ in argille.

I valori di K_{su} usati in terreni in prevalenza coesivi sono stati compresi tra 0,2 e 0,3 in funzione della presenza più o meno abbondante della frazione sabbiosa nel profilo immediatamente sottostante la fondazione.

La seconda elaborazione ha riguardato la STIMA DEI CEDIMENTI immediati nell'ipotesi che la fondazione sopra indicata trasmetta ai terreni pressioni di 120 e 180 kPa.

Per i calcoli è stato impiegato unicamente il metodo di Schmertmann (1970 e 1978), facilmente reperibile in letteratura, il cui utilizzo è suggerito con terreni esclusivamente sabbiosi. La procedura impiega direttamente i dati delle prove penetrometriche statiche e non vi sono passaggi interpretativi, ovvero non occorre raggruppare il profilo indagato in strati ai quali attribuire parametri geotecnici. Nel calcolo si considerano solo i valori di resistenza alla punta (un valore ogni 20 cm), la geometria della fondazione e la quota della falda, e nel presente caso l'analisi è stata eseguita tramite un procedimento semi automatico su un foglio di calcolo predisposto dallo scrivente.

A rigore dove sono presenti depositi fini sotto le fondazioni (verticali CPT 3, 4, 5, 9, 16, 17, 18) sarebbe necessario valutare i moduli di deformabilità dei terreni con criteri più complessi, ma poiché i valori ottenuti sono in genere prossimi a quelli impiegati nel metodo di Schmertmann, ed in considerazione degli obiettivi generali del caso, si è ritenuto opportuno evitare anche per tale parametro ogni ricorso a metodi meno rigidamente definiti.

L'ultimo parametro derivato dalle prove CPT riguarda una stima dei valori delle VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO VS che consente di stimare la CATEGORIA DI SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE definite nella Tabella 3.2.11 NTC 2008. L'affidabilità di queste correlazioni è oggetto di numerose valutazioni e critiche, essendo secondo taluni autori in concreto inesistenti¹⁸.

Nondimeno nella letteratura internazionale le correlazioni sono presenti, e l'autorevolezza degli autori proponenti rende quantomeno plausibile che possano costituire un riferimento generale valido per studi di carattere territoriale. Inoltre l'esito dell'elaborazione appare in linea con i risultati ottenuti dallo scrivente in indagini su terreni di analoga composizione e profilo penetrometrico.

Secondo la citata pubblicazione di P. K. Robertson (2009) è possibile correlare la velocità delle onde di taglio Vs alla resistenza alla punta conica CPT in funzione del tipo di terreno e dell'indice I_c del SBT (Soil Behavior Type)¹⁹. Le Vs sono sensibili all'età dei depositi ed alla

¹⁸ Interessanti considerazioni sono riferite in un rapporto redatto dall'Università di Firenze Dipartimento di Ingegneria Civile – Sezione Geotecnica (Prof. Ing. Claudia Madiati, Firenze febbraio 2006) che conclude una convenzione con la Regione Emilia-Romagna in merito allo studio in ambito regionale di CORRELAZIONI TRA VELOCITÀ DELLE ONDE SISMICHE DI TAGLIO E INDICI DI PROVE GEOTECNICHE IN SITO DI TIPO CORRENTE. Nelle conclusioni del rapporto si legge che “per i terreni incoerenti non è stata trovata, sulla base dei dati esaminati, alcuna correlazione tra V_s e q_c in nessuna delle verticali indagate; per i terreni a grana fine è stata proposta una regressione del tipo $V_s = a q_c^b$ con coefficienti di determinazione accettabili solo in alcune delle verticali indagate.”

¹⁹ Il tipo di terreno riconoscibile dai valori di prova è determinato mediante confronto dei valori di misura semplici o normalizzati, in funzione dello stato di sforzo totale verticale dei terreni alla quota della misura (S_{vo}), con grafici

cementazione, così che lo stesso tipo di depositi presenta velocità maggiori in terreni più antichi e minori in quelli più recenti.

La relazione proposta è espressa dal grafico di Figura 40 che mostra la relazione tra i valori normalizzati delle CPT e $(Q_{tn}$ e F_r)²⁰ e valori normalizzati delle velocità delle onde di taglio V_{s1} , dove $V_{s1} = V_s (p_a / \sigma'_{vo})^{0.25}$

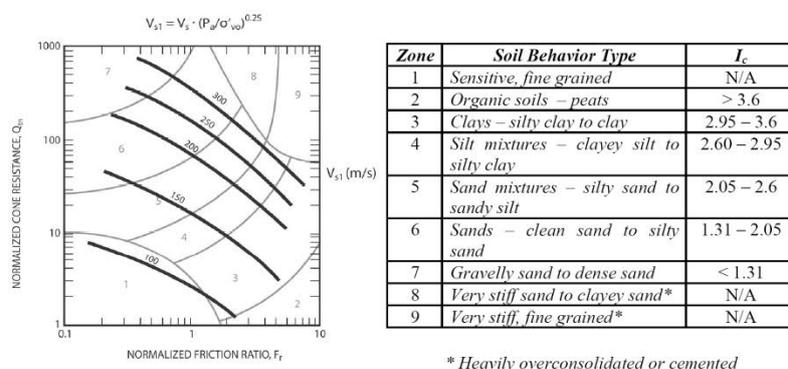


Figure 23 Evaluation of normalized shear wave velocity, V_{s1} , from CPT for uncemented Holocene and Pleistocene age soils (1m/s = 3.28 ft/sec)

$$V_s = [\alpha_{cs} (q_t - \sigma_v) / p_a]^{0.5} \text{ (m/s); where } \alpha_{cs} = 10^{(0.55 I_c - 1.85)}$$

Figura 40: grafico per la stima dei valori di V_s normalizzati partendo da valori q_c di CPT.

La relazione analitica che consente la stima di V_s dai valori di I_c , q_t e σ_{vo} è riferita in calce alla Figura 40. I valori di I_c sono stati elaborati impiegando il software CPeT- IT ver 1.6.0.68 della GeoLogismiki Geotechnical Engineers (<http://www.geologismiki.gr/>), e mediante un foglio di calcolo sono stati ottenuti i relativi valori di V_s delle verticali ritenute più rappresentative.

9.2.2 Risultati delle elaborazioni e relativi commenti

I parametri determinati come detto al paragrafo precedente sono riferiti nella Tabella 5, dove sono evidenziati con sfondo rosa alcuni valori ottenuti che denotano la presenza, con le fondazioni ipotizzate, di cedimenti molto rilevanti o di carichi limite lievemente inferiori a quelli comunemente attesi per opere ordinarie.

I valori dei cedimenti sono rappresentati anche in forma grafica nella stessa Tabella 5.

predefiniti che individuano vari ambiti di appartenenza dei valori letti, ovvero il tipo di comportamento prevalente del terreno (Soil Behavior Type - SBT). Il valore I_c (detto Indice del SBT) deriva da tali grafici e rappresenta il raggio dei cerchi essenzialmente concentrici che formano i limiti degli ambiti omogenei dei terreni sul grafico. Operando con valori normalizzati: $I_c = ((3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2)^{0.5}$ dove Q_t = resistenza penetrometrica normalizzata (adimensionale), $= (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$ e F_r = rapporto di frizione normalizzato, in % = $(f_s / (q_t - \sigma_{vo})) \times 100$.
²⁰ $Q_{tn} = Q_t (p_a / \sigma'_{vo})^n$ dove p_a = pressione atmosferica. L'esponente n varia con il tipo di suolo e lo stato tensionale, ma in prima approssimazione $n = 1$ e quindi $Q_m = Q_t$.

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

N. prova	cedimenti con carichi di (kPa)		q _{lim} kPa	Vs (m/s)
	120	180		
1	0,9	1,54	403	206
2	0,71	1,22	430	228
3	5,15	8,9	252	261
4	1,01	1,75	563	-
5	0,91	1,57	343	-
6	0,75	1,29	486	-
7	0,79	1,37	636	215
8	0,73	1,26	683	-
9	0,9	1,55	351	-
10	0,94	1,62	367	-
11	0,46	0,79	983	-
12	1,27	2,19	462	229
13	0,37	0,64	809	290
14	0,33	0,58	1180	-
15	1,43	2,46	326	206
16	2,2	3,81	418	186
17	1,26	2,18	450	-
18	1,07	1,84	494	238
19	1,13	1,94	355	-
20	0,68	1,17	675	225
21	0,36	0,72	892	267
22	0,32	0,54	999	-
23	0,39	0,67	932	-
24	0,44	0,75	711	-
25	0,33	0,57	1196	265
media	1,0	1,7	616	235

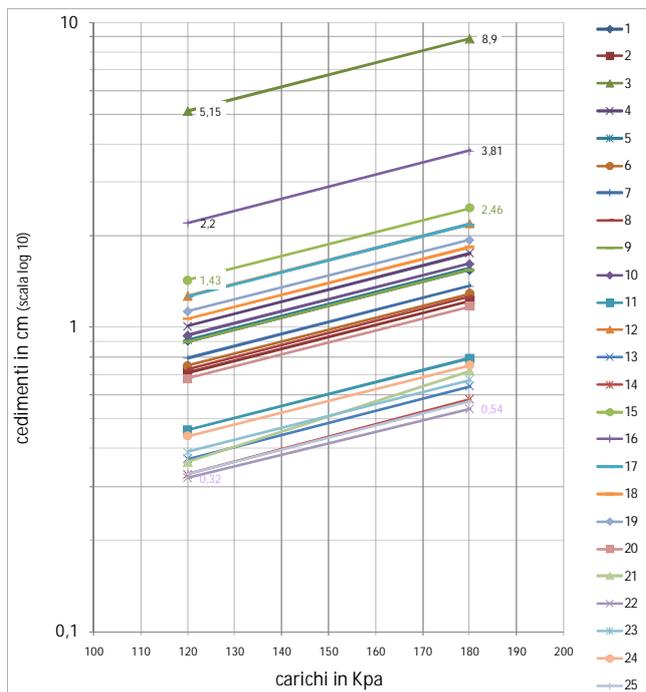


Tabella 5: esito sintetico dell'elaborazione dei cedimenti, del carico limite e delle Vs medie dalle 25 prove CPT. A destra rappresentazione dei cedimenti per le singole verticali.

Mediante Surfer © 8 si è sono elaborate alcune planimetrie che restituiscono a grandi linee la distribuzione sul territorio dei parametri sopra determinati: si sottolinea a che la significatività dei valori rappresentati è data solo per le aree prossime o interposte a verticali abbastanza prossime (alcune centinaia di metri al massimo).

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021



Figura 41: distribuzione dei cedimenti immediati (cm) con carichi di 120 kPa su fondazioni lineari superficiali di larghezza B= 0,6 m approfondite 0,8 m dal piano campagna.

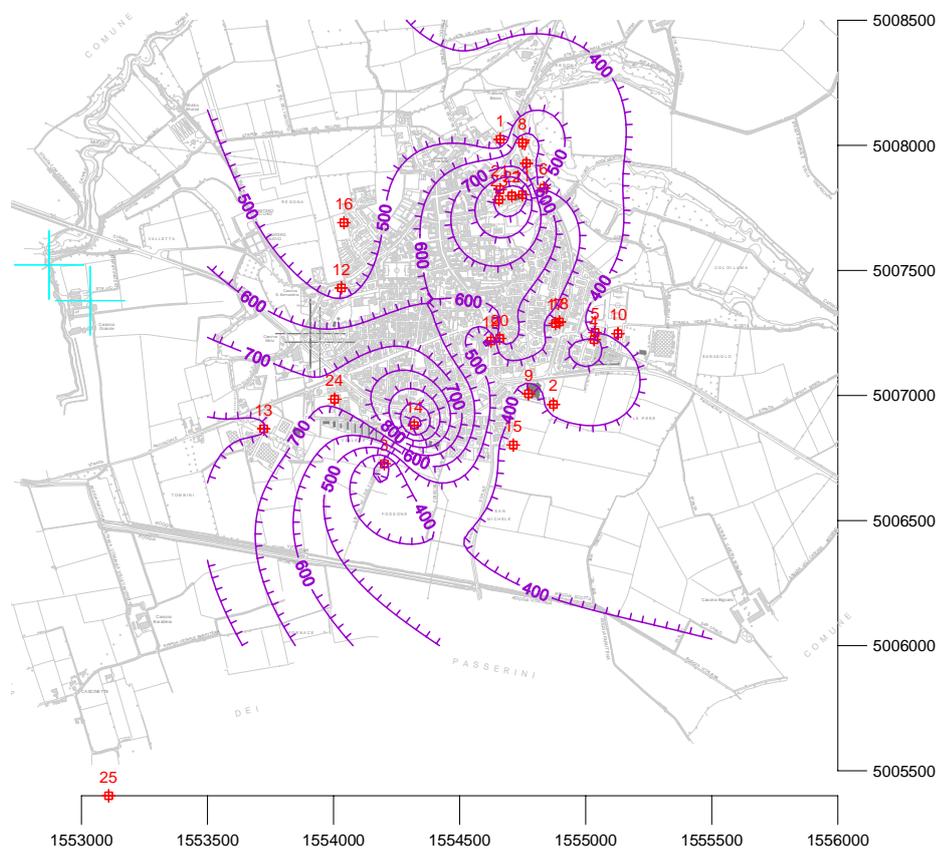


Figura 42 : distribuzione dei carichi limite (q_{lim} in kPa) per le fondazioni superficiali sopra ipotizzate.

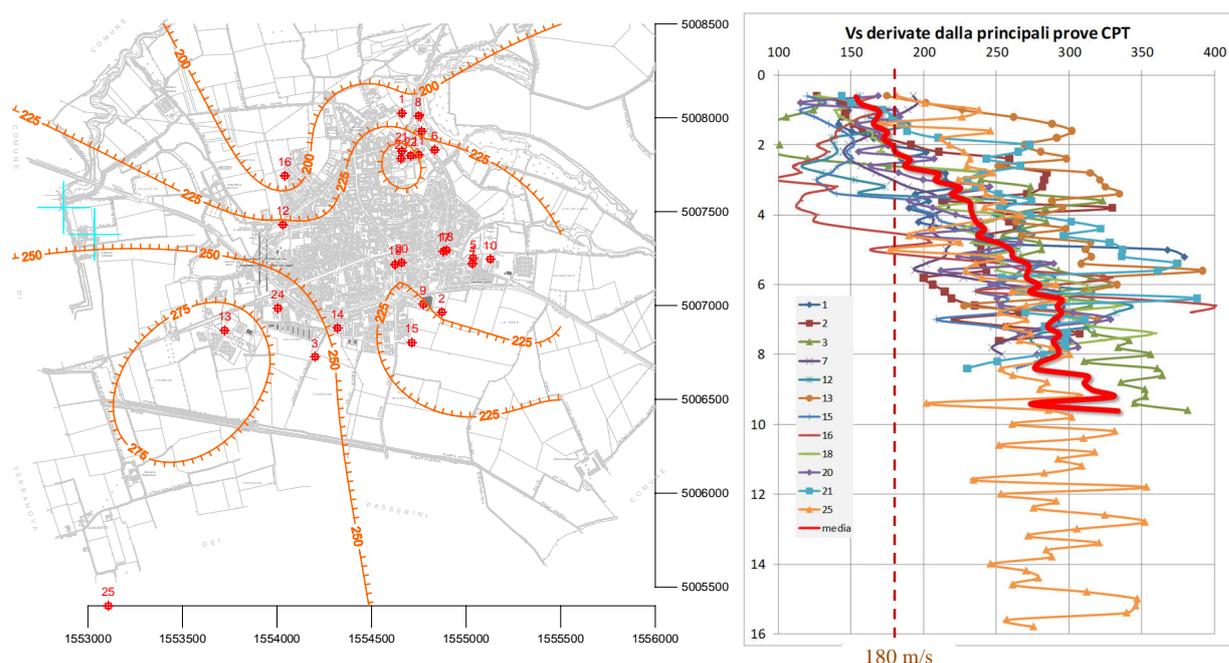


Figura 43: distribuzione delle velocità medie di taglio Vs in m/s ottenute dai profili di 12 verticali CPT indicate in Tabella 5 e grafici ottenute dalle singole verticali.

I cedimenti immediati calcolati sono molto contenuti, nel 90% dei casi inferiori a 1,4 cm, mentre solo presso la prova 3 (CPT 3/3 2008) il valore diviene elevato, tale da rendere indispensabile migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno prima di realizzare fondazioni ordinarie superficiali (più semplicemente è possibile spingere le fondazioni sul substrato sabbioso a -2,2 m circa). L'estensione del deposito compressibile superficiale non è nota ne desumibile da elementi morfologici, e dovrà essere accertato con apposite verifiche in fase di progettazione delle opere di urbanizzazione. Non si può escludere che le caratteristiche riscontrate siano il frutto di una particolare anomalia locale, ad esempio data dalla chiusura di un cavo irriguo con materiale di scarsa qualità meccanica. Le informazioni raccolte non confermano però tale ipotesi.

L'altra area che presenta valori relativamente elevati è quella intorno alla prova 16 (area a nord di via Umberto I, tra parco dei platani e cascina castello). In questo caso la morfologia delinea in modo netto l'area di molto probabile estensione del deposito fine e tenero responsabile dei cedimenti.

Il calcolo con l'ipotesi di carico di 180 kPa comporta un aumento dei cedimenti immediati rispetto a quanto indicato per il carico di 120 kPa del 70% – 100 %, mentre la distribuzione planimetrica è sostanzialmente la medesima.

Infine, secondo quanto indicato dal metodo di calcolo impiegato, i cedimenti a lungo termine comporteranno un incremento dei valori sopra indicati in Tabella 5 (cedimento immediato) di circa il 40% in 10 anni e del 50% in 30 anni.

I carichi limite (q_{ult} = carico a rottura, quindi privo di coefficiente di sicurezza ai sensi del D.M. 11 marzo 1988) presentano una distribuzione analoga a quella descritta per i

cedimenti, con valori in questo caso minimi in corrispondenza delle verticali 3 e 16. Valori moderatamente bassi interessano buona parte dell'area sud est dell'abitato, con valori inferiori a 400 kPa in corrispondenza delle verticali 15, 9, 10, 5 e 19.

La distribuzione delle velocità delle onde di taglio V_s derivate dai valori medi delle singole verticali considerate (n. 12 in totale) è piuttosto uniforme, con valori moderatamente più elevati lungo l'asse SW – NE dell'abitato, da via Mattei all'Adda Morta. Pur considerando lo scarso approfondimento di numerose prove ed i limiti di attendibilità del metodo di stima, si può giudicare che il risultato ottenuto delinei con relativa sicurezza valori di V_s sempre superiori a 180 m/s nei depositi oltre la profondità di 5 metri. A meno di improbabili inversioni delle velocità vista la prevalenza dei depositi sabbiosi e sabbioso ghiaiosi nei primi 30 metri, è del tutto ragionevole presumere che i valori di V_s oltre i 5 metri possano essere mediamente non inferiori a 200 m/s.

Tale considerazione consente di collocare i depositi dell'abitato di Castiglione d'Adda entro la categoria C di sottosuolo della Tabella 3.2.II NTC 2008 : *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

10 Aspetti sismologici e risposta sismica locale

10.1 RIFERIMENTI NORMATIVI E DEFINIZIONI

Le norme nazionali, DM 17 gennaio 2018 di aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» in vigore dal 20.03.2018 e l'unità Circolare C.S.LL.PP. 21 gennaio 2019, n. 7, in particolare nei § 3.2.2, 3.2.3, 7.2.6, 7.11.3 e quelle regionali formate dalla DGR 30 novembre 2011 IX/2616 di aggiornamento dei "Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT", dalla DGR 2129/2014 contenente la nuova classificazione sismica regionale e la DGR 5001/2016 relativa ai criteri attuativi della LR 33/2015 in materia di costruzioni in zona sismica e relativa vigilanza, richiedono che tra gli elementi di pericolosità geologica siano valutati i possibili effetti che particolari condizioni geologiche e geomorfologiche (condizioni locali) possono determinare in occasione di eventi sismici.

La "risposta sismica locale" che si manifesta su una struttura in progetto può essere studiata con le modalità indicate nel § 7.11.3 delle NTC, ma qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, ossia alle "Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato", si può fare riferimento a tale procedura che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s .

La pericolosità sismica di base, ossia l'entità e la frequenza dei fenomeni sismici generati dal substrato roccioso è definita da studi sismologici nazionali e regionali, mentre gli **EFFETTI LOCALI**, ossia il comportamento dei terreni dove poggiano le fondazioni e in genere le opere strutturali, sono distinti in funzione del comportamento dinamico dei materiali coinvolti e principalmente dipendono dalla morfologia e dalle caratteristiche meccaniche del terreno presente nelle prime decine di metri dalla superficie

Si distinguono due grandi gruppi di **EFFETTI LOCALI**:

- quelli determinati **dall'amplificazione sismica locale**
- quelli dovuti all'**instabilità**

La prima interessa terreni stabili ma che per effetto della loro disposizione e caratteristiche meccaniche producono modificazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza del moto sismico prodotto dal terremoto di riferimento, proveniente da una sottostante formazione rocciosa (bedrock), e nell'ambito di tali effetti si distinguono:

- **L'amplificazione topografica**, che si manifesta quando sono presenti morfologie superficiali che favoriscono la focalizzazione delle onde sismiche, in prossimità della cresta di un rilievo a seguito di riflessione delle onde sulla superficie libera e di interazione fra il campo d'onda incidente e quello diffratto. Nella Tabella 3.2.IV delle NTC 2018, categorie topografiche, sono distinte:

- T1 Superfici pianeggianti, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
- T2 Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
- T3 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
- T4 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Le categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate in grado di modificare l'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Nel territorio di Castiglione d'Adda è presente una lunga scarpata di erosione fluviale disposta grossomodo da ovest verso est che ha inciso i depositi pleistocenici separando il territorio amministrato in due porzioni chiaramente distinte (si veda la rappresentazione in figura xx), la prima formata dalla piana tardo pleistocenica che ospita la porzione maggiore dell'abitato e i terreni a sud dello stesso, costituisce assieme alla scarpata stessa circa il 38% della superficie amministrata e presenta quote tra i 64 e i 54 m s.l.m., mentre a nord la superficie posta tra i 54 e i circa 45 m s.l.m. forma la piana di recente formazione (post glaciale) dove si estende il restante 62 % del territorio.

Le scarpate presentano acclività generalmente comprese tra i 15° ed i 30° (27 - 58 %), con valori che si approssimano ai 40 ° lungo i 900 metri a nord ovest di Cascina Santa Maria dove si osserva anche il dislivello massimo dell'intero territorio pari a 15 metri, ma si precisa che la morfologia descritta, per quanto citato in merito nella Tabella 3.2.IV delle NTC 2018, non rientra tra quelle in grado di determinare una amplificazione sismica a causa della modesta entità del dislivello. Queste superfici risultano essere comunque rilevanti, dal punto di vista della sicurezza sismica, per la potenziale instabilità dei terreni sabbiosi, argomento che rientra in un successivo punto considerato nel presente rapporto.

Il restante territorio si presenta sostanzialmente piano ed è quindi interamente appartenente alla categoria topografia T1, che descrive le aree non soggette ad amplificazione topografica risultando esprimibile con il coefficiente di amplificazione topografica $S_T = 1$ nella tabella 3.2.V delle NTC 2018.

- **amplificazione litologica:** si verifica quando sono presenti morfologie sepolte (bacini sedimentari, chiusure laterali, corpi lenticolari, eteropie ed interdigitazioni, gradini di faglia ecc.), e/o da particolari profili stratigrafici che possono generare esaltazione locale delle azioni sismiche trasmesse dal terreno, fenomeni di risonanza fra onda sismica incidente e modi di vibrare del terreno e fenomeni di doppia risonanza fra periodo fondamentale del moto sismico incidente e modi di vibrare del terreno e della sovrastruttura.

L'"intrappolamento" delle onde sismiche all'interno del deposito sedimentario è determinato dal contrasto di impedenza ⁽²¹⁾ ⁽²²⁾ tra gli strati sedimentari o tra sedimenti sciolti superficiali e il bedrock.

²¹ L'impedenza sismica è data dal prodotto della densità ρ del terreno o della roccia per la velocità V delle onde ($\rho \cdot V = Z$).

²² Il contrasto di impedenza sismica fra strati di roccia adiacenti influisce sul coefficiente di riflessione. In particolare, fra le rocce profonde (bedrock) e le rocce alluvionali [depositi alluvionali - n.d.r.] appoggiate su di esse, il contrasto è la causa degli "intrappolamenti" di energia (riflessioni multiple) all'interno delle piane alluvionali, una delle principali cause dei più vistosi effetti di amplificazione di sito. In questo senso, forti contrasti di impedenza fra bedrock e alluvioni, e particolari condizioni geometriche (spessori delle alluvioni) possono provocare particolari interazioni tra frequenze del moto ondulatorio in arrivo e modo di vibrare degli edifici (pseudo-risonanza). Tratto dal sito <http://www.sissa.it/main/> SISSA : Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, Trieste.

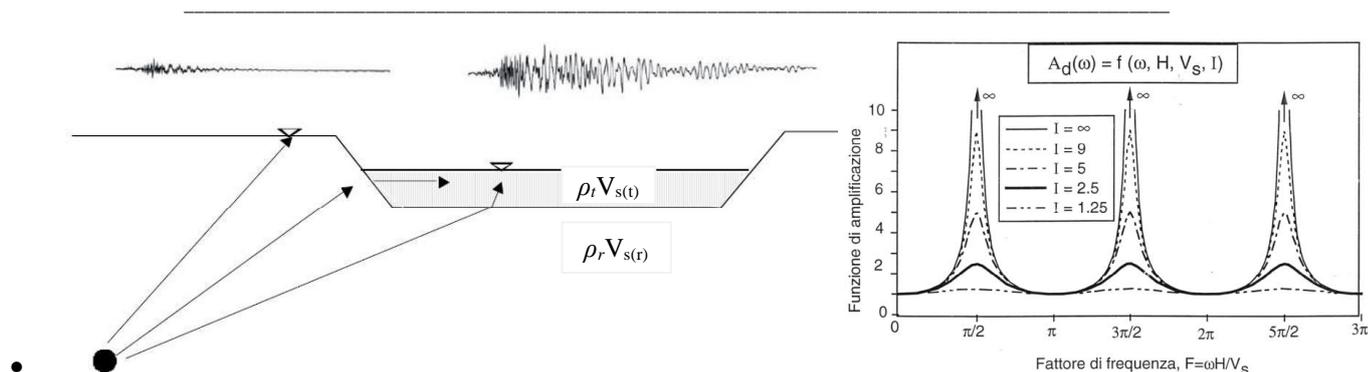


Figura 44: schema rappresentativo di amplificazioni dovute a condizioni litologiche e/o geometriche e a destra grafici della funzione di amplificazione al variare del fattore di frequenza ($F = \omega H/V_s$, con $\omega = 2\pi f$ = frequenza circolare) e del valore del rapporto di impedenza.

Il rapporto d'impedenza $I = \rho_r V_s(r) / \rho_t V_s(t)$ superiore circa a 2 dà luogo ad effetti sensibili di amplificazione, che in particolare si manifestano quando la frequenza dell'eccitazione sismica si approssima o coincide con la frequenza fondamentale dello strato superficiale, stimabile nel caso di strati orizzontali di grande estensione laterale quale quelli della bassa pianura lombarda, dalla relazione $f_1 = \frac{V_s}{4H}$ funzione del suo spessore H e della V_s , ovvero quando si realizzano condizioni di risonanza.

Tale condizione può essere presente a Castiglione d'Adda ma le informazioni disponibili, sia fornite dalle indagini sismiche che dai dati stratigrafici, non individuano indizi di strutture sepolte nell'area urbana in grado di determinare variazioni significative delle onde sismiche. Secondo la pubblicazione "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (ICMS) 2008, utilizzando l'approccio semplificato proposto da Bard e Bouchon (*Two dimensional resonance of sediment filled valley*, 1985), è possibile valutare l'assenza di amplificazioni connesse a bacini sepolti verificando validità della seguente relazione: $\frac{h}{L} \leq \frac{0,65}{\sqrt{C_v - 1}}$, con h la profondità della valle [massimo spessore del deposito], L la sua semiampiezza, C_v il rapporto fra la velocità $V_{s,b}$ nel basamento sismico (800 m/s per convenzione) e quella media nei terreni di riempimento della valle $V_{s,t}$.

Nella bassa pianura h si può stimare in un intervallo tra 100 e i 500 metri ed L è sempre $\gg 1$ Km e nell'ipotesi cautelativa che a Castiglione d'Adda $L = 1,5$ km, il rapporto $\frac{h}{L}$ varierà tra 0,07 e 0,34.

In pianura si può ragionevolmente ritenere che $V_{s,t}$ medio fino al basamento sismico sia compreso tra 220 e 400 m/s ($V_{s,30} = 272$ m/s, con d.s. 4 m/s, è il valore medio ottenuto dei primi 30 metri dalle tre prove eseguite a Castiglione d'Adda, valore sicuramente inferiore a quello medio fino al basamento sismico) e quindi si ottiene che C_v non può che essere compreso tra 3,6 (800/220) e 2 (800/400). Di conseguenza il termine destro della relazione presenta valori compresi tra 0,40 e 0,65, che in entrambi i casi sono superiori ai valori del rapporto $\frac{h}{L}$ sopra indicato. In altri termini applicando la procedura, è ragionevolmente verificata l'assenza di effetti bidimensionali che possono rendere irrealistiche le stime del fattore di amplificazione con la procedura di secondo livello di seguito esposta.

L'amplificazione litologica può peraltro essere tenuta in conto in fase progettuale se si adotta la procedura semplificata prevista dal DM 17.01.2018, che prevede l'individuazione della categoria di sottosuolo di cui alla Tabella 3.2.II. del citato D.M., che in base all'esito delle misure geofisiche eseguite risulta essere costantemente la "C" e ciò comporta un incremento della sollecitazione sismica ipotizzata su suolo rigido di categoria A.

L'**instabilità** riguarda principalmente le dinamiche dei versanti ma può interessare anche terreni particolarmente scendenti dal punto di vista geotecnico, dove si possono verificare scivolamenti e rotture del suolo. Nei terreni granulari sopra falda sono possibili cedimenti a causa della **densificazione** del materiale, mentre sottofalda sono possibili fenomeni di **liquefazione**. Fenomeni analoghi a quelli della liquefazione possono interessare anche depositi/unità stratigrafiche contenenti argille tissotropiche, il cui rifluimento può innescare **frane superficiali** o **espansioni laterali**.

Nel caso in esame i fenomeni di densificazione, che producono cedimenti, non sono probabili nell'area urbana perché l'evento sismico atteso è molto basso e il fenomeno citato interessa solo terreni naturali o artificiali (ad esempio i terreni di riporto) a grana sabbioso-limoso e messa in posto recente ⁽²³⁾, quali quelli presenti ad est della SP ex SS 591, mentre per quanto concerne il rischio di liquefazione, ovvero di perdita istantanea di capacità portante per incremento delle pressioni neutre generate dal sisma, la condizioni fondamentali sono presenti a Castiglione d'Adda solo a nord ovest di via Umberto Primo dove sono presenti terreni granulari fini (sabbiosi) saturi di acqua, ma le elaborazioni effettuate con i dati delle prove penetrometriche disponibili hanno condotto a escludere tale rischio nelle aree indagate, e quindi a ritenere il fenomeno molto improbabile in tutto il territorio (§).

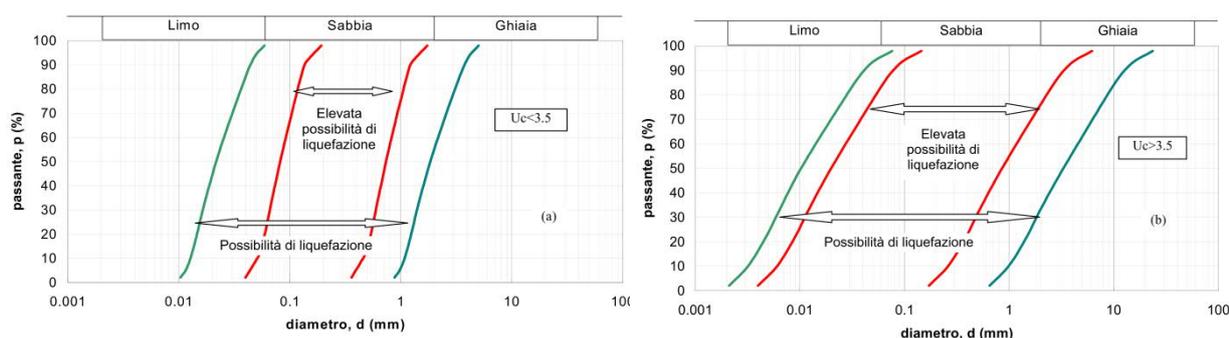


Figura 45: Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione di un terreno per i terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (da AGI, 2005 Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica) e § 7.11.3.4.2 NTC 2018.

Fenomeni analoghi a quelli della liquefazione possono interessare anche depositi/unità stratigrafiche contenenti argille tissotropiche, il cui rifluimento può innescare frane superficiali o espansioni laterali. Argille

²³ Definizioni tratte da: Linee guida per la realizzazione dello studio di compatibilità sismica per i Piani di Assetto del Territorio comunali e intercomunali (PAT e PATI) – D.G.R. n. 3308/2008 Regione Veneto.

montmorillonitiche sono sicuramente presenti negli orizzonti di accumulo illuviale dei suoli, estesi in profondità fino a 1 -1,5 metri, ma fino alle profondità investigate (6 – 15 metri) le intercalazioni limo argillose sono molto rare e sottili e conseguentemente il potenziale fenomeno si può considerare poco rilevante.

L'avvio dell'ordinamento recente riguardante il rischio sismico può essere collocato dall'introduzione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 "*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica...*", che ha suddiviso il territorio nazionale in 4 zone sismiche, collocando Castiglione d'Adda e l'intero lodigiano alla n. 4 di bassissima sismicità, caratterizzata nominalmente da una accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A ($V_s > 800$ m/s) indicata come " a_g ", che presenta il valore di $0,05 g$, dove g = accelerazione di gravità = $9,81$ m/s².

Il successivo DM 14 gennaio 2008 "*Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*", ha modificato il criterio di attribuzione dell'azione sismica di riferimento da adottare per la progettazione " a_g ", sostituendo le "zone" nelle quali ricade ciascun comune, con una mappa contenente i nodi di una rete nazionale di valori di pericolosità sismica, riportati in valori tabellari riferiti nell'allegato stesso e disponibili come "*Mappe interattive di pericolosità sismica*" sul sito <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>. Come nel caso delle "zone" il valore è espresso in termini di accelerazioni previste su suolo rigido di categoria A ($V_s > 800$ m/s) in unità g .

Le zone sismiche restano comunque in vigore per la normativa regionale associata che regola le procedure progettuali e urbanistiche e con l'entrata in vigore della D.G.R. 11 luglio 2014, n.2129 "*Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia*", Castiglione d'Adda e l'intero territorio lodigiano sono stati collocati nella "zona sismica 3", che prevede principalmente la verifica dell'amplificazione sismica con una procedura detta di secondo livello di approfondimento, da realizzare in tutte le aree urbanizzate e urbanizzabili a prescindere dal tipo di insediamento previsto. Tale verifica, realizzata elaborando i dati disponibili, è riportata nel

Le *mappe interattive* dell'INGV sono state successivamente confermate dalle NTC 2018 (DM 17 gennaio 2018), che per quanto di interesse per la presente indagine, ha apportato modifiche alle categorie di sottosuolo di cui alla Tabella 3.2. Il "*Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato*" ed ai criteri per "*esclusione della verifica a liquefazione*" (§ 7.11.3.4.2).

L'accelerazione orizzontale massima del suolo a_g , come definita dall'OPCM 3519/2006, è quella che in ambito internazionale è chiamata PGA (Peak Ground Acceleration) ed è una funzione probabilistica associata a soglie di eccedenza e valori di incertezza, quindi non più un unico numero ma un insieme di valori.

Il valore di riferimento impiegato per le costruzioni ordinarie è quello delle probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni equivalente a un tempo di ritorno di 475 anni, corrispondente allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) nel DM 17 gennaio 2018.

Tale condizione riferita al territorio in esame mostra $0,075 < a_g < 0,100$ (Figura 46), e più specificamente $a_g = 0,0762$ per il nodo comprendente Bertonico e Castiglione d'Adda.

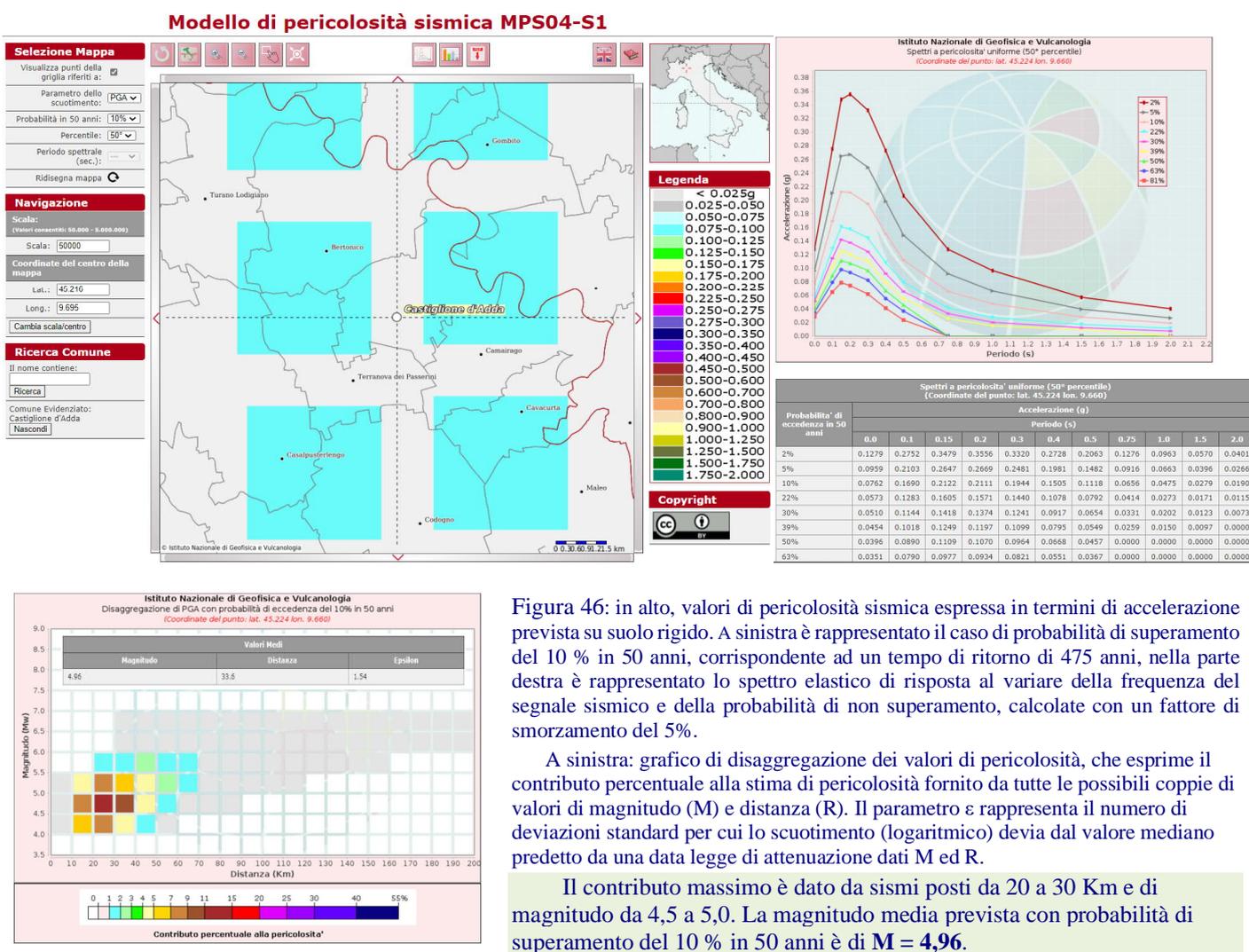


Figura 46: in alto, valori di pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione prevista su suolo rigido. A sinistra è rappresentato il caso di probabilità di superamento del 10% in 50 anni, corrispondente ad un tempo di ritorno di 475 anni, nella parte destra è rappresentato lo spettro elastico di risposta al variare della frequenza del segnale sismico e della probabilità di non superamento, calcolate con un fattore di smorzamento del 5%.

A sinistra: grafico di disaggregazione dei valori di pericolosità, che esprime il contributo percentuale alla stima di pericolosità fornito da tutte le possibili coppie di valori di magnitudo (M) e distanza (R). Il parametro ϵ rappresenta il numero di deviazioni standard per cui lo scuotimento (logaritmico) devia dal valore mediano predetto da una data legge di attenuazione dati M ed R.

Il contributo massimo è dato da sismi posti da 20 a 30 Km e di magnitudo da 4,5 a 5,0. La magnitudo media prevista con probabilità di superamento del 10% in 50 anni è di $M = 4,96$.

Si denota che la pericolosità sismica in questa più recente elaborazione è incrementata di circa il 44% rispetto a quella prevista dalle precedenti "zone", e di tale valore si dovrà tenere conto sia nei calcoli strutturali sia nelle valutazioni concernenti la stabilità dei terreni (in particolare riguardanti i rischi di addensamenti e di liquefazione e di stabilità delle scarpate).

10.2 CENNI SULLA SISMOLOGIA DEL TERRITORIO

L'assetto strutturale della pianura centro lodigiana è stato descritto nel § 3, che descrive una sezione passante circa 8 km ad est di Castiglione d'Adda, mostra piegamenti e le faglie inverse che coinvolgono le porzioni più esterne dell'Arco Emiliano, in particolare le sequenze mioceniche e plioceniche, che presentano tuttora un'apprezzabile attività.

Sull'attività di tali strutture l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha recentemente reso disponibile sul web il Database of Individual Seismogenic Sources

(DISS), "che contiene una gran quantità di materiale pubblicato e originale sulle principali sorgenti sismogenetiche italiane, oltre a dati geografici, sismologici, geologici e tettonici, ed è liberamente utilizzabile da chi sia interessato a queste informazioni." La versione 3 è disponibile all'indirizzo <http://legacy.ingv.it/DISS/>.



DISS 3: Seismogenic Source ITSA044 - Portalbera-Cremona			
Source Info Summary Explanatory Notes References			
Pictures: No pictures for this source			
General information			
Code	ITSA044		
Name	Portalbera-Cremona		
Compiled By	Burrato, P., and S. Mariano		
Latest Update	06/09/2007		
Parametric information			
Min Depth (km)	2	OD	Based on geological data from various authors.
Max Depth (km)	7	OD	Based on geological data from various authors.
Strike (deg)	30 - 115	OD	Based on geological data from various authors.
Dip (deg)	20 - 40	OD	Based on geological data from various authors.
Rake (deg)	80 - 100	EJ	Inferred from geological data.
Slip Rate (mm/y)	0.1 - 0.5	EJ	Derived from geological data concerning adjacent structures.
Magnitude (Mw)	5.5	EJ	Assumed from regional seismological data.
Q-keys: LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement			

Figura 47: sintesi delle informazioni sulla struttura sismogenetica prossima a Castiglione d'Adda, il cui bordo settentrionale passa circa 2,0 Km a sud del centro dell'abitato.

Gli autori individuano nell'area lodigiana-cremonese una struttura sismogenetica estesa da Portalbera, vicino a Stradella (Pv), a Cremona, che interessa una fascia di oltre 50 km di lunghezza e circa 10 di larghezza, comprendente tutto il fronte avanzato delle strutture appenniniche sepolte che si manifestano in superficie con il colle di San Colombano e i piccoli rilievi di Casalpusterlengo. A tale struttura, denominata ITSA044, è attribuita una velocità di scorrimento (slip rate) di 0,1 – 0,5 mm all'anno e la possibilità di generare terremoti di magnitudo Mw 5,5. Circa 16 km a nord del centro di Castiglione d'Adda gli autori riconoscono un'altra struttura denominata ITSA02 che presenta una velocità di scorrimento analoga, ma con capacità di generare terremoti di magnitudo Mw 5,9. La struttura comprende

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

una sorgente sismica localizzata appena a nord di Orzinuovi, ritenuta responsabile del terremoto del 1802 al quale è attribuita una magnitudine equivalente $M_e = 5,6$.

La storia sismica di Castiglione d'Adda non è nota direttamente perché i cataloghi macrosismici non comprendono dati provenienti da questa località, ma è definibile dalle informazioni storiche provenienti dai comuni di Lodi e di Codogno, riassunte nel catalogo DBMI04 dal quale sono tratte le informazioni seguenti:

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
F	1276	07	29	18	30		Monferrato	9	5	4.81
D	1348	01	25				Alpi Giulie	89	9	6.63
F	1383	07	24	20			Parma	2	4-5	3.93
S	1511	03	26	15	30		Friuli-Slovenia	120	9	6.32
4	1515	10	25	12	35		Pianura Padana	5		
S	1642	06	13				Pianura lombarda	8	6	4.92
S-6	1695	02	25	05	30		Asolano	107	10	6.40
4-5	1741	04	24	09	20		Fabrianese	135	9	6.17
S-6	1781	09	10	11	30		Pianura lombarda	11	6-7	4.93
S-6	1802	05	12	09	30		Valle dell'Oglio	94	8	5.60
4	1873	03	12	20	04		Appennino marchigiano	196	8	5.85
4	1873	06	29	03	58		Alpago Cansiglio	197	9-10	6.29
4-5	1884	09	12	07	23		Pianura lombarda	34	6	4.70
4-5	1887	02	23	05	21	5	Liguria occidentale	1511	9	6.27
4-5	1891	06	07	01	06	1	Valle d'Illasi	403	8-9	5.87
S-6	1894	11	27	05	07		Bresciano	183	6	4.89
S	1901	10	30	14	49	5	Garda occidentale	289	7-8	5.44
NF	1906	08	25	03	11		Parmense	31	5	4.25
NF	1907	04	25	04	52		Veronese	122	6	4.79
3	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
NF	1913	11	25	20	55		Appennino parmense	73	4-5	4.65
NF	1913	12	07	01	28		Valle Scrivia	56	5	4.57
4	1914	10	27	09	22		Lucchese	660	7	5.63
4-5	1918	01	13	12			Pianura lombarda	24	4	4.62
3	1918	04	24	14	21		Lecchese	34	6	4.95
4	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
3	1936	10	18	03	10		Alpago Cansiglio	269	9	6.06
2	1960	03	23	23	10		Vallesse	178	7	5.00
3	1961	11	23	01	12	0	Prealpi bergamasche	119	6-7	4.86
4	1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87
F	1976	05	06	20			Friuli	770	9-10	6.45
S	1979	02	09	14	44		Bergamasco	73	6	4.78
4-5	1980	12	23	12	01	0	Piacentino	69	6-7	4.57
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
4	2003	04	11	09	26	5	Valle Scrivia	78	6-7	4.81
4-5	2008	12	23	15	24	2	Parmense	291	6-7	5.36
3	2011	07	17	18	30	2	Pianura lombardo-veneta	73	5	4.79

Is = intensità macrosismica in scala MCS:

D= danneggiamento, comunemente > 6.

Io = intensità epicentrale in scala MCS

F = risentito (felt) $3 < I_s < 5$

NF = non avvertito, in presenza di segnalazione $I_s = 1$.

NC = non classificato

Mw = magnitudine momento nell'area epicentrale

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. *Catálogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
S	1802	05	12	09	30		Valle dell'Oglio	94	8	5.60
3	1891	06	07	01	06	1	Valle d'Illasi	403	8-9	5.87
NF	1906	08	25	03	11		Parmense	31	5	4.25
NF	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
4	1910	01	23	01	50		Piacentino	118	5	4.39
3-4	1912	10	01	18	10		Piacenza	23	4	3.70
NF	1919	06	29	15	06	1	Mugello	565	10	6.38
4-5	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
3	1929	04	19	04	16		Bolognese	82	6-7	5.13
3	1929	04	20	01	10		Bolognese	109	7	5.36
3	1936	10	18	03	10		Alpago Cansiglio	269	9	6.06
NF	1939	10	15	14	05		Garfagnana	62	6-7	4.96
6	1951	05	15	22	54		Lodigiano	179	6-7	5.17
2-3	1961	11	23	01	12	0	Prealpi bergamasche	119	6-7	4.86
3	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
3-4	1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87
5	1980	12	23	12	01	0	Piacentino	69	6-7	4.57
4	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1991	10	31	09	31	1	Emilia occidentale	134	5	4.33
2	2000	08	21	17	14		Monferrato	595	6	4.94
NF	2005	04	18	10	59	1	Valle del Trebbia	284	4	3.97

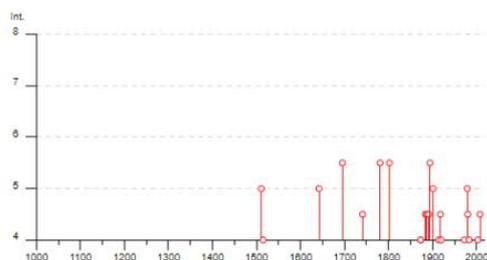


Figura 48: stalco del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 per gli abitati di Lodi e Codogno.

Il terremoto conosciuto di maggiore intensità con epicentro nel lodigiano, denominato LODIGIANO, è avvenuto il 15 maggio 1951 con epicentro circa 1,2 km a NE di Ossago (*Latitudine 45.254° Longitudine 9.550°* $I_o = 6-7$ $M_w = 5.24$) e 12,0 Km a NW di Castiglione d'Adda.

Si evidenzia che questo terremoto non fa parte della storia sismica di Lodi, mentre sono segnalati risentimenti con intensità macrosismica $I_s = 6$ nelle provincie confinanti,

e con intensità 5 per un vasto intorno, nel quadrilatero compreso tra Salò, Varese, Alessandria e Modena²⁴.

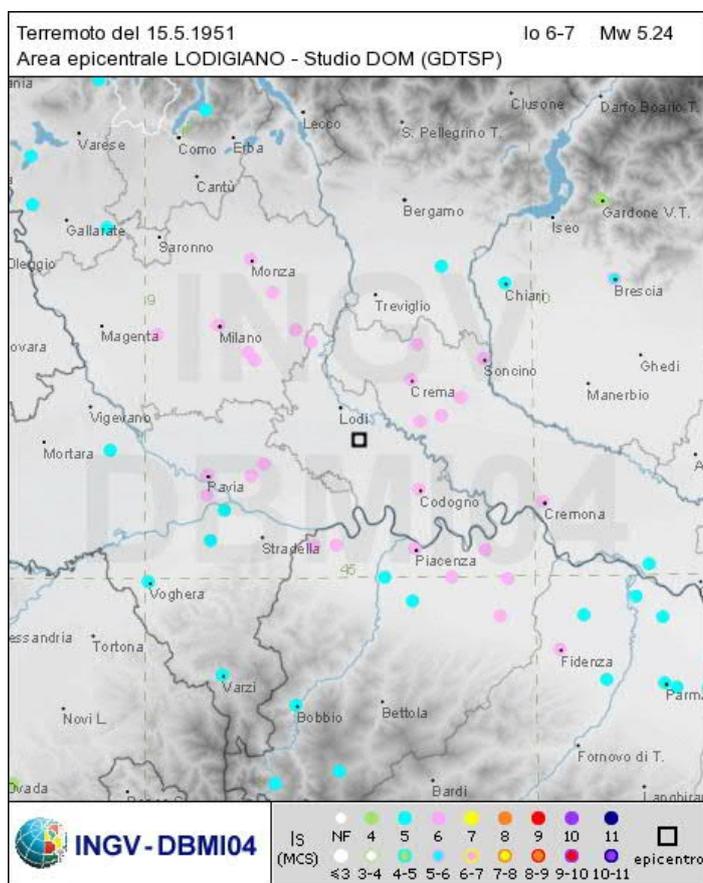


Figura 49: risentimenti sismici in occasione del terremoto “Lodigiano” del 1951.

La mancanza di riscontri per la città di Lodi e di buona parte del lodigiano è con ogni probabilità da attribuire all’assenza di un’adeguata organizzazione in grado di rilevare i dati, sia strumentali che macroscopici.

10.3 STIMA DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

La stima del RISCHIO DI LIQUEFAZIONE è stata elaborata mediante il metodo di Robertson e Wride²⁵ impiegando il software Cliq ver. 1.3.0.48 della GeoLogismiki Geotechnical Engineers realizzato in collaborazione con l’autore del metodo.

²⁴ Nella scala MCS (Mercalli, Cancani, Sieberg): **5 grado** = Scossa forte, percepita praticamente da tutti. Di notte molte persone vengono svegliate. Oggetti instabili rovesciati. Rovesciamento di liquidi in recipienti. Oscillazioni di porte che si aprono e si chiudono... **6 grado** = Scossa molto forte, percepita da tutti con spavento e fuga all’esterno. Barcollare di persone. Rottura di vetrine, piatti, vetrerie. Caduta dagli scaffali di soprammobili e libri e di quadri dalle pareti...

²⁵ Robertson, P.K., Wride (Fear), C.E. (1997). “Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT”. Final contribution to the Proc. NCEER Workshop on Liquefaction, salt Lake City, USA.

Robertson, P.K. and Wride, C.E., (1998). *Cyclic Liquefaction and its Evaluation based on the CPT* Canadian Geotechnical Journal, 1998, Vol. 35, August.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H., *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833.

Per la verifica sono stati impiegati i dati dei profili più rappresentativi per tale aspetto (CPT 12, 16 e 25), introducendo per la magnitudo il valore di $M = 5,2$ in base alle considerazioni riferite in Figura 46 e per l'accelerazione massima al suolo $a_{max}=0,12$ g, considerando $a_g = 0,078$ g come indicato nel § 10.1, e come fattore di amplificazione stratigrafica $S_s = 1,5$ ipotizzando un sottosuolo di categoria C (tabella 3.2.V NTC 2018).

L'esito dell'elaborazione dimostra l'assenza di rischio di liquefazione per le verticali indagate, e in considerazione del criterio cautelativo impiegato, tale giudizio può essere esteso a tutto il territorio abitato e le aree di nuova espansione.

Non è possibile esprimere la medesima valutazione su tutto il territorio comunale, che comprende aree distanti alcuni chilometri dalle prove eseguite, ma si sottolinea che anche le prove CPT realizzate nei comuni limitrofi presentano valori simili, e l'elaborazione analogamente porta ad escludere il rischio di liquefazione con i parametri del terremoto sopra citato.

Di seguito si riferiscono le principali elaborazioni ottenute, dove l'assenza di rischio del fenomeno è espresso dalla posizione dei punti derivati dalle misure CPT nel diagramma $CSR^* / Q_{tiN,cs}$ ed in particolare dalla distanza dalla linea di separazione con l'area di liquefazione.

Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, *Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT*, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180

Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2004, *Estimating Liquefaction Induced Lateral Displacements using the SPT and CPT*, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, 861-871.

Robertson, P.K., 2009, *Performance based earthquake design using the CPT*. Keynote lecture, IS-Tokyo.



Comune di Castiglione d'Adda
 componente geologica PGT
 verifica liquefazione con sisma di progetto

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

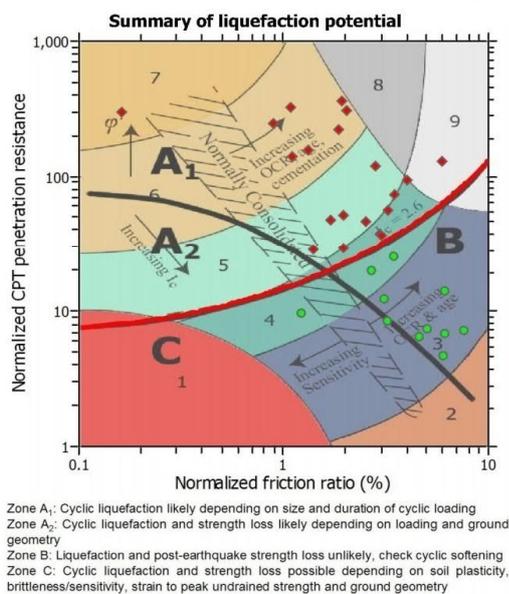
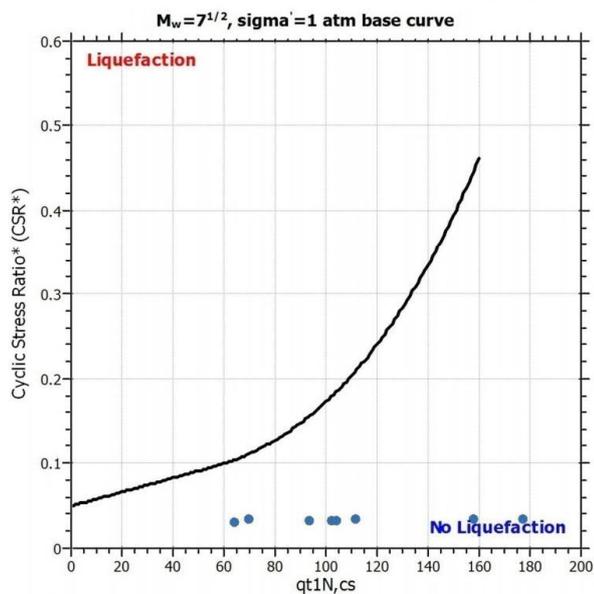
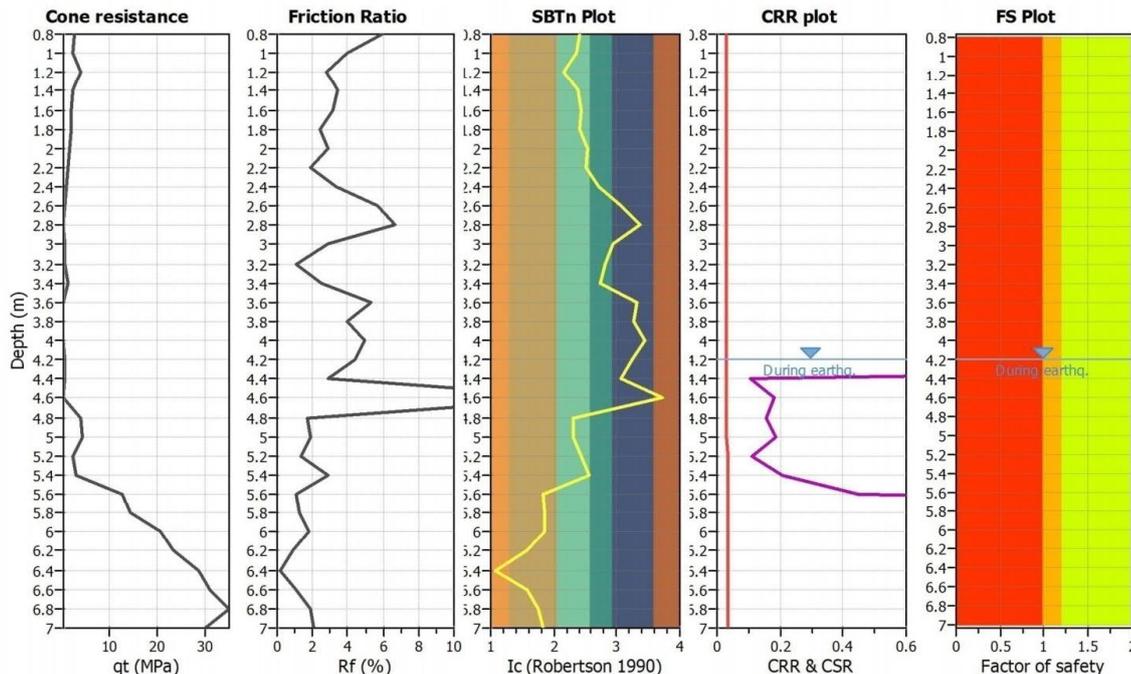
Project title :

Location :

CPT file : CPT-16

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER 1998	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	No
Fines correction method:	Robertson & Wride	G.W.T. (earthq.):	4.20 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	1	Fill weight:	N/A	Limit depth:	N/A
Earthquake magnitude M_w :	5.20	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes		
Peak ground acceleration:	0.12	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		





Comune di Castiglione d'Adda
 componente geologica PGT
 verifica liquefazione con sisma di progetto

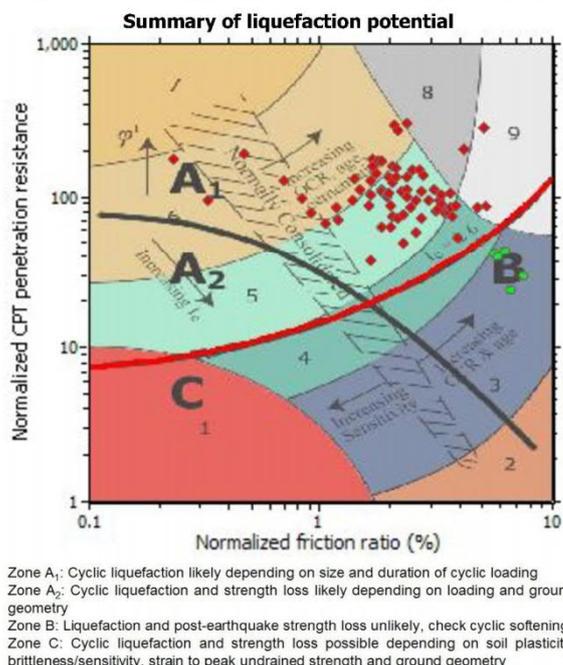
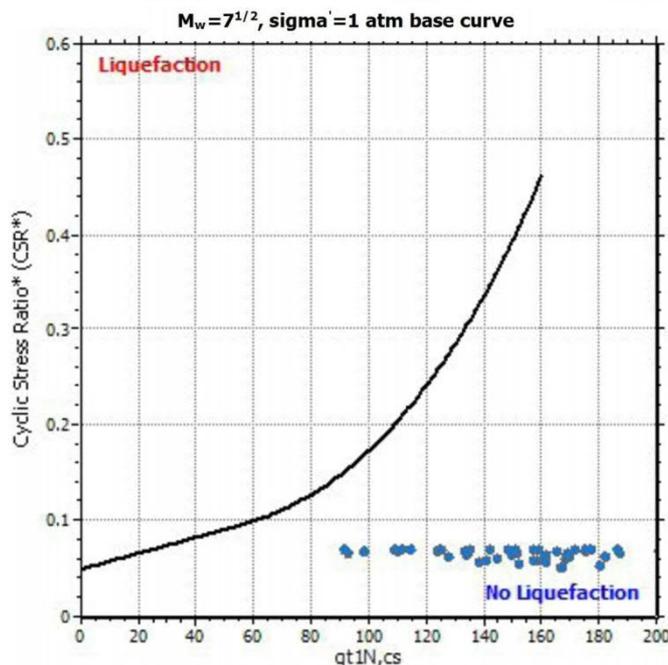
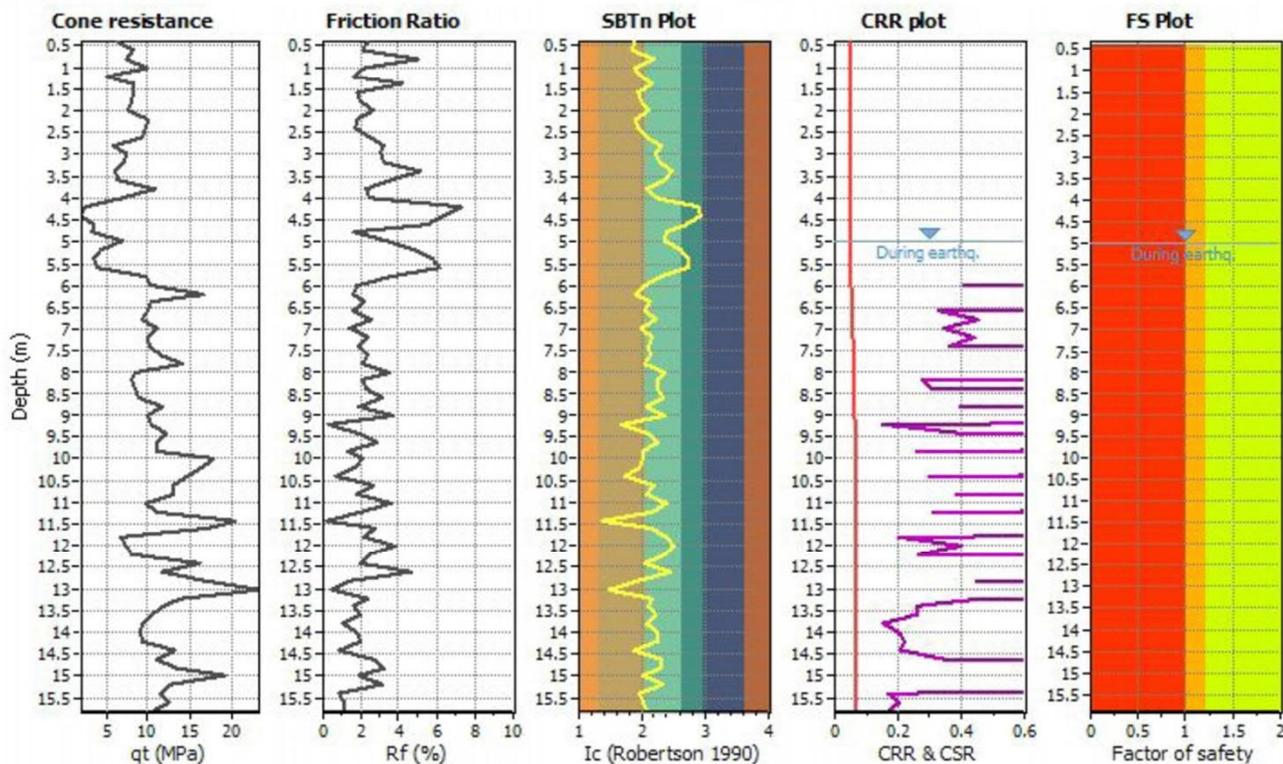
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

Project title : **Location :**

CPT file : CPT-25

Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER 1998	G.W.T. (in-situ):	4.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson & Wride	G.W.T. (earthq.):	5.00 m	Fill height:	N/A	applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	1	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude M_w :	5.20	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.20	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_c applied:	Yes		



11 Esecuzione delle prove MASW-Re.Mi e H/V

La prova indicata come MASW - ReMi 1, è stata eseguita in corrispondenza del limite orientale della prevista AT 5 a sud dell'intersezione della SP ex SS 591, allo scopo di fornire dati immediatamente utili per la verifica di vulnerabilità sismica degli edifici sia per l'area di espansione urbanistica sia per la porzione a sud est dell'abitato, potendosi estendere l'esito della misure per alcune centinaia di metri intorno alla stessa, come confermato anche dall'uniformità osservata con le tre indagini eseguite

L'acquisizione MASW ha comportato la posa di 15 geofoni lungo un allineamento NNE SSW con spaziatura di 5 metri e la registrazione ha avuto la durata di 1 secondo, con passo di campionamento di 0.25 ms. L'energizzazione è stata realizzata a distanze di 5 e 10 metri dal primo geofono impiegando una massa battente di 10 Kg. Il centro della misura ha coordinate nel sistema WGS 84 di 554870 m est e 5007016 m nord.

L'acquisizione con tecnica Re.Mi, che è una tecnica "passiva" basata sulla registrazione del rumore sismico indotto dalle attività antropiche (traffico, fabbriche ecc.), non richiede energizzazione artificiale ed è stata realizzata impiegando la stesa completa dei 15 geofoni, raccogliendo oltre 15 records di 30 secondi di lunghezza, con passo di campionamento di 2ms.



Figura 50: stesa del cavo multipolare e dei geofoni vista da nord. In basso a destra la schermata di acquisizione delle prove MASW 1 e Re.Mi. 1 e lo strumento di registrazione delle misure H/V (Tromino Engy ©).

Le prove H/V 1 e 2 sono state realizzate all'inizio e circa al centro dello stendimento Masw-Remi 1 e hanno comportato l'acquisizione dei dati di rumore sismico con un tromografo digitale della ditta Micromed S.r.L modello "Tromino ENGY". Lo strumento racchiude al suo interno 3 terne di sensori ortogonali tra loro (due di velocimetri e la terza di accelerometri) orientate sul piano orizzontale e sul piano verticale e con banda di lavoro tipica nell'intervallo di frequenze compreso tra 0.1 e 256 Hz. Tutte le registrazioni effettuate per il PGT hanno avuto una lunghezza di 20 minuti con un campionamento a 128 Hz, generalmente ritenuta la più indicata per la tipologia di indagine.

La MASW - Re.Mi 2 è stata effettuata in corrispondenza del limite occidentale dell'AT 3 e anche in questo caso l'elaborato fornisce dati immediatamente utili per la verifica di vulnerabilità sismica degli edifici di tutta l'area industriale e per la piazzola ecologica. Il centro della misura ha coordinate nel sistema WGS 84 di 553849 m est e 5006711 m nord.

L'acquisizione della MASW 2 ha comportato la posa di 14 geofoni lungo un allineamento ENE WSW spazati 5 metri. La registrazione, come nel caso precedente, ha avuto la durata di 1 secondo con passo di campionamento di 0.25 ms e l'energizzazione è stata realizzata a distanze di 5 e 10 metri dal primo geofono impiegando una massa battente di 10 Kg.



Figura 51: stesa del cavo multipolare e dei geofoni della prova MASW e Re.Mi. 2 visti da sud ovest. In basso il Sismografo "Geode" collegato al pc e a destra lo strumento di registrazione delle misure H/V (Tromino Engy ©) nella posizione 3.

L'acquisizione con tecnica Re.Mi è stata realizzata impiegando l'intera stesa di 14 geofoni, raccogliendo oltre 15 records di 30 secondi di lunghezza, con passo di campionamento di 2ms.

Le prove H/V 3 e 4 sono state realizzate in prossimità dell'inizio dello stendimento Masw-Remi 2 mediante il già citato tromografo digitale "Tromino ENGY", acquisendo i dati per 20 minuti con un campionamento a 128 Hz.

La MASW - Re.Mi 3 è stata invece effettuata parallelamente al lato nord della palestra delle scuole medie ed è pienamente utilizzabile per le verifiche del comportamento sismico l'edificio scolastico. Il centro della misura ha coordinate nel sistema WGS 84 di 554120 m est e 5007377 m nord.

L'acquisizione della MASW 3 ha comportato la posa di 13 geofoni lungo un allineamento da est verso ovest, spazati 5 metri. La registrazione, come nei casi precedenti, ha avuto la durata di 1 secondo con passo di campionamento di 0.25 ms e l'energizzazione è stata realizzata a distanze di 5 e 10 metri dal primo geofono impiegando una massa battente di 10 Kg.



Figura 52: stesa del cavo multipolare e dei geofoni della prova MASW e Re.Mi. 3 visti da est.

L'acquisizione con tecnica Re.Mi è stata realizzata impiegando l'intera stesa di 13 geofoni, raccogliendo oltre 15 records di 30 secondi di lunghezza, con passo di campionamento di 2ms.

Le prove H/V 5 e 6 sono state realizzate al centro dello stendimento Masw-Remi 3 e alla distanza di 80 metri a WSW mediante il già citato tromografo digitale "Tromino ENGY", acquisendo i dati per 20 minuti con un campionamento a 128 Hz.

11.1 DESCRIZIONE DELLE METODOLOGIE GEOFISICHE IMPIEGATE

11.1.1 Tecniche MASW-ReMi

L'indagine, come detto, è stata eseguita realizzando sulle stese sismiche acquisizioni dei segnali con tecniche differenti, MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) e Re.Mi (*Refraction Microtremor*). Difficilmente, prima di realizzare l'indagine, è possibile valutare qual è la tecnica che potrà fornire i risultati migliori, quindi in campagna si procede con la realizzazione di entrambe le tecniche e solo in fase di elaborazione si valuta e si confronta la qualità dei dati acquisiti, eventualmente "combinando" gli spettri di velocità di fase ottenuti con le 2 tecniche in modo da utilizzare i risultati migliori per intervalli prescelti di frequenza.

La metodologia Re.Mi è una tecnica "passiva" che si basa sulla registrazione del rumore sismico indotto dalle attività antropiche (traffico stradale, ferroviario, fabbriche e quello in genere sempre presente in aree urbanizzate), ed è quindi adatta ad ambienti cittadini consentendo inoltre elevate profondità di indagine.

La tecnica capovolge il concetto comune del parametro "segnale-disturbo", per il quale tradizionalmente il segnale può essere meglio rilevato in assenza o scarsità di rumore, tanto che in ambiente urbano le tradizionali rilevazioni sismiche hanno sempre trovato difficile applicazione. Con questa tecnica, al contrario, il disturbo, il "noise" ambientale, diventa il segnale impiegato per la caratterizzazione sismica e i microtremori sono la sorgente di energia utile allo scopo.

I limiti di tale prova sono l'impossibile applicazione in ambienti poco "rumorosi" e il rischio di sovrastimare i valori di Vs in presenza di rumore fortemente direzionale, non ortogonale allo stendimento sismico.

La metodologia MASW è una tecnica "attiva" basata sulla registrazione del segnale sismico indotto da una massa battente o da una piccola carica. I pregi sono la buona capacità di definizione dei valori di Vs, soprattutto per gli orizzonti più superficiali (primi 20-30m), mentre i limiti sono dati dal non essere adatta in ambienti rumorosi e di avere limitate profondità di indagine in presenza di terreni con basse velocità.

Per la descrizione dei principi fisici e dei metodi di elaborazione si fa rimando alla letteratura specialistica ampiamente sviluppata in questi anni.

Per la tecnica Re.Mi si citano le procedure proposte da J.N.Louie del Seismological Laboratory and Dept. of Geological Sciences dell'Università del Nevada, basate su due aspetti fondamentali: la disponibilità di strumenti in grado di registrare onde di superficie con frequenze fino a 2 Hz per intervalli di tempo sufficientemente lunghi (30 sec) e la possibilità mediante una trasformata di Fourier bidimensionale (p-f) (slowness-frequency; $p = dt/dx$ inverso della velocità apparente) su un rumore di fondo (microtremore), di

separare le onde di Rayleigh (onde di superficie) da altri tipi di onde che compongono il sismogramma, rendendo possibile la distinzione delle vere velocità di fase dalle velocità apparenti.

Con il metodo MASW il profilo delle onde di taglio verticali V_s è ottenuto considerando che il contributo predominante alle onde superficiali generate artificialmente è dato da quelle di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive e le onde di alta frequenza si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla tale porzione del suolo, mentre quelle a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi forniscono informazioni migliori su questi ultimi.

Le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate lungo uno stendimento lineare di sensori. Il metodo consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5 Hz e 70 Hz che dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, i primi 20 - 30 m in funzione della rigidità del suolo. L'elaborazione prevede tre fasi di lavoro:

1. *la prima prevede il calcolo dello spettro di velocità di fase (o curva di dispersione) apparente relativo ai sismogrammi registrati,*
2. *la seconda fase consiste nell'estrappolare dallo spettro di velocità, la curva di dispersione sperimentale,*
3. *la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_s e di compressione V_p (o in maniera alternativa alle velocità V_p è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione teorica corrispondente al modello di suolo assegnato.*

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio possono essere individuati con procedura manuale o automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa sulla base dei dati stratigrafici disponibili e si variano lo spessore h e la velocità V_s degli strati.

Nella procedura manuale si opera per tentativi assegnando diversi valori delle velocità V_s e degli spessori h , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale, in quella automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo tra curva sperimentale e curva numerica è compresa inferiore al 10%, l'accordo è giudicato soddisfacente e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , che determina la categoria di sottosuolo sismico, rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

La strumentazione impiegata in entrambi i casi è stato il "Geode", un sismografo modulare a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale – 105 dB istantanei a 2 msec di campionamento). L'ampia banda d'ingresso (1.75 Hz – 20 kHz, con velocità di campionamento da 0.02 msec a 16 msec), consente allo strumento di essere utilizzabile per varie applicazioni: sismica a rifrazione, sismica a riflessione (anche ad

altissima risoluzione), monitoraggio di vibrazioni, applicazioni sismologiche, downhole e VSP. In acquisizione sono disponibili tutte le funzioni di filtri, pre-amplificazione, line-test e instrument-test, tipiche dei sistemi di registrazioni evoluti.

L'attrezzatura utilizzata è composta da:

- Sismografo modulare Geode 3-1000+ canali,
- Massa battente da 10 Kg,
- Piastra di battuta in alluminio 15x15x2,5cm,
- Batteria ricaricabile 12 V,
- Cavo per sismica a rifrazione stranded, 130 mt con 24 takeouts SPT-21 a 5 metri di intervallo e due code da 7.5 mt l'una terminate con connettore Bendix 61S,
- Geofoni GS20DX, 4.5 Hz verticali, 395 Ohm con puntale da 3" ed 1,5 mt di cavo terminato con mueller clip singola MC-20-SP,
- Computer portatile.

Il software utilizzato per l'elaborazione è il "winMASW" versione Academy della Eliosoft. L'approccio utilizzato non prevede la determinazione di curve di dispersione modali (scelta soggettiva), ma l'analisi di diretta di tutto lo spettro di velocità (approccio FVS Full Velocity Spectrum).

In questo caso è stato ricavato lo spettro velocità di fase-frequenza relativo alle acquisizioni passive, che ha consentito di definire con maggior dettaglio le basse frequenze. In seguito, sono stati "combinati" gli spettri derivati dalle prove "Masw" e da quelle "ReMi" in modo da ottenere uno spettro di velocità "congiunto".

11.1.2 Misure H/V - Cenni sul metodo

Il metodo dei rapporti spettrali di singola stazione (HVSr) è largamente utilizzato in paesi con elevato rischio sismico quali il Giappone per la stima degli effetti di amplificazione di sito.

Il microtremore, un'impercettibile oscillazione naturale del suolo, è presente in qualsiasi punto della superficie terrestre e consiste per lo più nelle onde sismiche prodotte dal vento e dal moto ondoso marino negli strati superficiali della Terra. Anche le attività umane (industrie, traffico stradale ecc.) producono localmente microtremore, ma in genere tale segnale viene attenuato piuttosto rapidamente a causa delle sue caratteristiche di alta frequenza.

Il microtremore agisce da oscillatore naturale e quindi permette, tramite adeguata strumentazione, la misura diretta delle frequenze di vibrazione dei terreni e dei manufatti.

La tecnica utilizzata, proposta da Nakamura (Nakamura, Y., 1989. *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. QR of RTRI, Vol. 30, No.1, 25-33) per lo studio delle amplificazioni di sito assume che i microtremori consistano principalmente di onde di Rayleigh che si propagano in un singolo strato sofficie su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Le ipotesi su cui si basa la tecnica di Nakamura sono le seguenti:

- *i microtremori sono generati da sorgenti superficiali, e non da sorgenti profonde i cui contributi sono trascurabili;*
- *le sorgenti dei microtremori in superficie non influenzano i microtremori alla base dello strato considerato;*
- *la componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione locale.*

Il picco visibile nei rapporti H/V (rapporto tra l'ampiezza spettrale della componente orizzontale e l'ampiezza spettrale della componente verticale) è indipendente dalle caratteristiche della sorgente del rumore ed è invece fortemente dipendente dalle condizioni stratigrafico-litologiche del terreno. Tale picco è inoltre ben correlato con la

frequenza fondamentale di vibrazione del terreno soggetto alla propagazione di onde S verticali e con il picco fondamentale delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

Le principali applicazioni delle prove H/V si possono così sintetizzare:

- ✓ *Misura delle frequenze di risonanza dei suoli;*
- ✓ *Effetti di sito e microzonazione sismica (curve H/V, metodo di Nakamura);*
- ✓ *Stratigrafia sismica passiva;*
- ✓ *Vs30 da fit vincolato della curva H/V;*
- ✓ *Segnalazione dei possibili fenomeni di doppia risonanza suolo-struttura.*

Di particolare importanza è la frequenza di vibrazione del sito, caratterizzata dal maggiore rapporto di ampiezze H/V, nell'intervallo di frequenze d'interesse ingegneristico (frequenze generalmente inferiori a 15 Hz), denominata frequenza fondamentale di vibrazione f_0 .

È possibile poi determinare la profondità degli strati sismici mediante la misura diretta delle frequenze di vibrazione, associata alla misura delle velocità delle onde S tramite la relazione: $f_0 = V_s/4H$ dove V_s è la velocità media delle onde di taglio, e H è la profondità della discontinuità sismo-stratigrafica.

A causa della consistente non-univocità della soluzione, una modellazione del solo HVSR, in mancanza di un solido ancoraggio stratigrafico e senza quantitative informazioni sulle V_s ottenute da misure Masw / Esac-ReMi. o da altri metodi da prove in foro (Cross-Hole, Down-Hole), non risulta affidabile per la determinazione del profilo di velocità delle onde S e quindi della valutazione della Vs30.

Strumentazione utilizzata e modalità di acquisizione

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromografo digitale della ditta Micromed S.r.L modello "Tromino ENGY", le cui caratteristiche sono state descritte in precedenza.

Elaborazione ed analisi dei dati

Per l'elaborazione dei dati sismici è stato utilizzato il software "Grilla" che consente di effettuare:

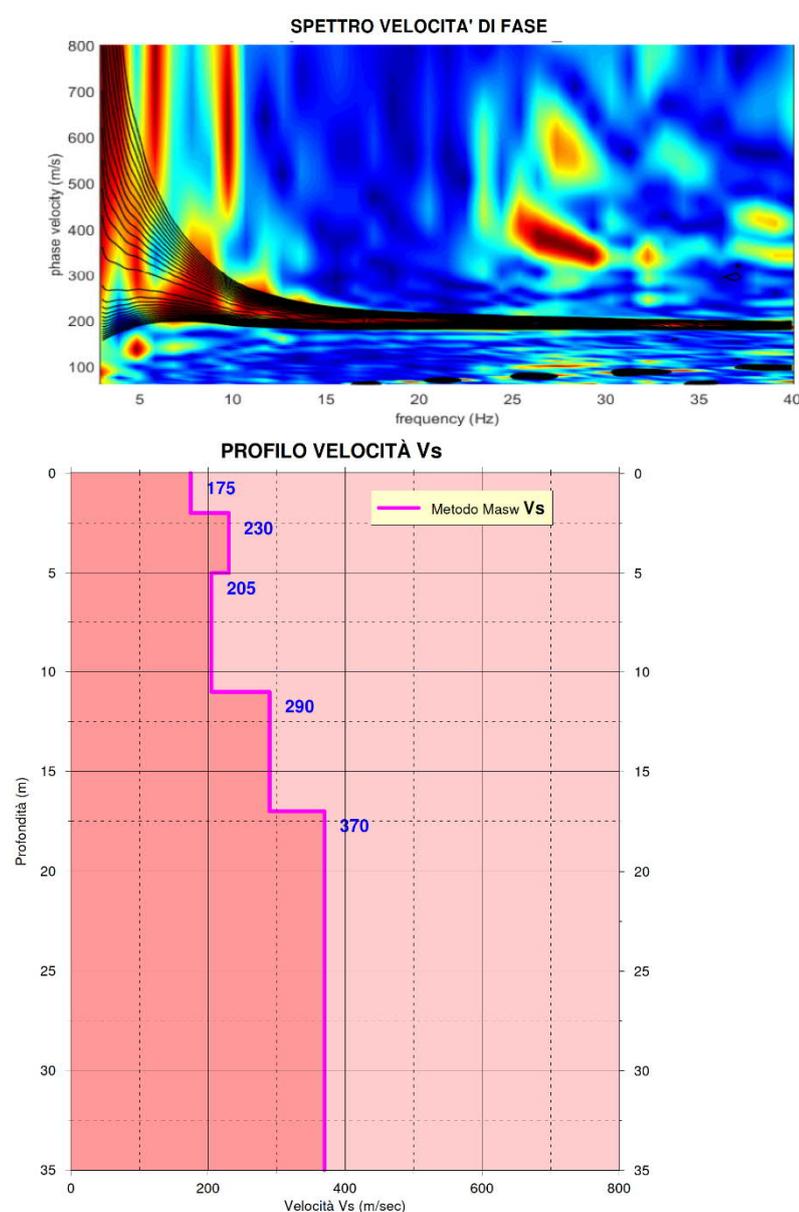
- Analisi spettrale completa delle tracce, calcolo delle curve H/V per la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo;
- Procedure di pulizia delle tracce nel dominio del tempo e delle frequenze;
- Test sulla significatività dei picchi secondo le linee guida europee (Criteri Sesame);
- Determinazione delle frequenze dei modi di vibrare delle strutture con rimozione dell'effetto di sottosuolo.

11.2 ESITO DELLE PROVE MASW-RE.MI. E HVSR

MASW - Re.Mi 1 (AT 5)

La Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. riporta l'elaborazione degli spettri velocità di fase-frequenza relativa e lo spettro congiunto. In questo caso però l'interpretazione è stata prodotta in prevalenza dall'elaborazione della prova MASW che è apparsa la più affidabile e chiara.

La tabella riporta gli spessori e i rispettivi valori di V_s , alla quale è unita la tabella che riferisce il valore assunto dal parametro $V_{s,30}$ ($V_{s,eq}$) al variare della profondità delle fondazioni, come richiesto dal § 3.2.2. delle NTC 2018.



MASW - Re.Mi 1A (AT 5)		
spessore (m)	profondità (m)	V_s m/s
2.0	2.0	175
3.0	5.0	230
6.0	11.0	205
6.0	17.0	290
18.0	35.0	370

Quota piano di fondazione	Intervallo dal p.c. (m)	$V_{s,eq}$ (m/s)	Categoria di sottosuolo
0 m	0/-30	276	C
-1 m	-1/-31	283	C
-2 m	-2/-32	292	C
-3 m	-3/-33	296	C

Figura 53: rappresentazione del profilo di V_s per la prova MASW - Re-Mi 1 e tabelle dei dati.

MASW - Re.Mi 2 (AT 3)

La Figura 54 riporta l'elaborazione degli spettri velocità di fase-frequenza relativa e lo spettro congiunto. Anche in questo caso però l'interpretazione è stata prodotta in prevalenza dall'elaborazione della prova MASW che è apparsa la più affidabile e chiara.

La tabella riporta gli spessori e i rispettivi valori di V_s , alla quale è unita la tabella che riferisce il valore assunto dal parametro $V_{s,30}$ ($V_{s,eq}$) al variare della profondità delle fondazioni, come richiesto dal § 3.2.2. delle NTC 2018.

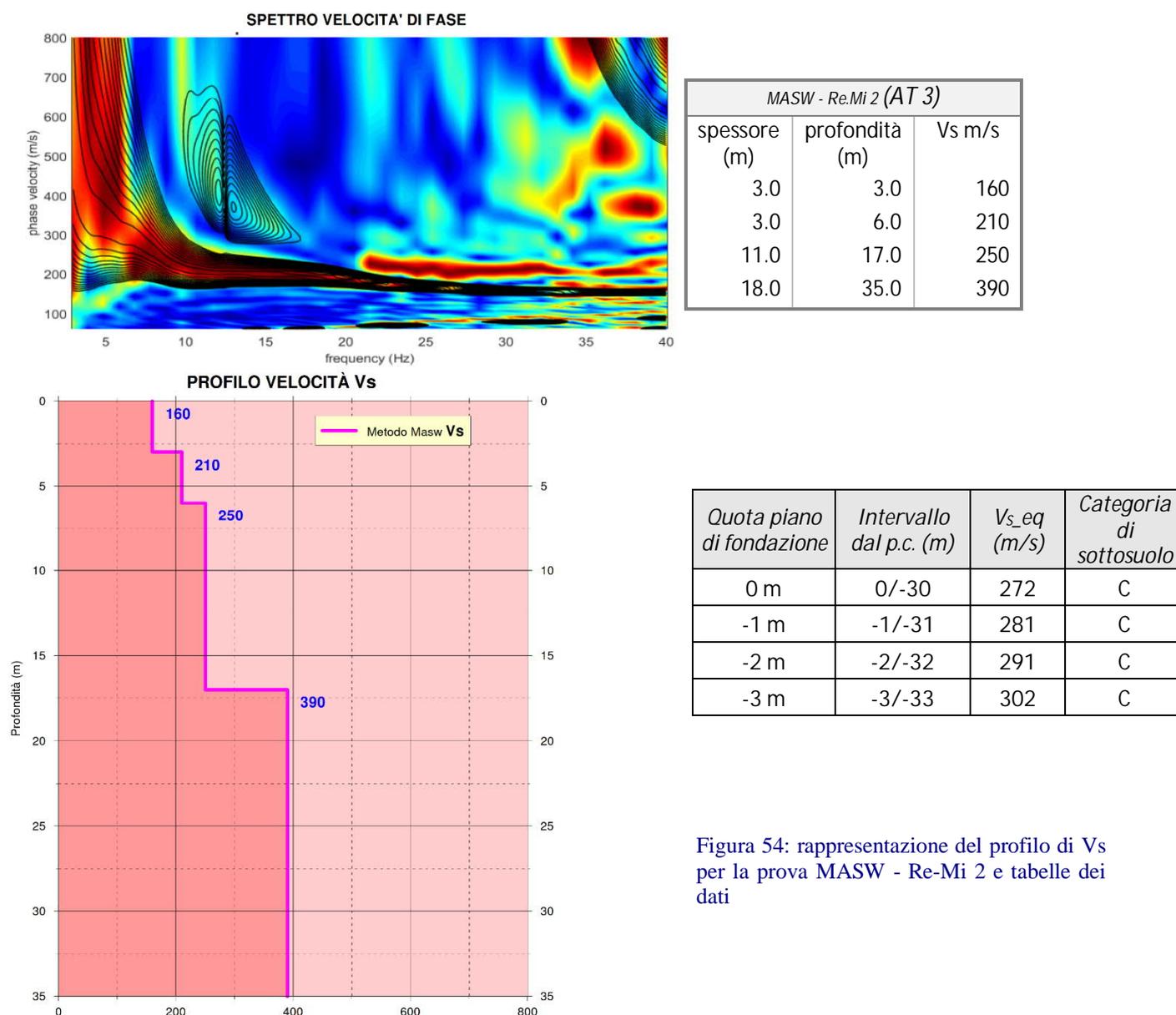


Figura 54: rappresentazione del profilo di V_s per la prova MASW - Re-Mi 2 e tabelle dei dati

MASW - Re.Mi 3 (scuole medie)

La Figura 55 riporta l'elaborazione degli spettri velocità di fase-frequenza relativa e lo spettro congiunto. Anche in questo caso però l'interpretazione è stata prodotta in prevalenza dall'elaborazione della prova MASW che è apparsa la più affidabile e chiara.

La tabella riporta gli spessori e i rispettivi valori di Vs, alla quale è unita la tabella che riferisce il valore assunto dal parametro $V_{s,30}$ ($V_{s,eq}$) al variare della profondità delle fondazioni, come richiesto dal § 3.2.2. delle NTC 2018.

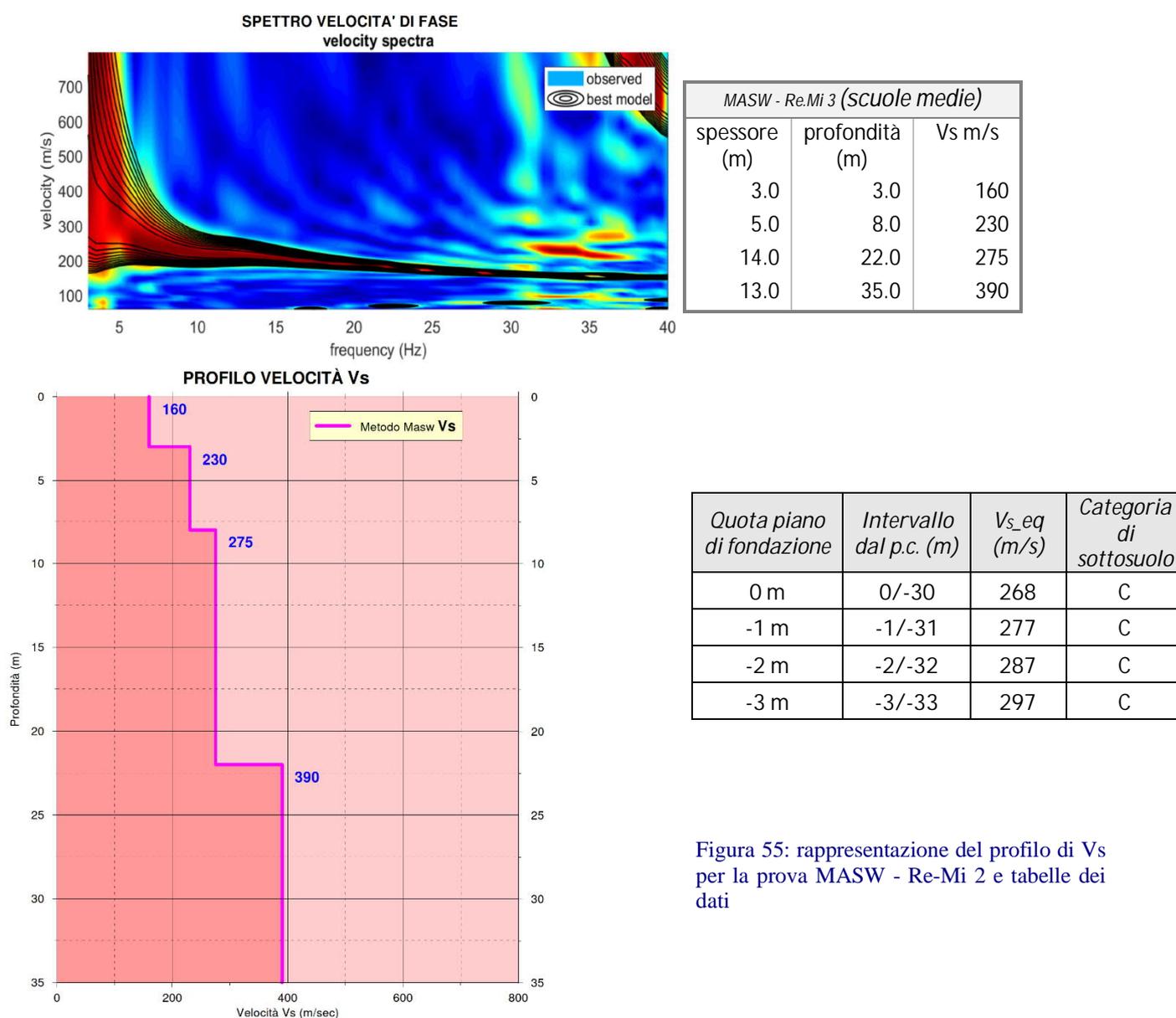


Figura 55: rappresentazione del profilo di Vs per la prova MASW - Re-Mi 2 e tabelle dei dati

I terreni sotto le quote di fondazione si collocano quindi nella zona centrale nella categoria C di sottosuolo: "Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente

consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalenti compresi tra 180 m/s e 360 m/s ”.

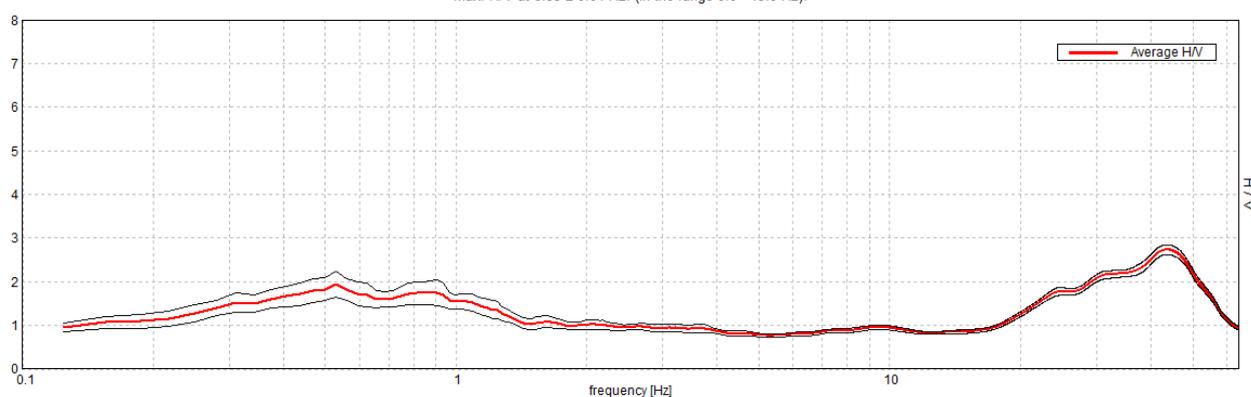
Di seguito si riporta l'esito delle prove HVSR di verifica della frequenza caratteristica di risonanza del sito.

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 1 (AT 3)

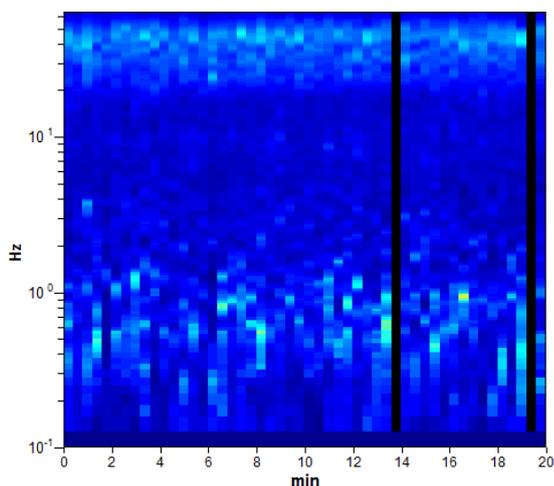
Strumento: TEP-0122/01-10
 Formato dati: 16 byte
 Inizio registrazione: 28/05/21 07:37:07 Fine registrazione: 28/05/21 07:57:07
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 96% tracciato (selezione manuale)
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Lunghezza finestre: 24 s
 Tipo di lisciamento: Triangular window
 Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

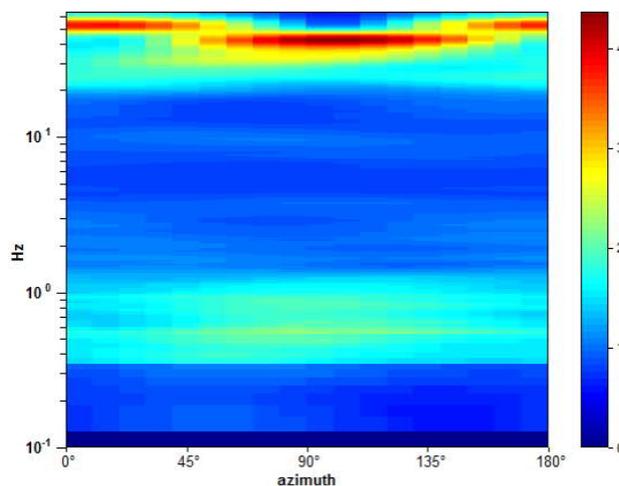
Max. H/V at 0.53 ± 0.04 Hz. (In the range 0.0 - 15.0 Hz).



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.53 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 \geq 10 / L_w$	0.53 > 0.42	OK	
$n_s(f_0) > 200$	612.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 26	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	0.125 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	1.94 > 2		NO
$f_{picco}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$[0.07641] < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.04059 < 0.07969$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2883 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w \cdot n_w \cdot f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{HV}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{HV}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logHV}(f)$	deviazione standard della funzione log $A_{HV}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Intervallo di freq. [Hz]	Valori di soglia per σ e $\sigma_A(f_0)$				
	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{logHV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 2

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 28/05/21 08:01:41 Fine registrazione: 28/05/21 08:17:43

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Durata registrazione: 0h16'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.

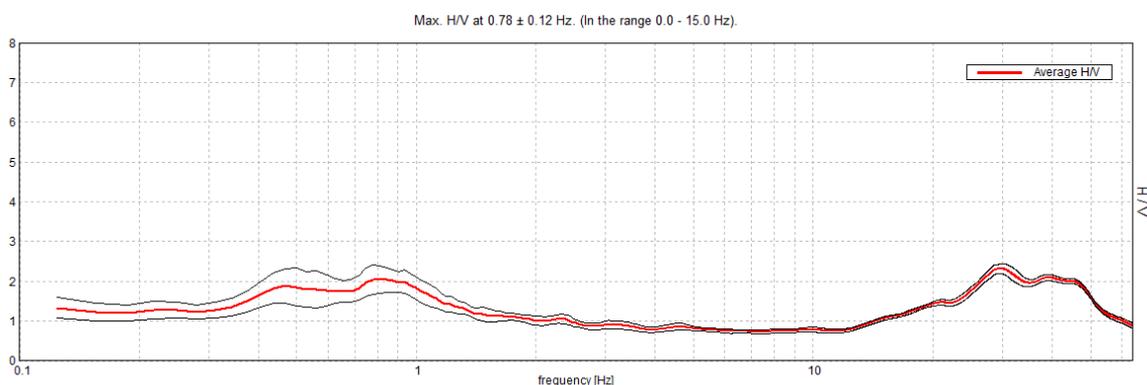
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 24 s

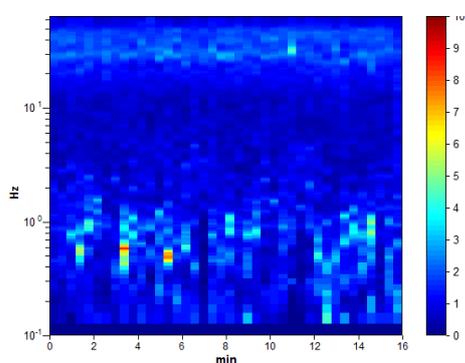
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

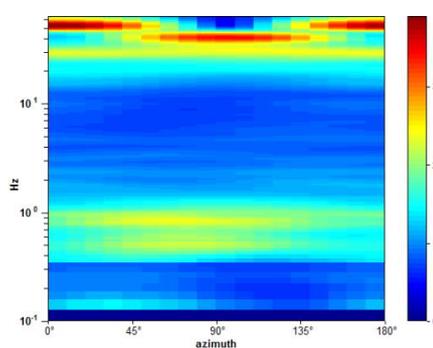
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



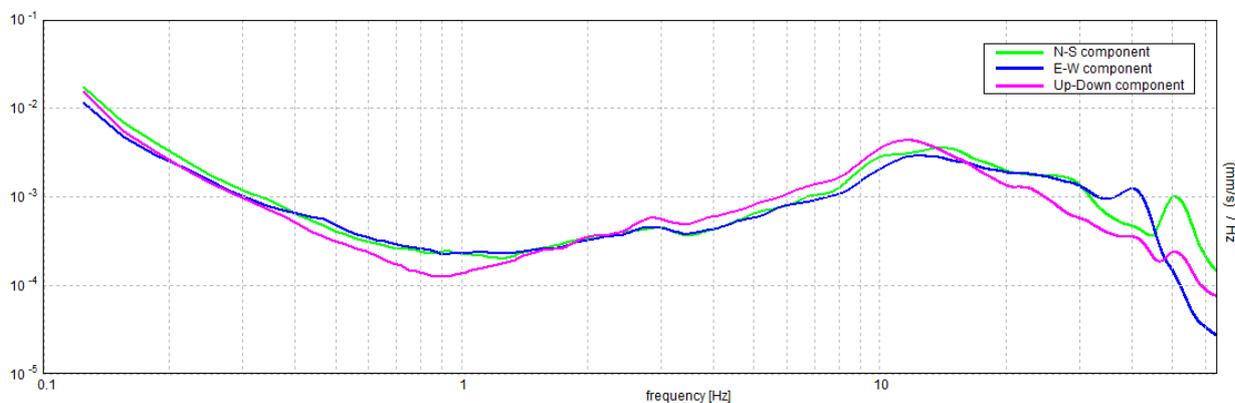
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.78 ± 0.12 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile <small>[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]</small>			
$f_0 > 10 / L_w$	0.78 > 0.42	OK	
$n_b(f_0) > 200$	750.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 38	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro <small>[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]</small>			
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$	1.969 Hz	OK	NO
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$	2.05 > 2	OK	
$A_0 > 2$	0.154271 < 0.05	NO	NO
$f_{picco}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.12053 < 0.11719	NO	NO
$\sigma_1 < \sigma(f_0)$	0.3759 < 2.0	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			
L_w	lunghezza della finestra		

n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

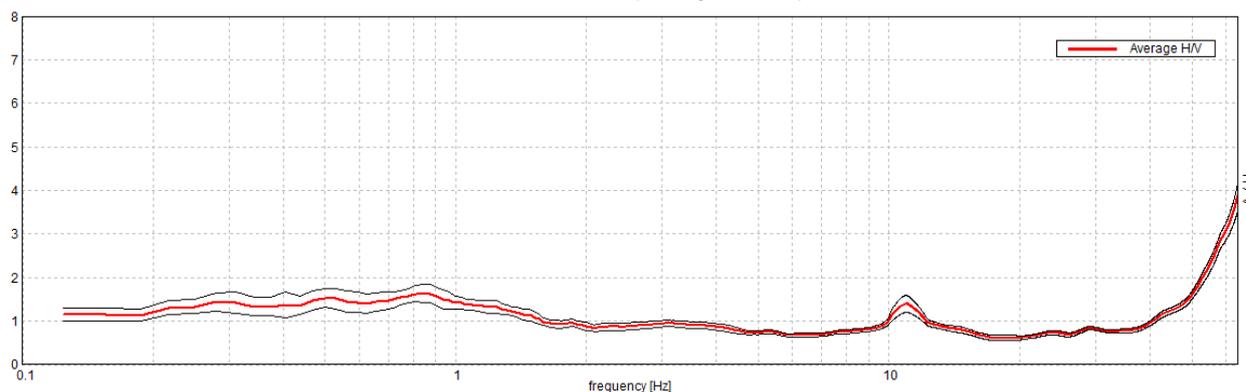
Intervallo di freq. [Hz]	Valori di soglia per σ e $\sigma_A(f_0)$				
	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 f_0	0.2 f_0	0.15 f_0	0.10 f_0	0.05 f_0
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 3 (AT5)

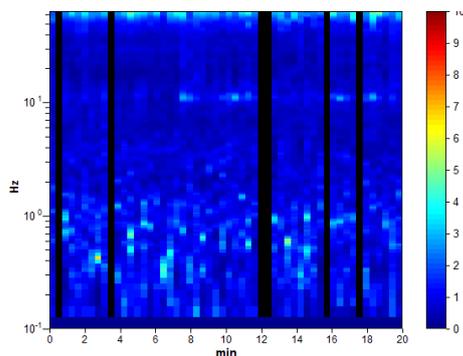
Strumento: TEP-0122/01-10
 Formato dati: 16 byte
 Inizio registrazione: 28/05/21 08:27:35 Fine registrazione: 28/05/21 08:47:35
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 89% tracciato (selezione manuale)
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Lunghezza finestre: 22 s
 Tipo di lisciamento: Triangular window
 Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

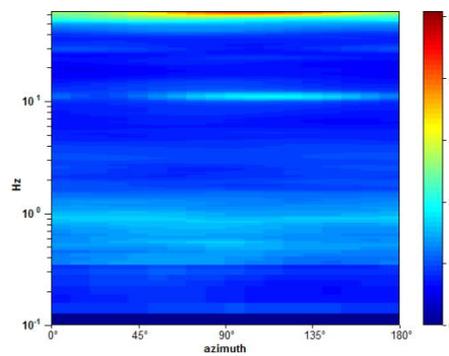
Max. H/V at 0.84 ± 0.21 Hz. (In the range 0.0 - 15.0 Hz).



SERIE TEMPORALE H/V

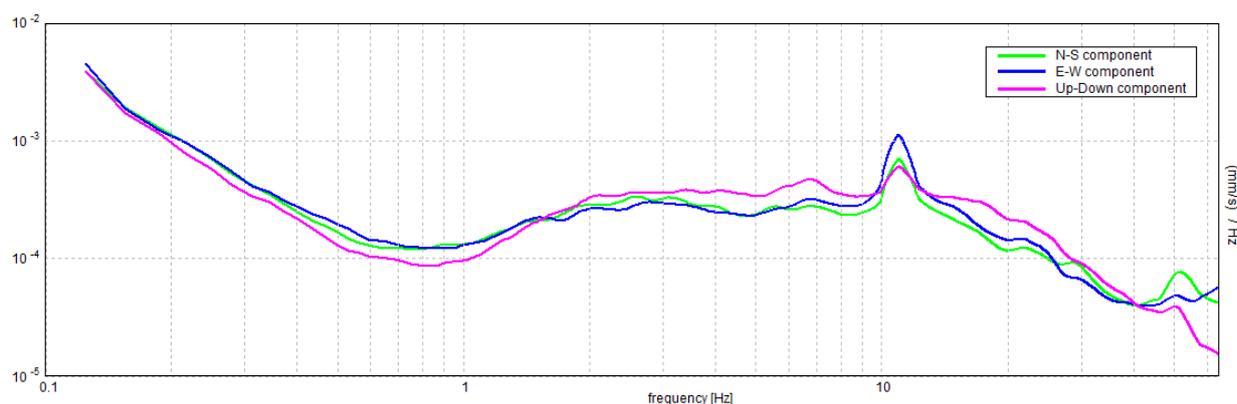


DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.84 ± 0.21 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.84 > 0.45$	OK
$n_c(f_0) > 200$	$891.0 > 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 42	OK

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$		NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$		NO
$A_0 > 2$	$1.63 > 2$	NO
$f_{picco}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$[0.25091] < 0.05$	NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.21171 < 0.12656$	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2015 < 2.0$	OK

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w \cdot n_w \cdot f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{HV}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{HV}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logHV}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{HV}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Intervallo di freq. [Hz]	Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$				
	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{logHV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 4

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 28/05/21 08:50:41 Fine registrazione: 28/05/21 09:07:45

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Durata registrazione: 0h17'00". Analizzato 80% tracciato (selezione manuale)

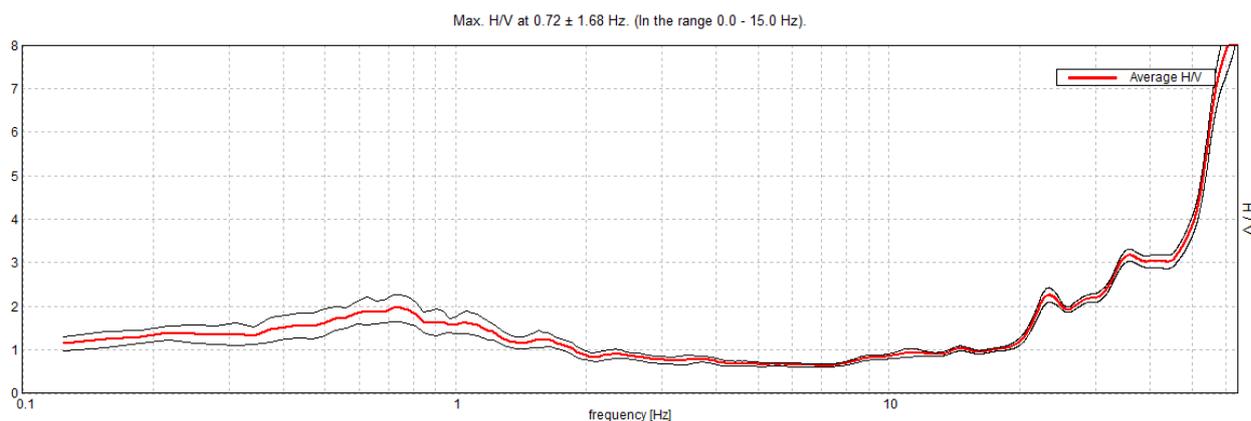
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 22 s

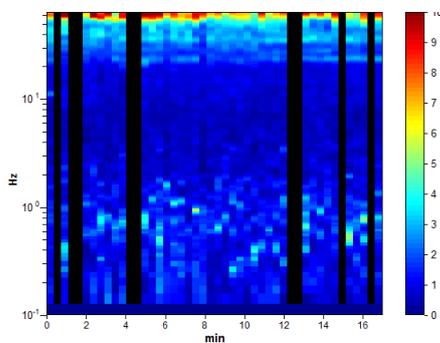
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

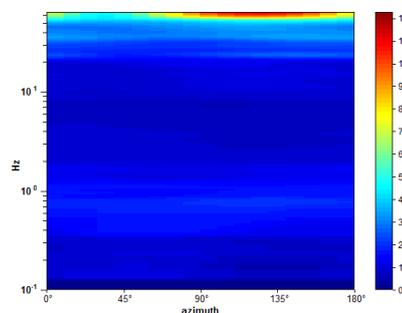
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



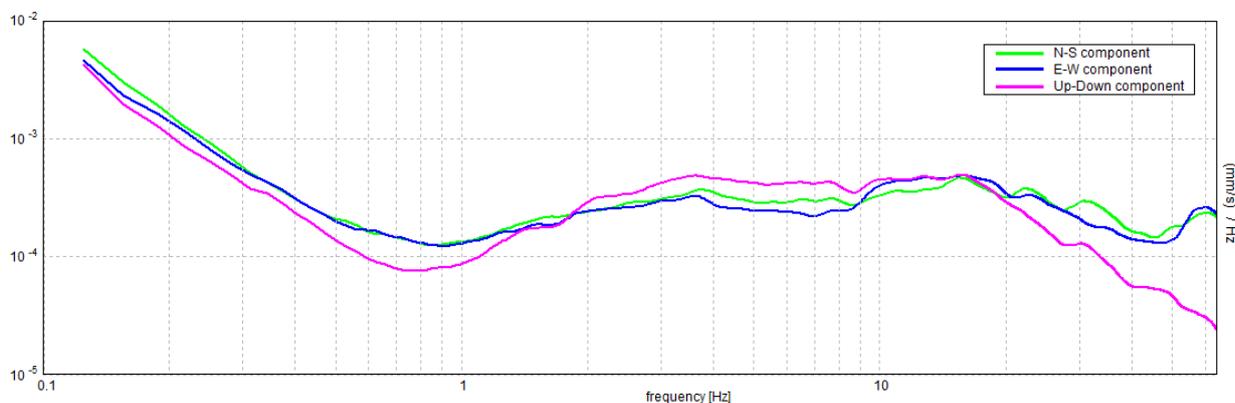
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.72 ± 1.68 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile <small>[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]</small>			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.72 > 0.45$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$585.1 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 36	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro <small>[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]</small>			
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$	1.906 Hz	OK	

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

$A_0 > 2$	$1.97 > 2$		NO
$f_{picco}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 2.3413 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$1.68281 < 0.10781$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3105 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w \cdot n_w \cdot f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{HV}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{HV}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logH/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{HV}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

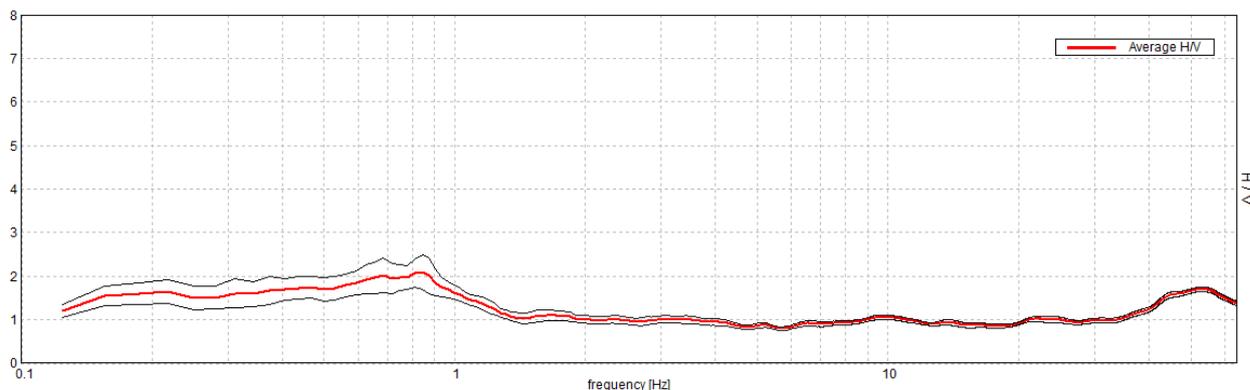
Valori di soglia per σ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{logH/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 5 (scuole medie)

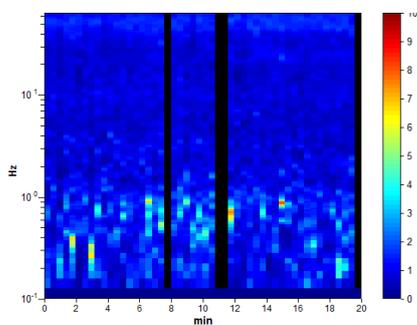
Strumento: TEP-0122/01-10
 Formato dati: 16 byte
 Inizio registrazione: 19/05/00 15:55:24 Fine registrazione: 19/05/00 16:15:24
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 92% tracciato (selezione manuale)
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Lunghezza finestre: 24 s
 Tipo di lisciamento: Triangular window
 Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

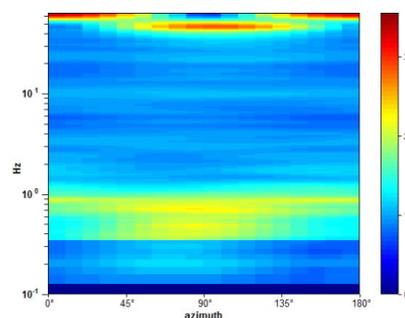
Max. H/V at 0.84 ± 0.3 Hz. (In the range 0.0 - 15.0 Hz).



SERIE TEMPORALE H/V

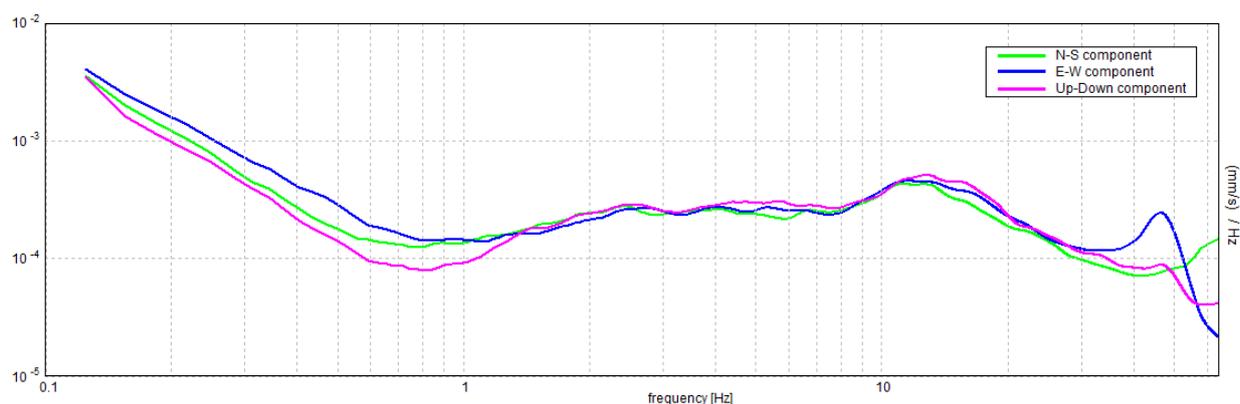


DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.84 ± 0.3 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.84 > 0.42$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$931.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 42	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	1.406 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.09 > 2	OK	
$f_{picco} [A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$[0.35495] < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.29949 < 0.12656$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3911 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{HV}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{HV}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{logHV}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{HV}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Intervallo di freq. [Hz]	Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$				
	< 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
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{logHV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Loc. CASTIGLIONE ADDA – Prova 6 (scuole medie)

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 19/05/00 16:33:20 Fine registrazione: 19/05/00 16:53:20

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 76% tracciato (selezione manuale)

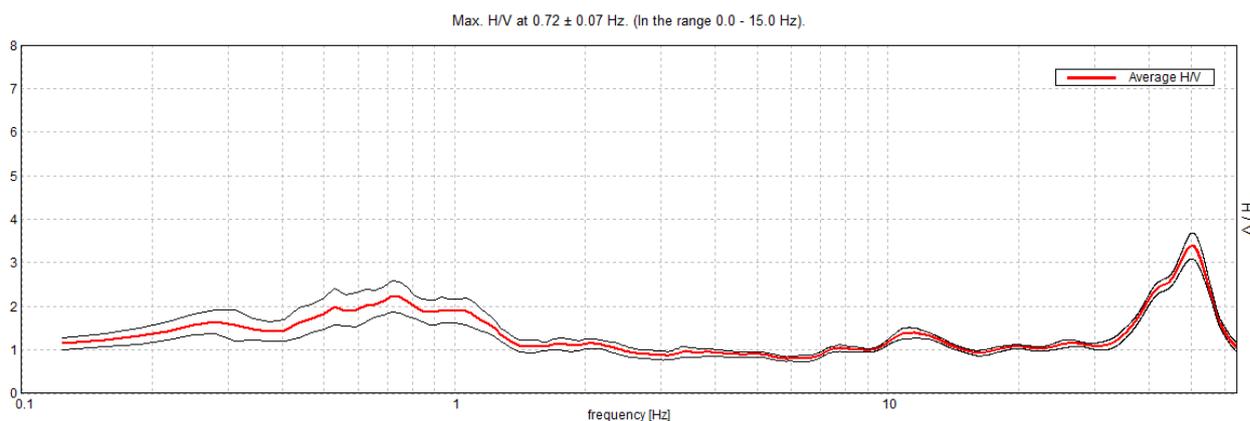
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 24 s

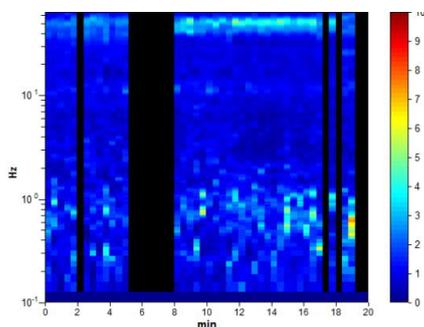
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

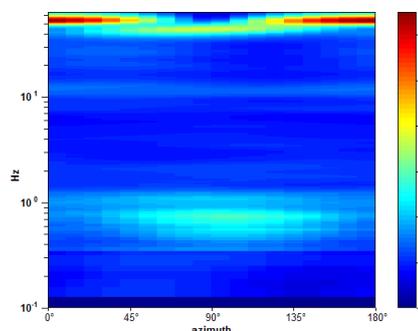
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



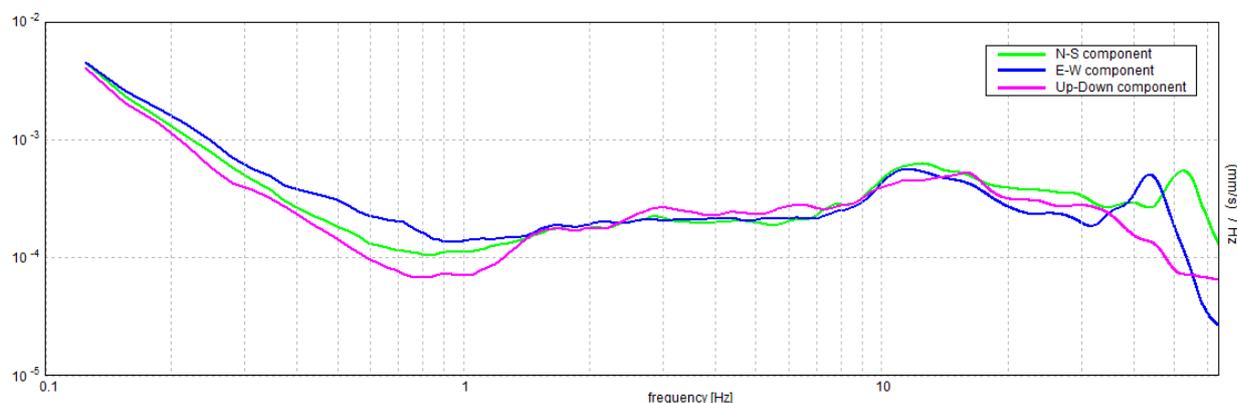
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.72 ± 0.07 Hz (nell'intervallo 0.0 - 15.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile <small>[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]</small>			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.72 > 0.42$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$655.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 36	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro <small>[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]</small>			
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^*) < A_0 / 2$	1.406 Hz	OK	

COMUNE DI CASTIGLIONE D'ADDA (LO) STUDIO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO – NOVEMBRE 2021

$A_0 > 2$	$2.23 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.10123 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.07276 < 0.10781$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3582 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w \cdot n_w \cdot f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [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
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Analizzando i risultati delle prove H/V si possono fare le seguenti considerazioni:

- Le prove hanno un andamento molto simile testimoniando l'uniformità sismo-stratigrafica dell'area indagata;
- Nel campo delle frequenze d'interesse ingegneristico (normalmente 1-10 Hz), non sono presenti picchi del rapporto H/V significativi, ossia chiaramente superiori a 2;
- La frequenza dove si osserva il valore maggiore del rapporto H/V, comunque con valore del contrasto d'impedenza sismica modesto, lievemente superiore a 2 solo si colloca nell'intervallo tra 0.6 e 1,0 Hz;
- Un'altra frequenza, con valore del rapporto H/V anche elevato è presente oltre i 20 Hz, ma è privo di significato per le strutture sul territorio.

12 Valutazione effetti sismici di sito: 2^a livello di approfondimento

La normativa regionale lombarda concernente la valutazione del rischio sismico nell'ambito della disciplina urbanistica (D.g.r. 30 novembre 2011 - n. IX/2616 Aggiornamento dei "Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio..."), prevede tre livelli di approfondimento con grado di dettaglio in ordine crescente.

Il primo livello comporta il riconoscimento delle aree passibili di amplificazione sismica sfruttando sia le osservazioni geologiche fornite dalla cartografia d'inquadrimento sia i dati esistenti, adottando lo schema riportato nella Figura 56. Considerando l'esito delle indagini eseguite e le indicazioni sugli aspetti sismici contenute nella Tavola 5 del PGT "classi di fattibilità delle azioni di piano", l'unico scenario di pericolosità sismica che interessa l'area di progetto è dato da "amplificazioni litologiche e geometriche", definito con la sigla Z4a e dovuto alla presenza di spessi depositi fluviali.

Infatti, per quanto riferito nei capitoli precedenti, si può escludere il rischio di "cedimenti", intesi come addensamenti rilevanti di sabbie sciolte per effetto del sisma (sigla Z2a), perché non sono presenti nel sito "terreni di fondazione particolarmente scadenti o depositi altamente compressibili", mentre per il rischio di "liquefazione dei depositi granulari fini saturi" (sigla Z2b), l'esclusione è fornita dalla verificata riferita nel §

Sigla	SCENARIO PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	EFFETTI
Z1a	Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi	Instabilità
Z1b	Zona caratterizzata da movimenti franosi quiescenti	
Z1c	Zona potenzialmente franosa o esposta a rischio di frana	
Z2a	Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc.)	Cedimenti
Z2b	Zone con depositi granulari fini saturi	Liquefazioni
Z3a	Zona di ciglio H > 10 m (scarpata, bordo di cava, nicchia di distacco, orlo di terrazzo fluviale o di natura antropica, ecc.)	Amplificazioni topografiche
Z3b	Zona di cresta rocciosa e/o cocuzzolo: appuntite - arrotondate	
Z4a	Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi	
Z4b	Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre	
Z4c	Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)	
Z4d	Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale	
Z5	Zona di contatto stratigrafico e/o tettonico tra litotipi con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse	Comportamenti differenziali

Figura 56: tabella 1 dell'allegato 5 alla dgr 30 novembre 2011 n. IX/2616 per l'individuazione degli scenari di pericolosità sismica.

Ai sensi della citata disciplina regionale l'analisi di secondo livello, o eventualmente quella di 3° livello ove l'analisi di 2° livello ne rivelasse la necessità, è richiesta in zona 4 per edifici il cui uso prevede affollamenti significativi o che comportino rischi rilevanti per la popolazione ai fini della sicurezza sismica o per costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche secondo un elenco riportato nel d.d.u.o. n. 19904 del 21 novembre 2003

(Burl serie ordinaria n. 49/2003), ma con la definitiva entrata in vigore in data 10 aprile 2016 della DGR 11 luglio 2014 n. 2129 "aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia", il territorio di Castiglione d'Adda è passato dalla zona simica 4 alla 3 e di conseguenza l'analisi di secondo livello deve essere eseguita in tutte le aree urbanizzate e urbanizzabili a prescindere dal tipo di insediamento previsto (§1.4.4 Sintesi delle procedure D.g.r. 2011/2616).

Di seguito si descrive il percorso compiuto per attuare l'analisi di 2° livello, che comporta una valutazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione litologica, espressa dal *Fattore di Amplificazione "Fa"*, che riguarda le aree perimetrate nella carta di pericolosità sismica locale mediante confronto con valori soglia di riferimento definiti dalla Regione Lombardia per ogni comune, secondo una procedura approntata dal Politecnico di Milano e che è riferita nell'allegato 5 della citata dgr 30 novembre 2011 - n. IX/2616.

I valori di soglia sono indicati in un elaborato disponibile nelle pagine web della Direzione Generale Territorio e Urbanistica della Regione Lombardia, nell'area dedicata alla Componente geologica a scala comunale <http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/servizi-e-informazioni/Enti-e-Operatori/territorio/pianificazione-comunale-e-provinciale/componente-geologica-pgt> nel file "Analisi_sismica_-_soglie_lomb_-_dgr7374_2008.xls".

In generale la metodologia fa riferimento a una sismicità di base caratterizzata da un periodo di ritorno di 475 anni (probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni) ma può essere eseguita considerando altri periodi di ritorno. La procedura si attua come di seguito specificato.

Dai dati litologici, geotecnici e dall'andamento in profondità delle Vs s'individua la litologia prevalente del sito e successivamente la scheda litologica di riferimento tra le 6 predisposte dal metodo.

- o scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- o scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- o scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- o scheda per le litologie sabbiose (di solito preferibile in zone di pianura).

Secondo quanto indicato dalla procedura occorre fare riferimento alla scheda con caratteristiche più prossime a quelle rilevate in sito, che in questo caso è rappresentata da quella per *litologie sabbiose*, di solito preferibile in zone di pianura e che è coerente con la litologia descritta nella relazione geologica, come appare dal confronto con i "parametri indicativi" che descrivono l'ambito di applicazione della scheda stessa.

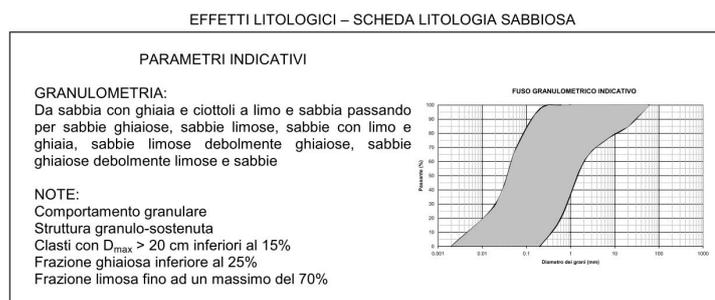


Figura 57 : parametri indicativi della scheda per le litologie sabbiose dell'allegato 5 alla Deliberazione Giunta regionale 30 novembre 2011 - n. IX/2616.

Una volta individuata la scheda di riferimento è necessario verificarne la applicabilità al caso in esame controllando che il profilo dei valori di Vs con la profondità ottenuto nel sito ricada, almeno in gran parte, nel "campo di validità" della scheda stessa, ovvero nella porzione superiore destra del diagramma Vs /profondità illustrato dalla Figura 58, come effettivamente si riscontra nel caso in esame.

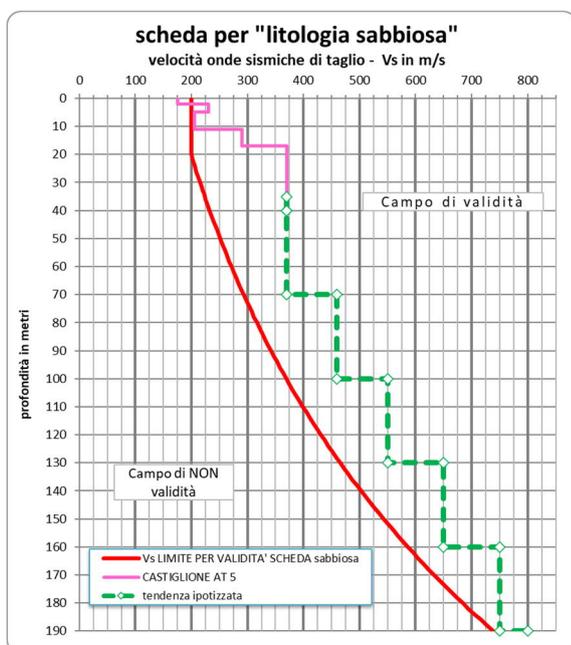


Figura 58: schema di controllo della coerenza del profilo sismico individuato con la scheda di riferimento e ipotesi di prosecuzione delle Vs in profondità (tendenza ipotizzata in legenda).

Per valutare il fattore di amplificazione F_a , il successivo passo è di individuare il periodo proprio del sito " T "²⁶ calcolato considerando tutta la stratigrafia fino alla profondità in cui il valore della velocità Vs è uguale o superiore a 800 m/s, utilizzando la seguente relazione:

$$T = \frac{4 \cdot \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \cdot h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$

dove al numeratore compare la distanza dalla superficie del substrato "rigido" moltiplicata per quattro.

Poiché le indagini geofisiche sono interpretabili fino a circa 35 metri e non raggiungono il substrato, la profondità dello stesso deve essere individuata "ipotizzando un opportuno gradiente di Vs con la profondità sulla base dei dati ottenuti dall'indagine, tale da raggiungere il valore di 800 m/s".

Quest'operazione è stata compiuta disegnando la linea a punti verdi riportata nel grafico in prosecuzione di un valore circa intermedio tra i grafici disponibili sulla base della litologia nota dalle stratigrafie ed assumendo nel calcolo i relativi valori Vs/profondità che raggiungono la misura di 800 m/s alla profondità 190 metri circa.

Al denominatore della relazione di stima del periodo proprio " T ", compare la velocità media ponderale il cui calcolo è riportato nella Tabella 6.

da	a	MASW AT 5	$V_s \cdot h_i$
0.0	2.0	175	350
2.0	5	230	690
5	11	205	1230
11	17	290	1740
17	35	370	6660
35	40	370	1850
40	70	370	11100
70	100	460	13800
100	130	550	16500
130	160	650	19500
160	190	750	22500
Σh_i	190	$\Sigma V_s \cdot h_i$	95920
$4 \cdot \Sigma h_i$	760	$\Sigma V_s \cdot h_i / \Sigma h_i$	505
periodo	T	1.5	secondi

Tabella 6: calcolo del periodo proprio dei terreni di fondazione. In colore verde i valori assunti in ipotesi per determinare le Vs fino a 800 m/s.

Ottenuto il periodo proprio del terreno di fondazione, equivalente alla frequenza di 1 Hz, il passo successivo è quello di operare una selezione, entro una matrice presente nella scheda di valutazione (Tabella 7), che in funzione della

²⁶ Nota: Una struttura non deve mai possedere una frequenza di risonanza uguale alla frequenza fondamentale di risonanza dei terreni di fondazione (doppia risonanza), al fine di minimizzare gli effetti di un evento sismico intenso. La "doppia risonanza", si traduce in un aumento considerevole delle sollecitazioni agenti sull'edificio e quindi, del danno che quest'ultimo può subire con un forte sisma.

profondità e della velocità V_s dello strato superficiale consente di individuare quale curva utilizzare per la stima del valore di F_a .

Nel caso in esame fino alla profondità di 4 metri, spessore minimo indicato dalla procedura, la velocità media ponderale è di 202 m/s per il profilo medio considerato, ricadente nella casella che denota la curva 2 che quindi risulta essere quella di riferimento.

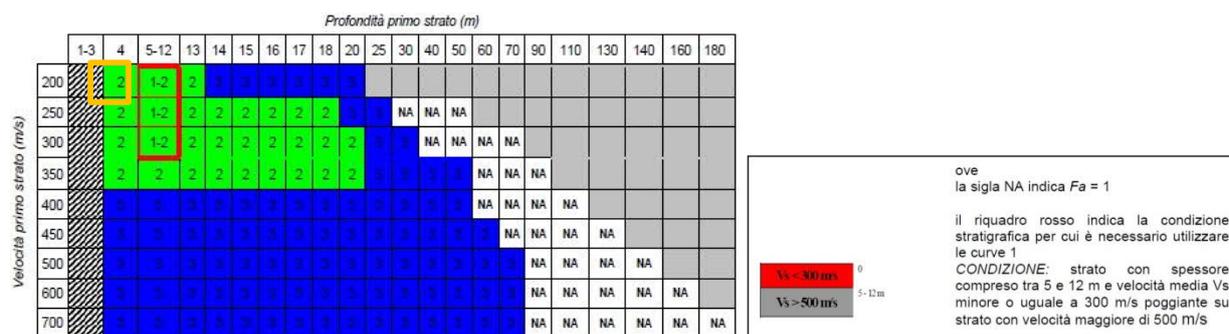


Tabella 7: matrice per la scelta delle curve T / F_a (tipo 1, 2 o 3) per la determinazione dell'amplificazione litologica, con indicazione del tipo di curva individuata per il caso specifico (rettangolo arancione).

Note: 1) secondo le indicazioni degli autori il valore di V_s dello strato superficiale riportato nella scheda è da intendersi come "limite massimo di ogni intervallo".

2) Il rettangolo rosso che distingue alcune caselle nella matrice è presente nella grafica originaria del documento e si riferisce a una condizione estranea a quella del sito in esame, precisata nel riquadro destro della Tabella 7.

Definita nella scheda in esame la curva di riferimento da adottare, il valore del fattore di amplificazione F_a s'individua dall'intersezione dell'ordinata passante per il periodo proprio T precedentemente determinato ($T = 1,0 \text{ s}$) con la curva stessa fornita dalla scheda di riferimento adottata.

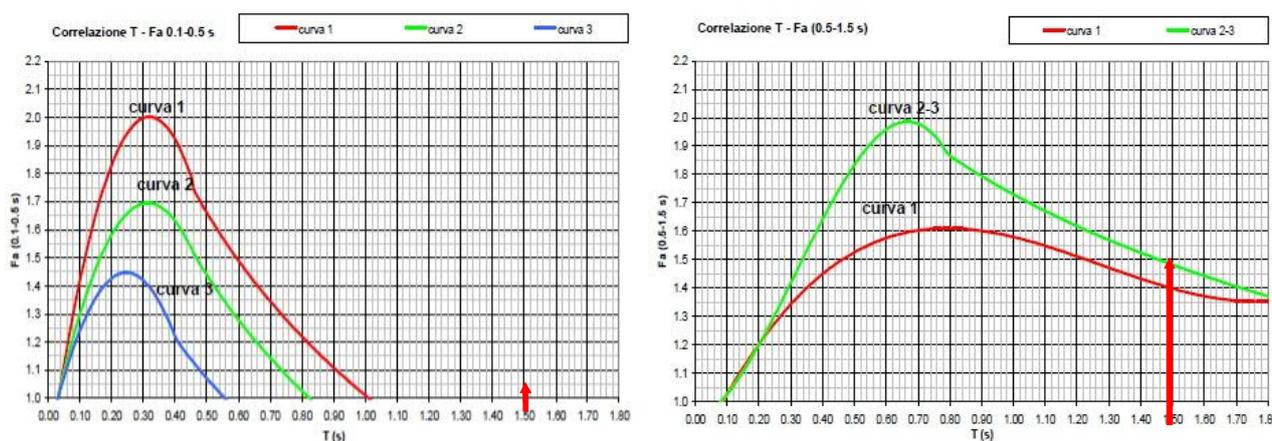


Figura 59: curve che identificano le variazioni del fattore di amplificazione in funzione del periodo proprio del terreno.

Le curve disponibili per tale valutazione sono riferite a due intervalli di periodo 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s. Il primo intervallo si riferisce a edifici relativamente bassi e rigidi, indicativamente formati da strutture elevate da 1 a 5 piani (da 3 a 15 metri), il secondo a edifici alti e flessibili, indicativamente formate da strutture elevate da 5 a 15 piani (da 15 a 45 metri).

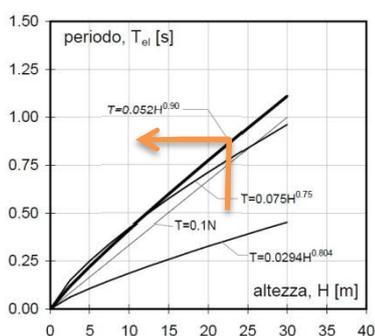


Figura 1. Comparazione delle principali formulazioni periodo-altezza di letteratura

Per esemplificare il significato dei due intervalli prescelti la figura a fianco fornisce alcune relazioni sommarie tra altezza degli edifici e il periodo fondamentale di vibrazione, tratta da "Il periodo nella valutazione sismica di edifici esistenti in c.a." G.M. Verderame, I. Iervolino, C. Mariniello e G. Manfredi Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - Linea 2 del progetto triennale, 2005/2008, ReLUIS – Dipartimento della Protezione Civile.

L'uso dei grafici di Figura 59 porta a individuare i seguenti valori:

$$Fa_{0.1-0.5} = 1,0$$

$Fa_{0.5-1.5} = 1,48$, approssimato come richiesto dalla procedura a $Fa_{0.5-1.5} = 1,5$

L'uso delle relazioni analitiche fornite dal metodo in aggiunta ai grafici conferma la lettura riportata:

Il fattore di amplificazione nell'intervallo di frequenza del sisma di 0.1-0.5 secondi è: $Fa_{0.1-0.5} = 1,0$ se il periodo proprio del terreno $T > 0.8$;

il fattore di amplificazione nell'intervallo di frequenza del sisma di 0.5-1.5 secondi è pari a: $Fa_{0.5-1.5} = 1.73 - 0.61 \ln T$, corrispondente nel nostro caso a 1.48, se il periodo proprio del terreno ricade nell'intervallo $0.8 < T < 1.8$ s.

L'ultimo passo necessario a completare la verifica si realizza confrontando il valore di Fa ottenuto dall'applicazione scheda di riferimento adottata, con un parametro di analogo significato calcolato dalla Regione Lombardia per ciascun comune e per le diverse categorie di suolo (B, C, D ed E delle Norme Tecniche per le Costruzioni) e per i due intervalli di periodo considerati: 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s.

Il parametro calcolato è riportato, come detto, nel file *soglie_lombardia.xls* disponibile nel sito della Direzione Generale Territorio e Protezione Civile della regione Lombardia, contiene per ciascun Comune della Regione Lombardia i valori massimi del fattore di amplificazione sismica (Fa) per ogni categoria di sottosuolo, che rappresenta il valore di soglia oltre il quale lo spettro proposto dalla normativa è ritenuto insufficiente a tenere in considerazione la reale amplificazione presente nel sito.

I valori concernenti Castiglione d'Adda sono riportati nella seguente tabella, dove è evidenziato il caso del sottosuolo di categoria C (Tabella 3.2. II NTC '18), che è quello identificato nell'analisi sismica:

COMUNE	INTERVALLO di periodo (s)	Valori soglia dell'amplificazione (Fa) per categoria di sottosuolo			
		B	C	D	E
Castiglione d'Adda	0.1 - 0.5	1.4	1.8	2.2	1.9
	0.5 - 1.5	1.7	2.4	4.1	3.0

Tabella 8: valori di soglia del fattore di amplificazione Fa per il comune di Castiglione d'Adda.

Il confronto tra i valori di amplificazione litologica locale ottenuti dalla verifica di secondo livello (Fa_{locale}) e i valori di soglia evidenza quanto segue:

$$\mathbf{Fa_{locale\ 0.1-0.5} = 1,0 < 1,8}$$
 (soglia NTC '18);

$$\mathbf{Fa_{locale\ 0.5-1.5} = 1,50 < 2,4}$$
 (soglia NTC '18)

Sulla base dei dati rilevati con l'indagine sismica, l'analisi di secondo livello conferma che la normativa esistente e il relativo spettro sono sufficienti a tenere in considerazione gli effetti di amplificazione litologica specifici del sito in esame e quindi la progettazione può essere effettuata tenendo conto della categoria di suolo individuata.

Un'ultima notazione riguarda l'applicabilità della procedura sopra riferita con riferimento al § 2.5.2.1 "limiti di utilizzo degli abachi per amplificazioni litostratigrafiche" della pubblicazione "Gruppo di lavoro MS, 2008 - Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica." predisposto dalla "Conferenza delle Regioni e delle Province autonome - Dipartimento della protezione civile, Roma, 3 vol. e Dvd".

In tale documento si precisa che "la presenza di un'inversione di velocità nel profilo delle Vs di una successione litostratigrafica s'intende realizzata quando un terreno rigido sovrasta stratigraficamente un terreno meno rigido (soffice) con un rapporto $V_{s,rig}/V_{s,sof} > 2$, con la Vs dello strato più rigido maggiore di 500 m/s. In tali casi è opportuno passare a un livello di approfondimento superiore."

I profili ottenuti mostrano inversioni molto lievi, ben al di sotto della soglia sopra indicata (il massimo valore $V_{s,rig}/V_{s,sof} = 1.11$ nella prova MASW-Re.Mi 2) e quindi l'applicazione del criterio limite di applicabilità definito dal "Gruppo di lavoro MS, 2008" non comporta la necessità di eseguire un livello superiore di approfondimento.

13 Norme Geologiche di Piano e classi di fattibilità

Classe 1 *fattibilità senza particolari limitazioni.*

A questa classe appartengono i terreni posti a monte della scarpata morfologica principale, fino a 20 metri circa dal ciglio, e alcune piccole porzioni di territorio ai piedi delle stesse, formate da terrazzi di sola erosione.

Le aree sono costituite da terreni prevalentemente sabbiosi e sabbioso limosi di media densità, con sporadici intervalli limoso-argillosi di spessore da un decimetro ad un metro. La falda è presente a profondità minime di 5 metri nei piccoli terrazzi alla base della scarpata, ad ovest del Mulino Muzza e nella porzione sudoccidentale del territorio (a sud della Cascina Barattiera), mentre nei restanti settori inseriti in tale classe la falda presenta profondità variabili tra 6 e 14 metri.

Alcune prove penetrometriche eseguite a SSE del centro abitato e nella località Vallere hanno evidenziato strati superficiali limoso argillosi poco permeabili, che possono dare luogo a piccole falde sospese, nell'area orientativamente delimitata nelle tavole 4 e 5. La problematica è facilmente risolvibile in sede progettuale e non comporta un mutamento della classe di fattibilità. La vulnerabilità intrinseca è compresa tra media ed elevata, con valori dell'indice SINTACS tra 45% e 65%.

Per la realizzazione di opere o interventi, l'accertamento delle caratteristiche geologico tecniche dei terreni dovrà avvenire secondo le modalità illustrate nel D.M. 17 gennaio 2018 "Norme tecniche sulle costruzioni" e relativa circolare applicativa C.S.LL.PP. del 21 gennaio 2019, n. 7.

Classe 2 *fattibilità con modeste controindicazioni.*

CLASSE 2. In questa categoria sono collocate le superfici ricadenti nella fascia C del PAI, normata dall'articolo 31 delle NdA, che principalmente prevede la predisposizione da parte delle Regioni o delle Province di Programmi di previsione e prevenzione e dei Piani di emergenza ai sensi della L 225/1992 (istituzione del servizio nazionale di Protezione civile). In particolare spetta alla Provincia "assicurare lo svolgimento dei compiti relativi alla rilevazione, alla raccolta e alla elaborazione dei dati interessanti la protezione civile, nonché alla realizzazione dei Programmi di previsione e prevenzione sopra menzionati". Ai sensi del comma 4 del citato art.31 il comune regola le attività consentite, i limiti e i divieti per i territori ricadenti in fascia C, mediante agli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica. In via preliminare, in attesa della predisposizione dei citati piani di protezione civile da parte degli enti interessati, è considerata la continuità morfologica di tali aree con quelle collocate in sottoclasse 2c, si dispone per la classe 2 il rispetto delle prescrizioni definite per la sottoclasse 2c.

SOTTOCLASSE 2a. Questa categoria è stata attribuita alla fascia di territorio parallela ai cigli delle scarpate, a distanza compresa tra 1 e 2 H dai margini stessi, con H pari al dislivello delle scarpate. Nella Tavola 5 la rappresentazione è sommaria e per il progetto di opere la precisa definizione di tale superficie dovrà risultare da appositi rilievi plani altimetrici.

La fascia potrebbe essere interessata da fenomeni di instabilità durante le operazioni di scavo e durante l'esercizio soprattutto per effetto di infiltrazioni di acque in presenza di substrati poco permeabili. In queste zone l'edificazione è generalmente concessa previa verifica delle caratteristiche stratigrafiche e geologico tecniche della zona interessata dal carico. Per la costruzione di edifici civili, pubblici ed industriali, nonché per le opere di urbanizzazione si prescrive l'accertamento delle caratteristiche geologico tecniche dei terreni secondo le modalità definite dalle NTC 2018 escludendo l'ipotesi semplificativa prevista al punto 6.2.2. della citata norma per le " zone ben conosciute dal punto di vista geotecnico".

La profondità di indagine dovrà essere stabilita e giustificata caso per caso in base alla forma, alle dimensioni, alle caratteristiche strutturali del manufatto, al valore dei carichi da trasmettere in fondazione.

SOTTOCLASSE 2b. Questa categoria è stata attribuita ad un'area posta a valle del terrazzo principale, corrispondente al tracciato di un antico paleoalveo, che presenta nel profilo intervalli limoso-argillosi con scadenti qualità meccaniche di spessore metrico. La soggiacenza della prima falda è di 4 – 5 m. Nelle aree collocate in tale classe il rilascio della concessione edilizia dovrà essere subordinata all'accertamento delle caratteristiche geologico tecniche con i criteri definiti per la precedente sottoclasse 2a, e la progettazione delle opere dovrà tenere conto della possibile presenza di acqua di falda alla profondità 3,5 metri dal piano campagna.

SOTTOCLASSE 2c. In questa sottoclasse ricade un'area ristretta posta a valle del terrazzo principale delimitata ad est dall'Adda Morta. La conoscenza geotecnica di quest'area è sufficiente ad esprimere un giudizio in tal senso, ed i profili penetrometrici mostrano sabbie limose di media densità poggianti alla profondità di qualche metro su sabbie e ghiaie dense. La soggiacenza della prima falda è di 3 – 5 m. Nelle aree collocate in tale classe il rilascio della concessione edilizia dovrà essere subordinata all'accertamento delle caratteristiche geologico tecniche con i criteri definiti per la precedente sottoclasse 2a, e la progettazione delle opere dovrà tenere conto della possibile presenza di acqua di falda alla profondità 2,5 metri dal piano campagna.

Classe 3 *fattibilità con consistenti limitazioni*

SOTTOCLASSE 3a . Appartengono a questa classe le fasce di terreni poste a ridosso delle scarpate fino a distanza H dai cigli, quelli delle scarpate stesse, e delle superfici a valle fino alla distanza H dal piede delle stesse, con H pari al dislivello dei terreni determinato dalla presenza delle scarpate. Nella Tavola 5 la rappresentazione è sommaria, e per il progetto di opere la precisa definizione di tale superficie dovrà risultare da appositi rilievi piani altimetrici.

Nelle aree poste entro tale fasce l'edificazione non è concessa, ed eventuali progetti di opere in deroga dovranno comprendere la verifica delle condizioni di stabilità a breve e a lungo termine delle scarpate, nonché la verifica di stabilità del complesso opera – scarpata e delle eventuali opere di sostegno. Il rilascio di provvedimenti autorizzativi è subordinata alla presentazione ed all'esito positivo di tali verifiche.

SOTTOCLASSE 3b . La sottoclasse individua la fascia di rispetto dei canali in applicazione al Regolamento Regionale 8 febbraio 2010, n. 3, collocandola nella classe 3 di fattibilità. Sui corsi d'acqua sopra individuati vige il divieto di tombinatura ai sensi dell'articolo 41 del D.lgs 152/99. La fascia di rispetto individuata corrisponde ad una porzione di territorio compresa entro una distanza di 10 m per parte dal ciglio dell'alveo inciso od al piede esterno degli argini.

SOTTOCLASSE 3c. In questa categoria sono collocate le superfici ricadenti nella fascia B del PAI, che ha la funzione di "*...mantenere e migliorare le condizioni di funzionalità idraulica ai fini principali dell'invaso e della laminazione delle piene, unitamente alla conservazione e al miglioramento delle caratteristiche naturali e ambientali.*", ed è normata dagli articoli 30, 32, 38, 38 bis, 39 e 41 delle NdA, qui integralmente richiamate. In particolare si evidenziano i seguenti punti:

comma 2 dell'art. 30: Nella fascia B sono vietati:

- a) gli interventi che comportino una riduzione apprezzabile o una parzializzazione della capacità di invaso, salvo che questi interventi prevedano un pari aumento delle capacità di invaso in area idraulicamente equivalente;
- b) la realizzazione di nuovi impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti, l'ampliamento degli stessi impianti esistenti, nonché l'esercizio delle operazioni di smaltimento e recupero dei rifiuti, così come definiti dal D.Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22, fatto salvo quanto previsto al precedente art. 29, comma 3, let. I);
- c) in presenza di argini, interventi e strutture che tendano a orientare la corrente verso il rilevato e scavi o abbassamenti del piano di campagna che possano compromettere la stabilità delle fondazioni dell'argine.

comma 4 dell'art. 32: Demanio fluviale e pertinenze idrauliche e demaniali:

Nei terreni demaniali ricadenti all'interno delle fasce A e B, fermo restando quanto previsto dall'art. 8 della L. 5 gennaio 1994, n. 37, il rinnovo ed il rilascio di nuove concessioni sono subordinati alla presentazione di progetti di gestione, d'iniziativa pubblica e/o privata, volti alla ricostituzione di un ambiente fluviale diversificato e alla promozione dell'interconnessione ecologica di aree naturali.

comma 1 dell'art. 38: Interventi per la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico:

Fatto salvo quanto previsto agli artt. 29 e 30, all'interno delle Fasce A e B è consentita la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrimenti localizzabili, a condizione che non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo. A tal fine i progetti devono essere corredati da uno studio di compatibilità, che documenti l'assenza dei suddetti fenomeni e delle eventuali modifiche alle suddette caratteristiche, da sottoporre all'Autorità competente, così come individuata dalla direttiva di cui la comma successivo, per l'espressione di parere rispetto la pianificazione di bacino.

art. 39. Interventi urbanistici e indirizzi alla pianificazione urbanistica

I territori delle Fasce A e B individuati dal PAI, sono soggetti ai seguenti speciali vincoli e limitazioni:
 comma 1 , punto a): le aree non edificate ed esterne al perimetro del centro edificato dei comuni, così come definito dalla successiva lett. c), sono destinate a vincolo speciale di tutela fluviale ai sensi dell'art. 5, comma 2, lett. a) della L. 17 agosto 1942, n. 1150

comma 4: nei territori della Fascia B, sono inoltre esclusivamente consentite:

a) opere di nuova edificazione, di ampliamento e di ristrutturazione edilizia, comportanti anche aumento di superficie o volume, interessanti edifici per attività agricole e residenze rurali connesse alla conduzione aziendale, purché le superfici abitabili siano realizzate a quote compatibili con la piena di riferimento, previa rinuncia da parte del soggetto interessato al risarcimento in caso di danno o in presenza di copertura assicurativa;

b) interventi di ristrutturazione edilizia, comportanti anche sopraelevazione degli edifici con aumento di superficie o volume, non superiori a quelli potenzialmente allagabili, con contestuale dismissione d'uso di queste ultime e a condizione che gli stessi non aumentino il livello di rischio e non comportino significativo ostacolo o riduzione apprezzabile della capacità di invaso delle aree stesse, previa rinuncia da parte del soggetto interessato al risarcimento in caso di danno o in presenza di copertura assicurativa;

c) interventi di adeguamento igienico - funzionale degli edifici esistenti, ove necessario, per il rispetto della legislazione in vigore anche in materia di sicurezza del lavoro connessi ad esigenze delle attività e degli usi in atto;

d) opere attinenti l'esercizio della navigazione e della portualità, commerciale e da diporto, qualora previsti nell'ambito del piano di settore, anche ai sensi del precedente art. 20.

Con riferimento a quanto definito nel citato punto a) del comma 4, ed all'esito dei rilievi effettuati a seguito dell'evento di piena del 26-27 novembre 2002, si prescrive che le connessioni di opere di nuova edificazione debbano essere subordinate all'adozione di criteri progettuali che tengano espressamente conto di possibili elevazioni dei livelli idrometrici fino alla quota di 48,5 m s.l.m., approssimativamente corrispondente a quella dei piazzali delle aziende agricole C.na Vizaschina e C.na Gerra, che sono state lambite ma non inondate dalla piena considerata.

SOTTOCLASSE 3d. Tale sottoclasse individua le zone di rispetto delle captazioni ad uso idropotabile "che prelevano acque destinate al consumo umano erogate a terzi mediante impianto di acquedotto che riveste carattere di pubblico interesse", come previsto dall'art. 94 del decreto legislativo 03 aprile 2006 n. 152, definite su base geometrica dalla superficie circostante la zona di tutela assoluta (v sottoclasse 4b) entro il raggio di 200 m dall'opera di captazione, all'interno della quale:

Comma 4 : particolare sono vietati l'insediamento dei seguenti centri di pericolo e lo svolgimento delle seguenti attività:

- a) dispersione di fanghi ed acque reflue, anche se depurati;
- b) accumulo di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi;
- c) spandimento di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi, salvo che l'impiego di tali sostanze sia effettuato sulla base delle indicazioni di uno specifico piano di utilizzazione che tenga conto della natura dei suoli, delle colture compatibili, delle tecniche agronomiche impiegate e della vulnerabilità delle risorse idriche;
- d) dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche proveniente da piazzali e strade;
- e) aree cimiteriali;
- f) apertura di cave che possono essere in connessione con la falda;
- g) apertura di pozzi ad eccezione di quelli che estraggono acque destinate al consumo umano e di quelli finalizzati alla variazione della estrazione ed alla protezione delle caratteristiche quali-quantitative della risorsa idrica;
- h) gestione di rifiuti;
- i) stoccaggio di prodotti ovvero sostanze chimiche pericolose e sostanze radioattive;
- l) centri di raccolta, demolizione e rottamazione di autoveicoli;
- m) pozzi perdenti;
- n) pascolo e stabulazione di bestiame che ecceda i 170 chilogrammi per ettaro di azoto presente negli effluenti, al netto delle perdite di stoccaggio e distribuzione. E' comunque vietata la stabulazione di bestiame nella zona di rispetto ristretta.

Comma 5: Per gli insediamenti o le attività di cui al comma 4, preesistenti, ove possibile e comunque ad eccezione delle aree cimiteriali, sono adottate le misure per il loro allontanamento: in ogni caso deve essere garantita la loro messa in sicurezza. Le regioni e le provincie autonome disciplinano, all'interno delle zone di rispetto, le seguenti strutture od attività:

- a) fognature;
- b) edilizia residenziale e relative opere di urbanizzazione;
- c) opere viarie, ferroviarie ed in genere infrastrutture di servizio;
- d) le pratiche agronomiche e i contenuti dei piani di utilizzazione di cui alla lettera c) del comma 4."

L'attuazione degli interventi o delle attività elencate all'art.94 comma 5, del d.lgs. 152/06, deve seguire i criteri e le indicazioni contenute nel documento "*Direttive per la disciplina delle attività all'interno delle aree di rispetto (art. 21, comma 6 del d.lgs. 152/99 e successive modificazioni)*", approvato con d.g.r. 10 aprile 2003, n° 7/12693, pubblicato sul B.U.R.L. Serie Ordinaria n°17, del 22 aprile 2003.

Classe 4 : *fattibilità con gravi limitazioni.*

In questa categoria sono collocate le superfici ricadenti nella fascia A del PAI, che ha la funzione di "*...garantire le condizioni di sicurezza assicurando il deflusso della piena di riferimento, il mantenimento e/o il*

recupero delle condizioni di equilibrio dinamico dell'alveo nonché quelle di mantenimento in quota dei livelli idrici di magra ", ed è normata dagli articoli 29, 32, 38, 38 bis, 39 e 41 delle NdA, qui integralmente richiamate. In particolare si evidenziano i seguenti punti:

art 29 comma 2: Nella Fascia A sono vietate:

- a) le attività di trasformazione dello stato dei luoghi, che modifichino l'assetto morfologico, idraulico, infrastrutturale, edilizio, fatte salve le prescrizioni dei successivi articoli;
- b) la realizzazione di nuovi impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti, l'ampliamento degli stessi impianti esistenti, nonché l'esercizio delle operazioni di smaltimento e recupero dei rifiuti, così come definiti dal D.Lgs. 5 febbraio 1997, n. 22, fatto salvo quanto previsto al successivo comma 3, let. l);
- c) la realizzazione di nuovi impianti di trattamento delle acque reflue, nonché l'ampliamento degli impianti esistenti di trattamento delle acque reflue, fatto salvo quanto previsto al successivo comma 3, let. m);
- d) le coltivazioni erbacee non permanenti e arboree, fatta eccezione per gli interventi di bioingegneria forestale e gli impianti di rinaturazione con specie autoctone, per una ampiezza di almeno 10 m dal ciglio di sponda, al fine di assicurare il mantenimento o il ripristino di una fascia continua di vegetazione spontanea lungo le sponde dell'alveo inciso, avente funzione di stabilizzazione delle sponde e riduzione della velocità della corrente; le Regioni provvederanno a disciplinare tale divieto nell'ambito degli interventi di trasformazione e gestione del suolo e del soprassuolo, ai sensi dell'art. 41 del D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152 e successive modifiche e integrazioni, ferme restando le disposizioni di cui al Capo VII del R.D. 25 luglio 1904, n. 523;
- e) la realizzazione di complessi ricettivi all'aperto;
- f) il deposito a cielo aperto, ancorché provvisorio, di materiali di qualsiasi genere.

Art. 39 comma 3. Nei territori della Fascia A, sono esclusivamente consentite:

le opere relative a interventi di demolizione senza ricostruzione, manutenzione ordinaria e straordinaria, restauro, risanamento conservativo, come definiti all'art. 31, lett. a), b), c) della L. 5 agosto 1978, n. 457, senza aumento di superficie o volume, senza cambiamenti di destinazione d'uso che comportino aumento del carico insediativo e con interventi volti a mitigare la vulnerabilità dell'edificio.

SOTTOCLASSE 4a. Le superfici inserite in tale sottoclasse sono costituite dagli alvei di piena del reticolo idrografico ad esclusione del fiume Adda, e sono soggette alla medesima disciplina della classe 4. Le superfici sono convenzionalmente estese tra i margini dell'alveo inciso, considerando un'ampiezza di 1,5 o 2 m per lato rispetto al segno grafico del canale riportato sulla cartografia di base. Fa eccezione il colo Muzza, per il quale si è considerata la morfologia dell'alveo inciso. Analogamente a quanto realizzato per la sottoclasse 3b, nella cartografia sono stati trascurati quei corsi d'acqua che costituiscono derivazioni di minore importanza, principalmente ad uso delle singole aziende agricole, che a rigore però si intendono sottoposti alla medesima disciplina, almeno sino all'assunzione da parte del comune dei provvedimenti di cui al DGR 25 gennaio 2002 n°7/7868.

SOTTOCLASSE 4b. In tale sottoclasse è collocata la zona di tutela assoluta dei pozzi "*che erogano acqua potabile a terzi mediante impianto di acquedotto che riveste carattere di pubblico interesse*". La superficie interessata è quella compresa entro il raggio di 10 m dall'opera di captazione, che ai sensi

dell'art.94 comma 3 del D.Lgs 152/2006 "*deve essere adeguatamente protetta e adibita esclusivamente ad opere di captazione o presa e ad infrastrutture di servizio.*"

SOTTOCLASSE 4c. Vecchia discarica urbana. Possibili solo interventi di messa in sicurezza e bonifica.

CLASSI COINCIDENTI: criterio di applicazione delle prescrizioni nelle aree interessate da più classi di fattibilità.

Nelle porzioni di territorio dove nella Tavola 5/5 - Carta della Fattibilità - sono indicate più classi di fattibilità sovrapposte, nell'attuazione degli interventi si dovrà tenere conto della condizione più restrittiva prevista, e dovranno essere eseguiti tutti gli approfondimenti tecnici indicati in relazione alle varie problematiche geologiche individuate.

Comune di Castiglione d'Adda - (Lo) Piano di Governo del Territorio - novembre 2021

località	CPT 1/3-08+Pz1			CPT 2/3-08			CPT 3/3-08+Pz2			CPT 1/2 - apr.'97			CPT 2/2 - apr.'97			località	CPT 1/3 - giu.'97			CPT 2/3 - giu.'97			CPT 3/3 - giu.'97			CPT 1/8 - febb.'98			CPT 2/8 - marz.'98			CPT 3/8 - febb.'98				
	n.1	SS 591 - via Cavour		n.2	Loc. Garusa		n.3	Via del Fossone		n.4	via Inconronata - tennis		n.5	via Inconronata - tennis			n.6	SS 591 - Fosso Gorgo		n.7	SS 591 - Fosso Gorgo		n.8	SS 591 - Fosso Gorgo		n.9	Loc. Garusa		n.10	via Inconronata - camp		n.11	via Principe Amedeo			
	coordinate	X = 554632 ; Y = 5008004		coordinate	X = 554844 ; Y = 5006942		coordinate	X = 554173 ; Y = 5006706		coordinate	X = 555005 ; Y = 5007202		coordinate	X = 555009 ; Y = 5007231			coordinate	X = 554806 ; Y = 5007808		coordinate	X = 554737 ; Y = 5007907		coordinate	X = 554721 ; Y = 5007989		coordinate	X = 554745 ; Y = 5006986		coordinate	X = 555100 ; Y = 5007226		coordinate	X = 554721 ; Y = 5007782			
profondità (m)	p.c.=	50.3	s.l.m	p.c.=	61.8	s.l.m	p.c.=	61.9	s.l.m	p.c.=	61.0	s.l.m	p.c.=	61.0	s.l.m	p.c.=	50.8	s.l.m	p.c.=	50.0	s.l.m	p.c.=	48.3	s.l.m	p.c.=	61.4	s.l.m	p.c.=	62.0	s.l.m	p.c.=	58.4	s.l.m			
	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²	q _c	Rt	f _s Kg/cm ²			
0.2								0.67			1.53		1.80		0.2		0.73		2.00															2.47		
0.4					20	23	0.67		18	28	0.80		61	84	2.20		61	88	2.67		51	62	0.87		76	106	2.00		97	134	2.47		82	108	2.53	
0.6			1.13		25	35	0.93		16	28	0.73		35	68	1.33		20	60	2.00		39	52	1.60		80	110	2.00		53	79	1.40		42	80	1.80	
0.8			0.67		33	47	0.60		15	26	0.50		19	39	1.33		18	48	0.93		25	49	2.47		86	86	2.27		51	72	1.20		25	52	2.40	
1	25	42	1.00		26	35	0.67		8	16	0.33		20	40	1.53		24	38	1.20		1	30	67	1.53		27	61	2.07		42	60	0.80		22	58	1.47
1.2	30	45	0.47		26	36	0.73		6	11	0.20		18	41	1.13		23	41	1.00		1.2	39	62	1.13		33	64	1.87		39	51	0.80		21	43	1.40
1.4	28	35	0.40		24	35	0.93		5	8	0.27		19	36	1.00		22	37	0.80		1.4	29	46	0.80		45	73	1.20		41	53	1.13		21	42	0.60
1.6	25	31	0.60		32	46	1.07		3	7	0.27		17	32	1.13		22	34	1.33		1.6	29	41	0.80		39	57	0.73		38	55	0.80		25	34	0.93
1.8	26	35	0.93		33	49	1.67		4	8	0.27		27	44	0.93		22	42	1.40		1.8	33	45	0.80		29	40	0.73		45	57	1.00		27	41	1.13
2	32	46	1.00		50	75	1.87		3	7	0.20		33	47	1.40		34	55	1.53		2	38	50	1.13		26	37	0.53		37	52	0.93		26	43	1.33
2.2	41	56	1.60		90	118	3.20		3	6	0.67		56	77	2.27		70	93	2.87		2.2	33	50	1.00		23	31	0.73		23	37	0.67		53	73	2.27
2.4	25	49	1.40		94	142	2.80		44	54	0.67		85	119	3.07		76	119	3.13		2.4	45	60	1.33		25	36	0.93		26	36	0.67		69	103	4.00
2.6	41	62	1.07		102	144	4.27		88	98	2.20		88	134	3.13		80	127	2.47		2.6	48	68	0.60		34	48	1.00		23	33	0.53		103	163	3.33
2.8	63	79	1.40		96	160	4.20		76	109	2.13		75	122	3.67		66	103	3.00		2.8	63	72	1.73		40	55	1.07		27	35	0.93		101	151	2.93
3	63	84	1.33		94	157	4.00		117	149	3.00		56	111	3.13		53	98	1.27		3	84	110	1.87		58	74	1.07		36	50	0.67		101	145	3.33
3.2	57	77	1.73		75	135	3.73		134	179	2.60		37	84	1.80		37	56	2.33		3.2	92	120	2.00		64	80	1.40		143	153	0.93		129	179	3.00
3.4	53	79	0.80		73	129	1.07		135	174	5.60		85	112	3.07		72	107	2.00		3.4	86	116	2.40		82	103	2.00		99	133	4.07		124	169	4.27
3.6	43	55	1.20		73	89	0.60		164	248	2.60		95	141	1.60		84	114	0.60		3.6	80	116	1.67		104	134	1.00		138	199	6.07		86	150	2.73
3.8	32	50	1.00		59	188	2.73		129	168	2.07		115	173	2.47		82	136	2.00		3.8	67	92	2.07		62	77	1.73		306	397	6.13		67	108	2.27
4	55	70	1.00		88	129	2.33		140	171	2.80		87	124	2.67		104	134	2.87		4	75	106	2.20		38	64	1.40		226	318	2.40		72	106	2.67
4.2	60	75	0.73		84	119	2.60		106	148	2.40		47	87	2.47		51	94	2.33		4.2	64	97	1.60		42	63	2.20		147	183	4.87		67	107	0.87
4.4	80	91	1.13		81	120	1.60		92	128	2.00		72	109	1.67		28	63	0.60		4.4	69	93	1.80		45	78	1.80		224	297	5.20		155	168	3.20
4.6	77	94	2.00		69	93	1.67		129	159	2.53		63	88	2.73		114	123	2.53		4.6	51	78	1.33		71	98	0.93		313	391	6.73		123	171	3.60
4.8	53	83	2.00		65	90	1.67		112	150	2.73		64	105	1.60		66	104	2.80		4.8	69	89	1.87		173	187	1.00		317	418			70	124	1.53
5	117	147	10.00		71	96	1.40		113	154	2.00		50	74	3.87		81	123	2.93		5	47	75	2.53		83	98	1.20		500				56	79	2.07
5.2	350	500			70	91	1.53		107	137	2.60		57	115	1.93		71	115	2.47		5.2	78	116	3.27		56	74	0.87		66	97	3.87		94	124	2.93
5.4					60	83	1.73		136	175	2.80		90	119	4.67		54	91	1.87		5.4	176	225	0.73		46	59	1.20		74	132	3.80		101	115	2.73
5.6					21	47	1.13		159	201	3.53		56	126	2.87		111	139	4.33		5.6	110	121	2.00		41	59	1.13		92	149	5.00		65	106	2.27
5.8					28	45	1.07		179	232	3.40		59	102	3.40		133	198	3.87		5.8	59	89	2.07		69	86	4.33		73	148	4.33		78	112	5.33
6					46	62	0.93		118	177	2.87		158	209	4.27		184	242	6.40		6	60	91	2.53		88	153	4.40		68	133	3.33		120	200	4.60
6.2					32	65	1.27		138	181	3.67		171	235	5.40		138	234	4.80		6.2	98	136	2.13		237	303	2.53		51	101	2.67		101	170	4.60
6.4					60	74	1.27		142	197	3.47		158	239	5.20		103	175	2.60		6.4	80	112	2.53		99	137	4.87		83	123	1.60		114	183	4.00
6.6					54	73	2.40		130	182	2.60		156	234	4.47		192	231	4.73		6.6	270	308	0.67		88	161	4.00		69	93	3.60		134	194	2.87
6.8					49	85	0.93		116	155	3.40		165	232	4.00		173	244	4.87		6.8	207	217	1.87		141	201	4.20		77	131	2.67		176	219	3.20
7					65	79	1.80		131	182	3.20		176	236	5.73		197	270	5.20		7	92	120	1.20		131	194	3.40		66	106	4.53		189	237	4.40
7.2					70	97	3.93		158	206	3.13		140	226	4.87		176	254	5.93		7.2	145	163	2.73		86	137	3.73		58	126	3.20		148	214	4.00
7.4					47	106	1.80		163	210	4.33		148	221	4.07		131	220	3.60		7.4	70	111	3.00		95	151	1.40		47	95	3.67		171	231	4.67
7.6					50	77			156	221	3.87		165	226	4.00		172	226	5.07		7.6	96	141	1.47		110	131	1.87		51	106	3.93		174	244	4.93
7.8					209	267	4.47		168	228	4.80		159	235	5.40		159	235	5.40		7.8	89	111	2.33		99	127			56	115	2.53		237	311	7.47
8					241	308	2.20		175	247	5.87		179	260	6.13		179	260	6.13		8	83	118							49	87	1.80		232	344	
8.2					209	242	4.67		219	307	6.27		199	291	4.60		199	291	4.60		8.2									15	42	1.60				
8.4																																				

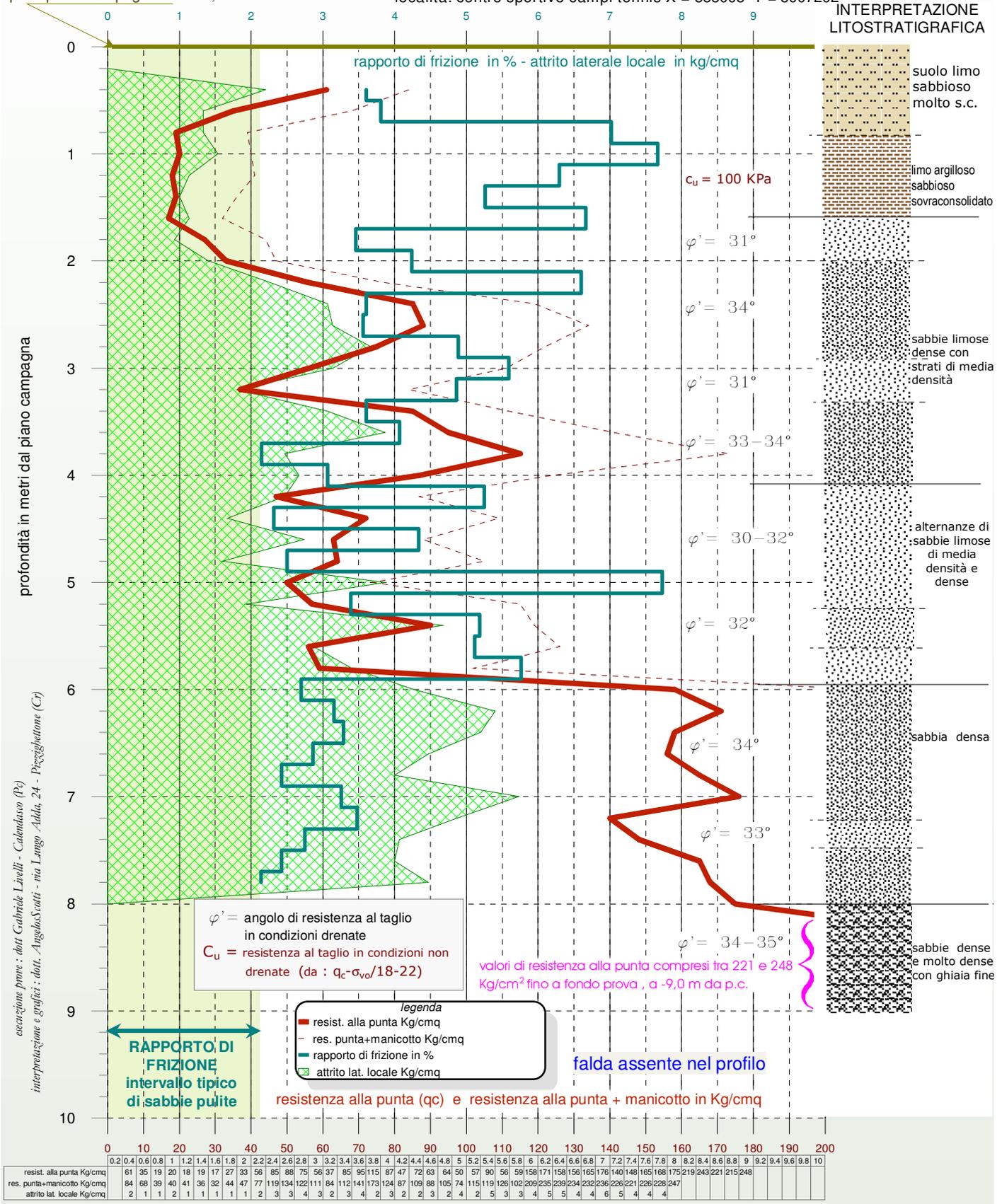
Comune di Castiglione d'Adda - (Lo) Piano di Governo del Territorio - novembre 2021

località	CPT 4/8 - febb.'98			CPT 5/8 - febb.'98			CPT 6/8 - febb.'98			CPT 7/8 - febb.'98			CPT 8/8 - febb.'98			località	CPT 1/2 - magg.'01			CPT 2/2 - magg.'01			CPT 1/2 - aprile'06			CPT 2/2 - aprile'06			CPT 1/3 - giugno'06			CPT 2/3 - giugno'06			CPT 3/3 - giugno'06					
	n.12 Chiesa San Bernardini			n.13 via Mattei			n.14 via XXII Marzo			n.15 Garusa (sud)			n.16 via Enrico Fermi				n.17 via Papa Giovanni			n.18 via Papa Giovanni			n.19 via Roma			n.20 via Roma			n.21 v. Princ. Amedeo - v. (...)			n.22 v. Princ. Amedeo - v. (...)			n.23 v. Princ. Amedeo - v. (...)					
	X = 554003 ; Y = 5007409			X = 553695 ; Y = 5006847			X = 554292 ; Y = 5006860			X = 554685 ; Y = 5006782			X = 554013 ; Y = 5007671				X = 554852 ; Y = 5007268			X = 554868 ; Y = 5007274			X = 554596 ; Y = 5007198			X = 554631 ; Y = 5007208			X = 554632 ; Y = 5007803			X = 554679 ; Y = 5007778			X = 554628 ; Y = 5007763					
coordinate	p.c.= Qc	55.9 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	62.2 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	62.5 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	61.5 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	51.9 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	profondità (m)	p.c.= Qc	61.7 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	61.7 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	62.0 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	62.0 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	57.1 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	57.1 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²	p.c.= Qc	57.0 Rt	s.l.m f _s Kg/cm ²			
0.2																0.2			1.13			0.27			2.20			2.87			1.47			0.47			1.87			
0.4	89	96	riporto	riporto			riporto			15	20	0.33	27	47	1.60	0.4	28	46	1.07	16	20	0.87	55	68	4.20	55	98	1.13	39	61	0.67	22	29	0.47	32	60	0.67			
0.6	54	98	riporto	riporto	3.47		riporto	1.53		19	29	0.73	25	49	1.00	0.6	25	41	1.00	28	41	1.27	58	121	0.93	32	49	0.13	41	51	0.67	33	40	0.60	40	50	1.27			
0.8	34	67	0.87	25	77	2.13	95	118	5.20	8	19	0.67	41	56	1.13	0.8	17	32	0.60	16	35	1.00	25	39	0.20	43	45	1.53	54	64	0.93	55	64	0.93	60	79	0.87	60	79	0.87
1	18	31	1.40	34	66	2.87	86	164	4.53	12	22	0.60	25	42	0.87	1	23	32	0.87	18	33	0.87	28	31	0.33	47	70	1.40	65	79	0.87	60	74	1.47	55	68	1.33			
1.2	52	73	0.87	47	90	3.60	49	117	4.07	16	25	0.60	21	34	0.67	1.2	18	31	0.60	21	34	1.00	23	28	0.53	36	57	0.60	54	67	1.13	59	81	0.13	46	66	2.07			
1.4	13	26	1.80	99	153	3.80	69	130	3.80	24	33	0.53	19	29	0.47	1.4	15	24	0.53	25	40	1.07	14	22	1.27	45	54	0.73	53	70	1.20	79	81	2.53	75	106	0.87			
1.6	52	79	1.20	114	171	5.13	99	156	4.93	23	31	0.67	16	23	0.47	1.6	14	22	0.47	20	36	1.27	20	39	0.40	40	51	0.80	53	71	2.00	60	98	4.33	70	83	1.13			
1.8	42	60	0.73	122	199	5.67	75	149	4.07	24	34	0.60	14	21	0.27	1.8	17	24	0.93	25	44	1.20	33	39	0.53	40	52	0.87	118	148	3.73	115	180	1.87	60	77	2.00			
2	13	24	0.53	99	184	5.40	80	141	3.27	23	32	0.47	12	16	0.40	2	18	32	1.07	20	38	1.27	33	41	0.53	33	46	0.47	111	167	3.20	160	188	2.87	73	103	2.33			
2.2	15	23	0.47	71	152	4.47	85	134	2.73	22	29	0.53	7	13	0.40	2.2	32	48	1.60	23	42	1.67	32	40	0.47	29	36	2.40	101	149	2.13	102	145	1.73	70	105	3.00			
2.4	17	24	0.40	76	143	5.07	84	125	2.87	18	26	0.40	4	10	0.27	2.4	69	93	1.20	39	64	1.13	28	35	0.33	24	60	0.73	120	152	2.87	118	144	1.53	84	129	1.33			
2.6	17	23	0.27	95	171	5.47	91	134	2.73	15	21	0.33	7	11	0.20	2.6	107	125	4.00	79	96	2.47	21	26	0.27	36	47	0.93	84	127	2.13	100	123	2.27	89	109	0.53			
2.8	12	16	0.13	62	144	3.13	86	127	2.87	14	19	0.20	6	9	0.07	2.8	82	142	2.13	77	114	1.73	18	22	0.27	70	84	0.87	85	117	1.60	97	131	2.13	74	82	2.33			
3	12	14	0.27	114	161	5.87	94	137	2.53	9	12	0.40	13	14	0.33	3	77	109	1.93	72	98	2.13	18	22	0.33	82	95	2.20	85	109	1.80	88	120	0.87	68	100	1.33			
3.2	10	14	0.73	133	221	5.60	120	158	3.27	10	16	0.47	5	10	0.27	3.2	63	92	2.20	56	88	1.53	21	26	0.93	70	103	1.40	83	110	2.40	121	134	1.80	62	82	0.80			
3.4	17	28	1.00	149	233	5.40	103	152	0.73	30	37	1.27	5	9	0.20	3.4	40	73	2.40	47	70	2.60	26	40	0.33	84	105	0.47	127	163	2.67	160	187	1.40	66	78	0.67			
3.6	20	35	0.47	166	247	5.60	130	141	2.93	47	66	0.40	4	7	0.20	3.6	95	131	3.33	32	71	1.60	16	21	0.20	109	116	0.60	155	195	1.53	201	222	1.87	69	79	0.40			
3.8	85	92	2.67	113	197	3.47	75	119	1.67	45	57	1.20	6	9	0.27	3.8	110	160	2.40	76	100	2.33	14	17	0.80	97	106	1.00	177	200	2.00	133	161	1.93	77	83	2.40			
4	86	126	2.20	138	190	3.33	86	111	1.93	41	59	1.40	7	11	0.20	4	109	145	1.80	91	126	1.73	20	32	0.80	114	129	1.33	200	230	3.00	112	141	0.67	103	139	1.87			
4.2	76	109	2.00	118	168	2.87	64	93	1.80	60	81	1.80	5	8	0.87	4.2	99	126	2.07	72	98	1.27	23	35	0.73	93	113	1.40	164	209	4.40	130	140	1.20	115	143	1.40			
4.4	83	113	2.80	102	145	2.20	60	87	1.40	70	97	1.87	40	53	0.67	4.4	43	74	2.13	41	60	2.27	43	54	1.53	96	117	0.40	141	207	3.27	181	199	3.27	118	139	1.13			
4.6	123	165	1.93	105	138	3.80	49	70	2.00	66	94	1.93	45	55	0.87	4.6	43	75	1.93	36	70	2.20	66	89	2.20	93	99	2.40	154	203	4.80	144	193	3.40	123	140	1.67			
4.8	101	130	2.60	135	192	1.87	62	92	1.87	52	81	2.73	25	38	0.33	4.8	67	96	2.33	56	89	2.93	98	134	3.67	78	114	1.67	145	217	5.47	156	207	3.40	137	162	2.80			
5	82	121	1.40	109	137	4.60	80	108	2.07	38	79	2.20	32	37	0.93	5	82	117	4.87	57	101	1.87	63	118	2.87	79	104	1.00	164	246	5.00	130	181	2.60	142	184	2.67			
5.2	83	104	2.33	127	196	3.93	58	89	0.73	60	93	2.93	128	142	1.40	5.2	115	188	3.73	52	80	2.47	60	103	4.67	106	121	3.07	154	229	8.07	174	213	4.13	110	150	4.40			
5.4	61	96	1.40	118	177	4.20	119	130	1.93	60	104	2.73	143	164	1.87	5.4	96	152		48	85	2.33	48	118	1.47	40	86	1.07	147	268	7.07	134	196	2.40	146	212	0.60			
5.6	94	115	2.80	138	201	3.47	107	136	2.40	61	102	2.33	206	234	3.80	5.6	67	102	3.27	67	102	3.27	80	102	1.40	80	96	2.07	174	280	1.13	122	158	3.07	79	88	0.40			
5.8	119	161	2.13	177	229	8.60	88	124	2.73	51	86	2.13	235	292	2.07	5.8	144	193	3.40	68	89		68	89		53	84	1.87	184	201	1.93	122	168	3.53	84	90	2.53			
6	107	139	3.00	118	247	4.47	103	144	3.40	31	63	1.93	287	318	0.47	6	156	207	3.40	156	207	3.40	43	71	3.00	43	71	3.00	159	188	1.47	154	207	5.53	121	159	2.67			
6.2	113	158	2.33	169	236	4.13	114	165	2.93	56	85	2.13	311	318	3.33	6.2	130	181	2.60	130	181	2.60	34	79	2.47	174	196	8.20	139	222	3.53	127	167	3.80						
6.4	108	143	4.47	132	194	3.33	131	175	3.53	73	105	1.60	350	400	6.67	6.4	174	213	4.13	174	213	4.13	53	90	2.00	165	288	1.87	225	278	1.60	113	170							
6.6	119	186	3.20	111	161	2.47	138	191	3.33	50	74	2.13	300	400		6.6	134	196	2.40	134	196	2.40	85	115	3.67	149	177	1.53	225	249										

prova penetrom. statica (CPT) n° 1/2 - apr. '97

data esecuzione delle prove : aprile 1997
 località: centro sportivo campi tennis X = 555005 Y = 5007202

quota piano campagna = ca 61,0 m s.l.m.

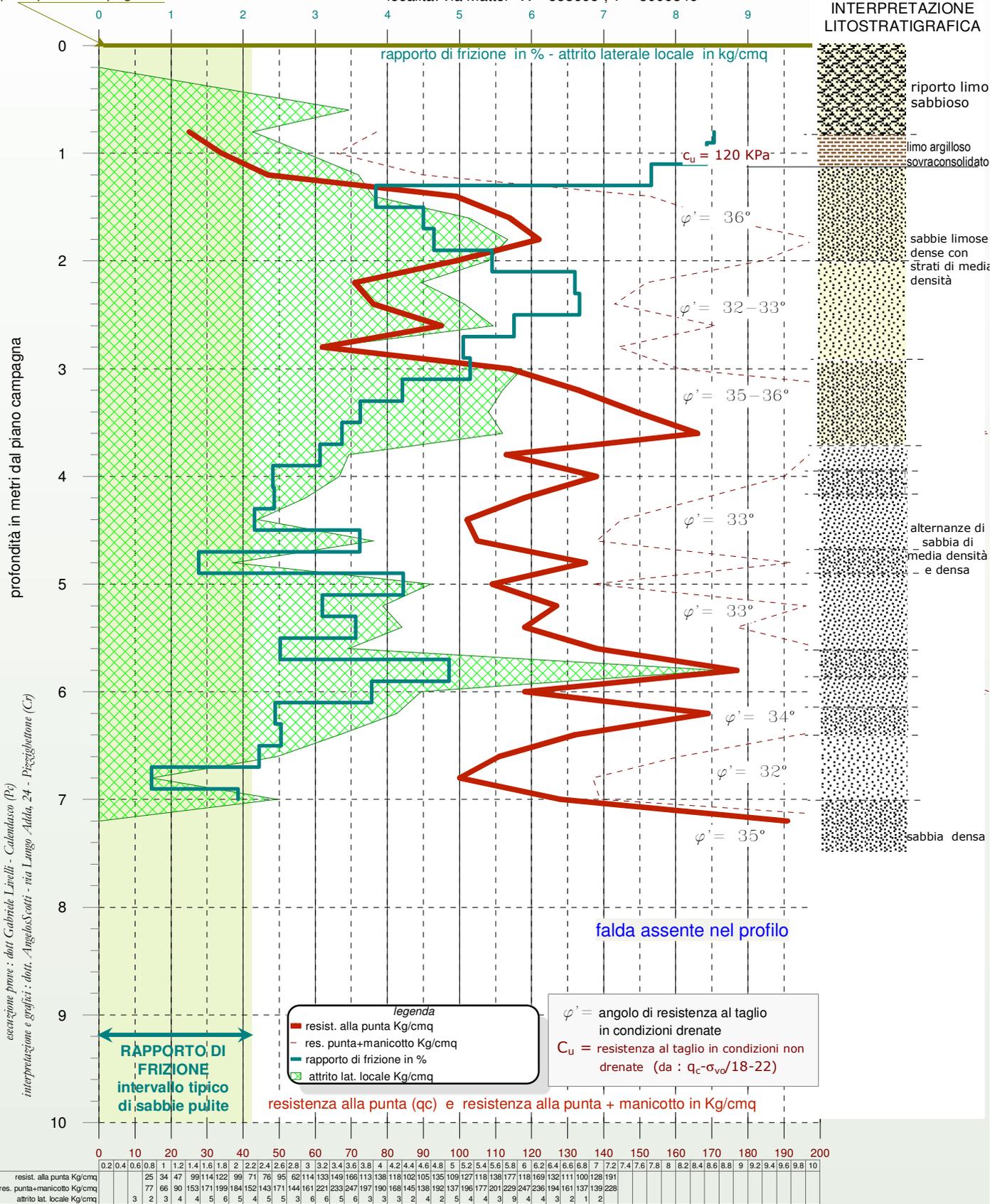


esecuzione prove : dott. Gabriele Livelli - Caldasco (Pv)
 interpretazione e grafici : dott. Angelo Scotti - via Lungo Adda, 24 - Poggiateore (Cr)

prova penetr.statica (CPT) n° 5/8 - febb. '98

data esecuzione delle prove : febbraio 1998
 località: via Mattei X = 553695 ; Y = 5006846

quota piano campagna = ca 62,2 m s.l.m.



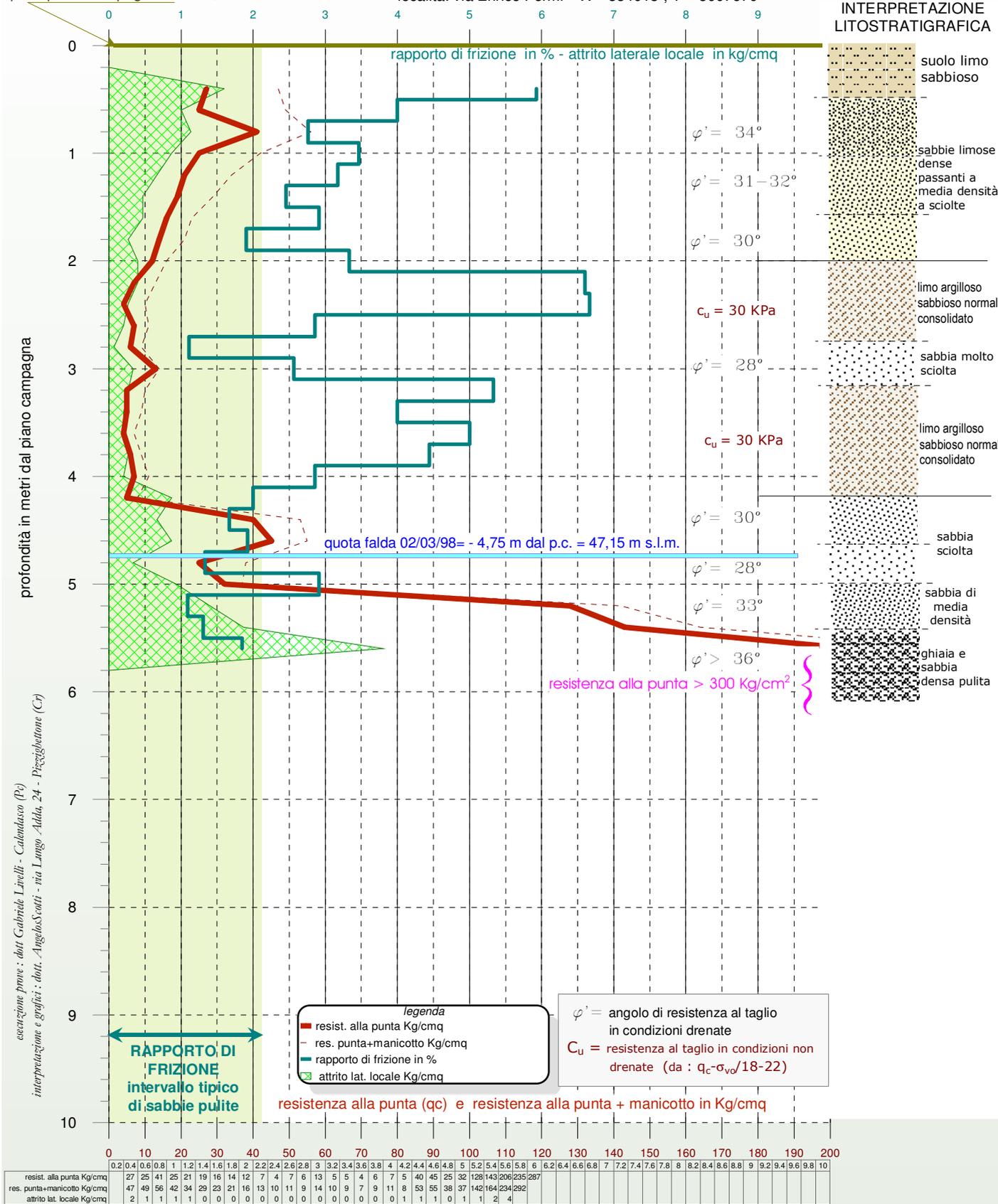
resist. alla punta Kg/cm ²	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8	5	5,2	5,4	5,6	5,8	6	6,2	6,4	6,6	6,8	7	7,2	7,4	7,6	7,8	8	8,2	8,4	8,6	8,8	9	9,2	9,4	9,6	9,8	10
res. punta+manicotto Kg/cm ²		25	34	47	99	114	122	99	71	76	95	62	114	133	149	166	113	138	118	102	105	135	109	127	118	138	177	118	169	132	111	100	128	191																
attrito lat. locale Kg/cm ²	3	2	3	4	4	5	6	5	4	5	5	3	6	6	5	6	3	3	3	2	4	2	5	4	4	3	9	4	4	3	2	1	2																	

prova penetr. statica (CPT) n° 8/8 - febr. '98

data esecuzione delle prove : febbraio 1998

località: via Enrico Fermi X = 554013 ; Y = 5007670

quota piano campagna = ca 51,9 m s.l.m.



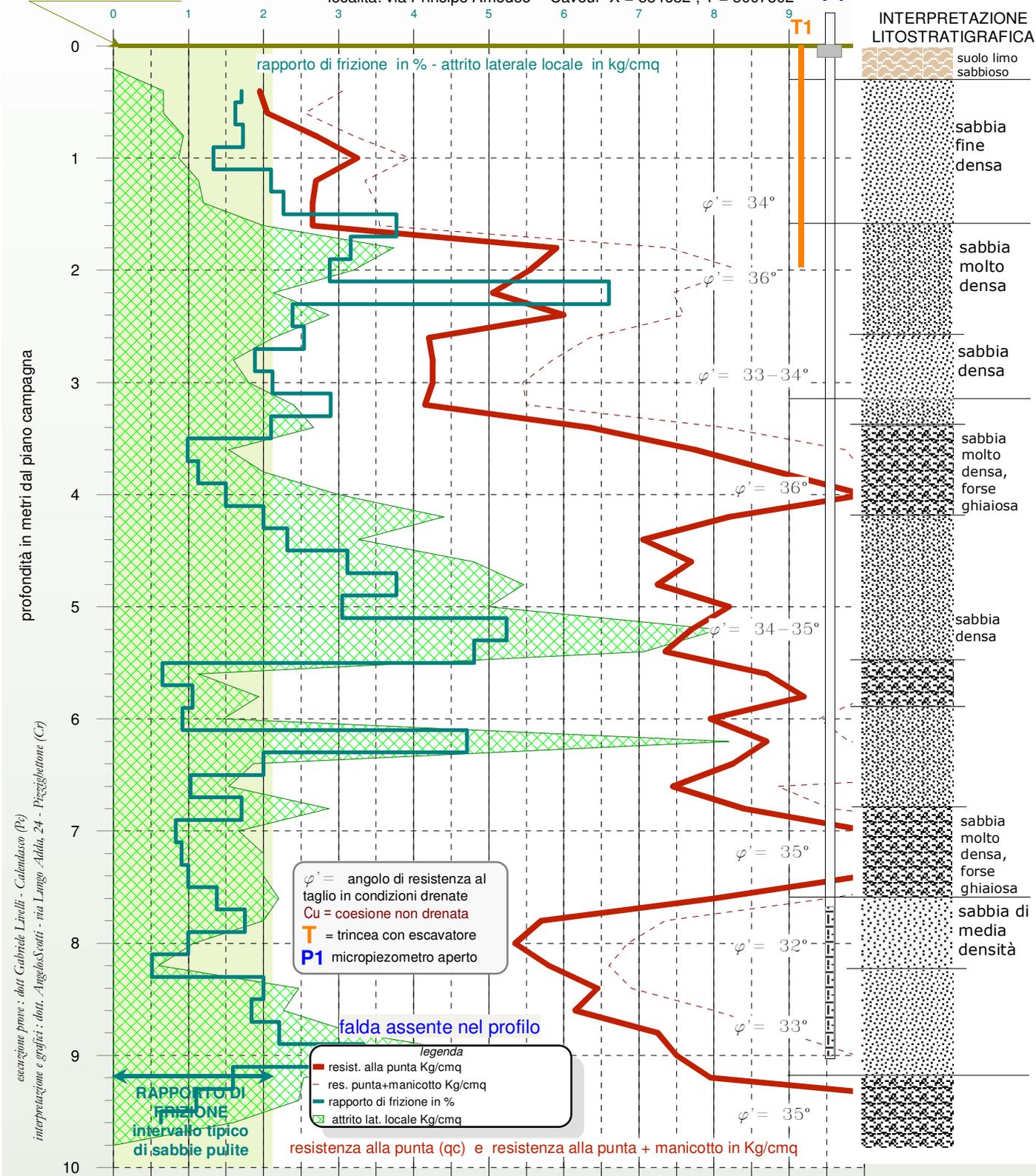
prova penetr.statica (CPT) n° 1/3 - giugno '06

data esecuzione delle prove : giugno 2006

località: via Principe Amedeo - Cavour X = 554632 ; Y = 5007802

P1

quota piano campagna = ca 57,1 m s.l.m.



profondità in metri dal piano campagna

esecuzione prove : dott. Gabriele Lanelli - Caldasio (Pv)
interpretazione e grafici : dott. Angelo Scotti - via Lungo Adda, 24 - Poggiatestone (Cr)

ϕ' = angolo di resistenza al taglio in condizioni drenate
Cu = coesione non drenata
T = trincea con escavatore
P1 micropiezometro aperto

legenda
 ■ resist. alla punta Kg/cm²
 - res. punta+manicotto Kg/cm²
 ■ rapporto di frizione in %
 ▨ attrito lat. locale Kg/cm²

resistenza alla punta (qc) e resistenza alla punta + manicotto in Kg/cm²

RAPPORTO DI FRIZIONE intervallo tipico di sabbie pulite

falda assente nel profilo

resist. alla punta Kg/cm ²	39	41	54	65	54	53	118	111	101	120	84	85	85	83	127	155	177	200	164	141	154	145	164	154	147	174	184	159	174	165	149	168	201	220	200	160	114	107	116	129	123	145	150	159	223	253	242	
res. punta+manicotto Kg/cm ²	61	51	64	79	67	70	71	148	167	149	152	127	117	109	110	163	195	200	230	209	207	203	217	246	229	268	280	201	188	196	288	177	191	244	245	230	190	147	137	132	138	160	179	198	234	261	290	266
attrito lat. locale Kg/cm ²	1	1	1	1	1	1	2	4	3	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	3	4	3	5	5	5	8	7	1	2	1	8	2	2	3	2	2	2	2	2	1	2	2	3	5	3	2	2	

RELAZIONE GEOLOGICA PER IL PGT - 2021

prove eseguite per altre indagini (edilizia commerciale)

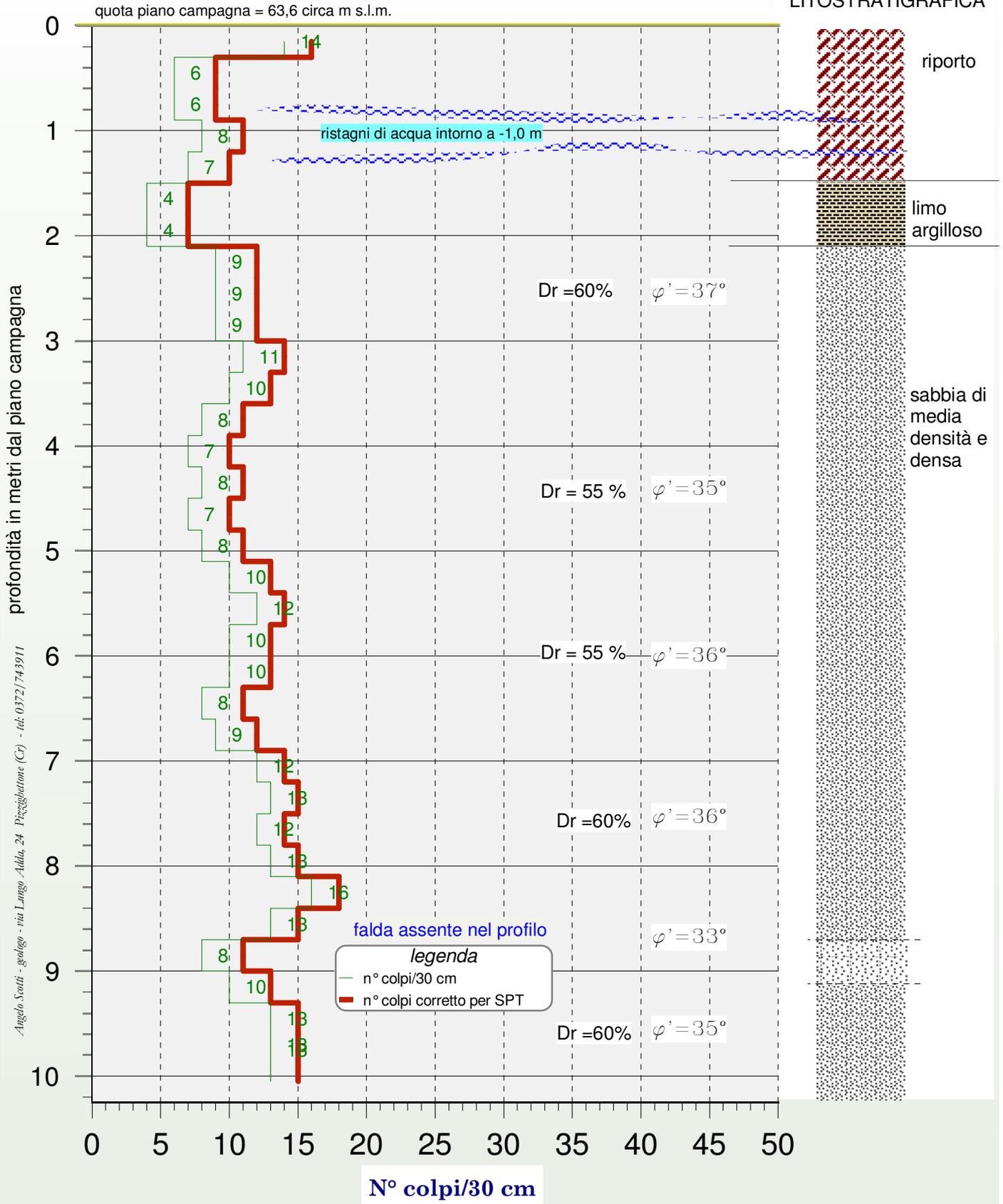
prova penetrometrica SCPT

1/2 - marzo '98

data di esecuzione prove : marzo 1998

località : via Apollo X = 553951 ; Y = 5007009

INTERPRETAZIONE LITOSTRATIGRAFICA



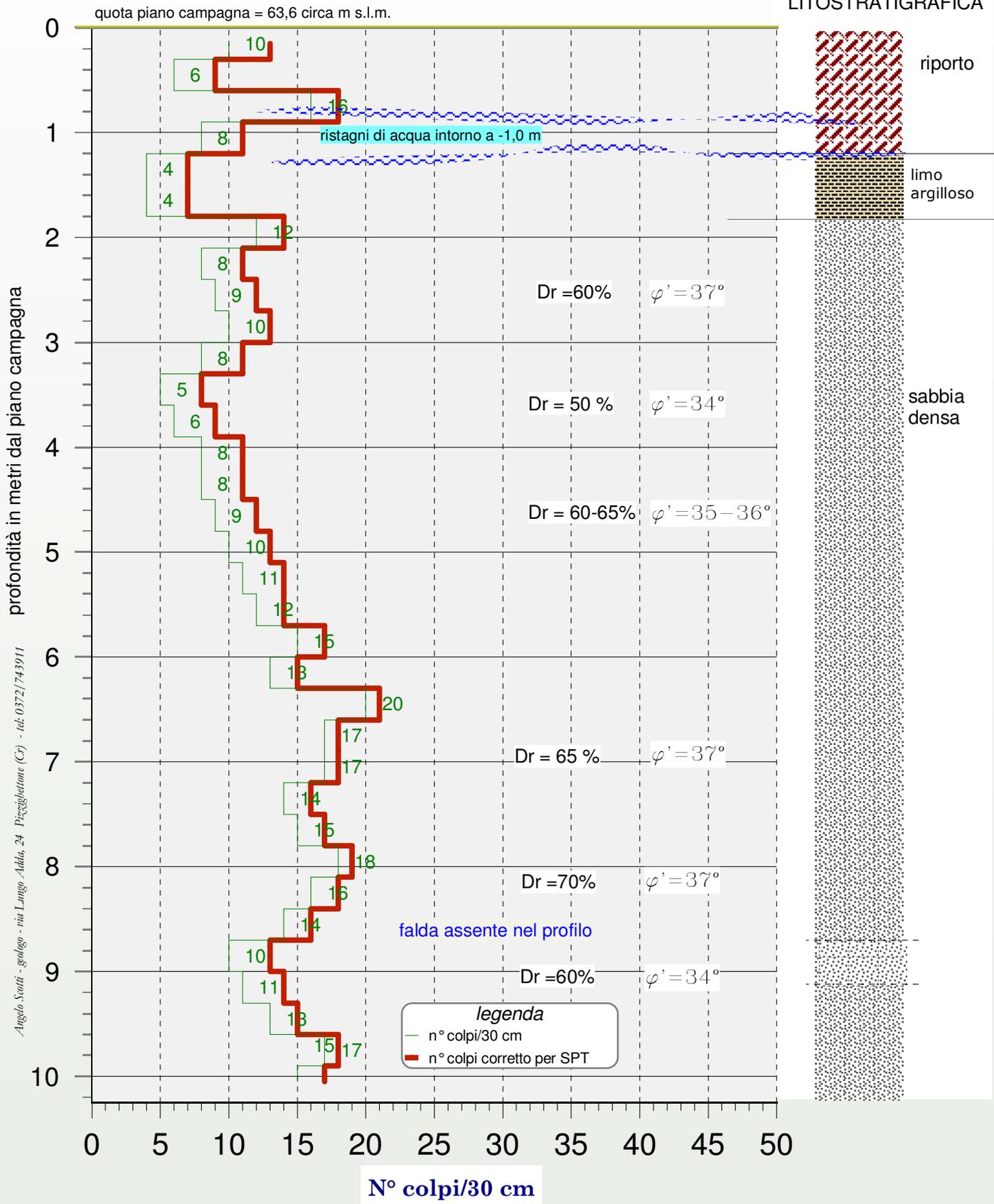
Angelo Scotti - geologo - via Lungo Adda, 24 - Piacchettone (Cr) - tel. 0372/743911

prova penetrometrica SCPT **2/2 - marzo '98**

data di esecuzione prove : marzo 1998

località : via Apollo X = 553973; Y = 5006994

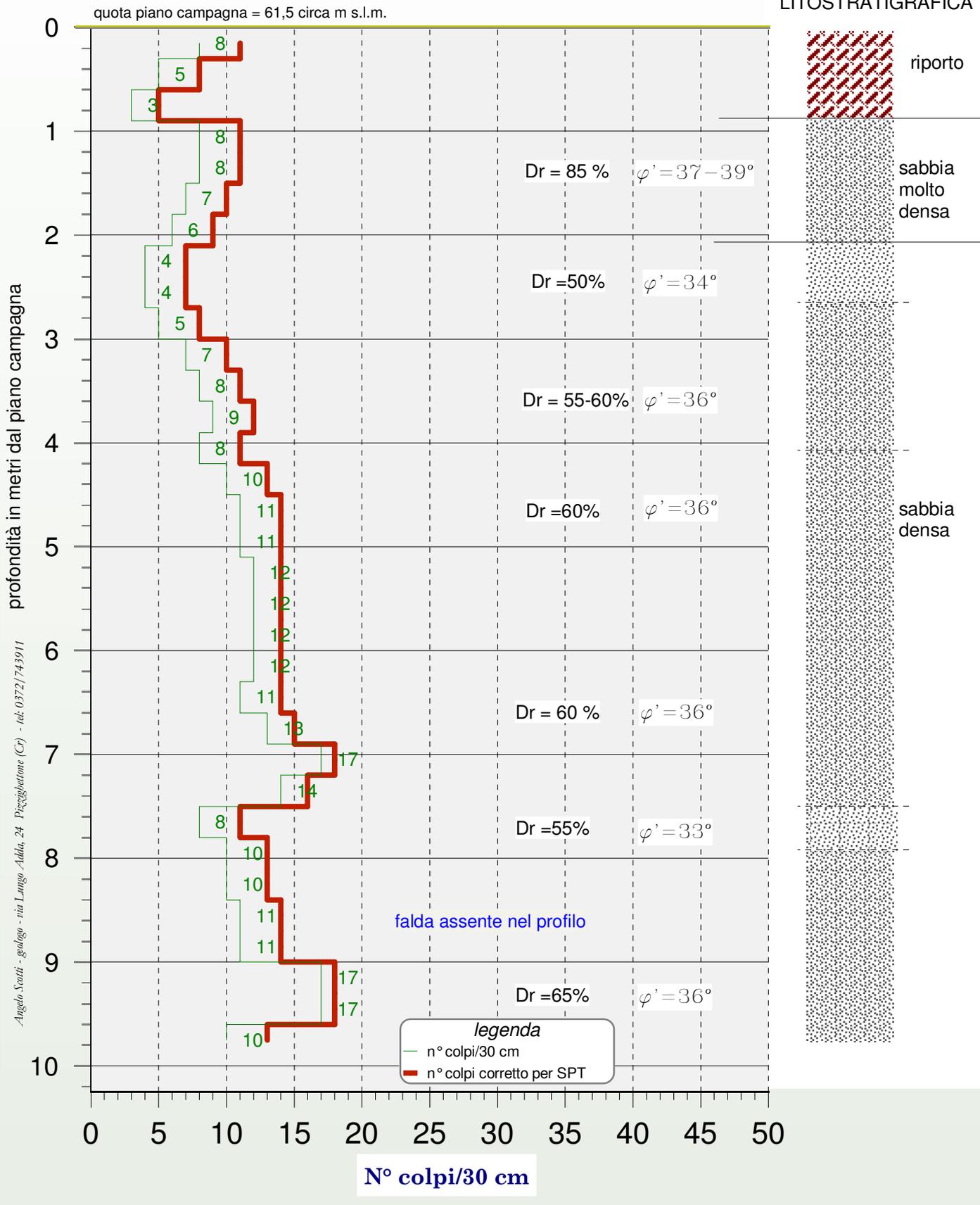
INTERPRETAZIONE
LITOSTRATIGRAFICA



data di esecuzione prove : agosto 2007

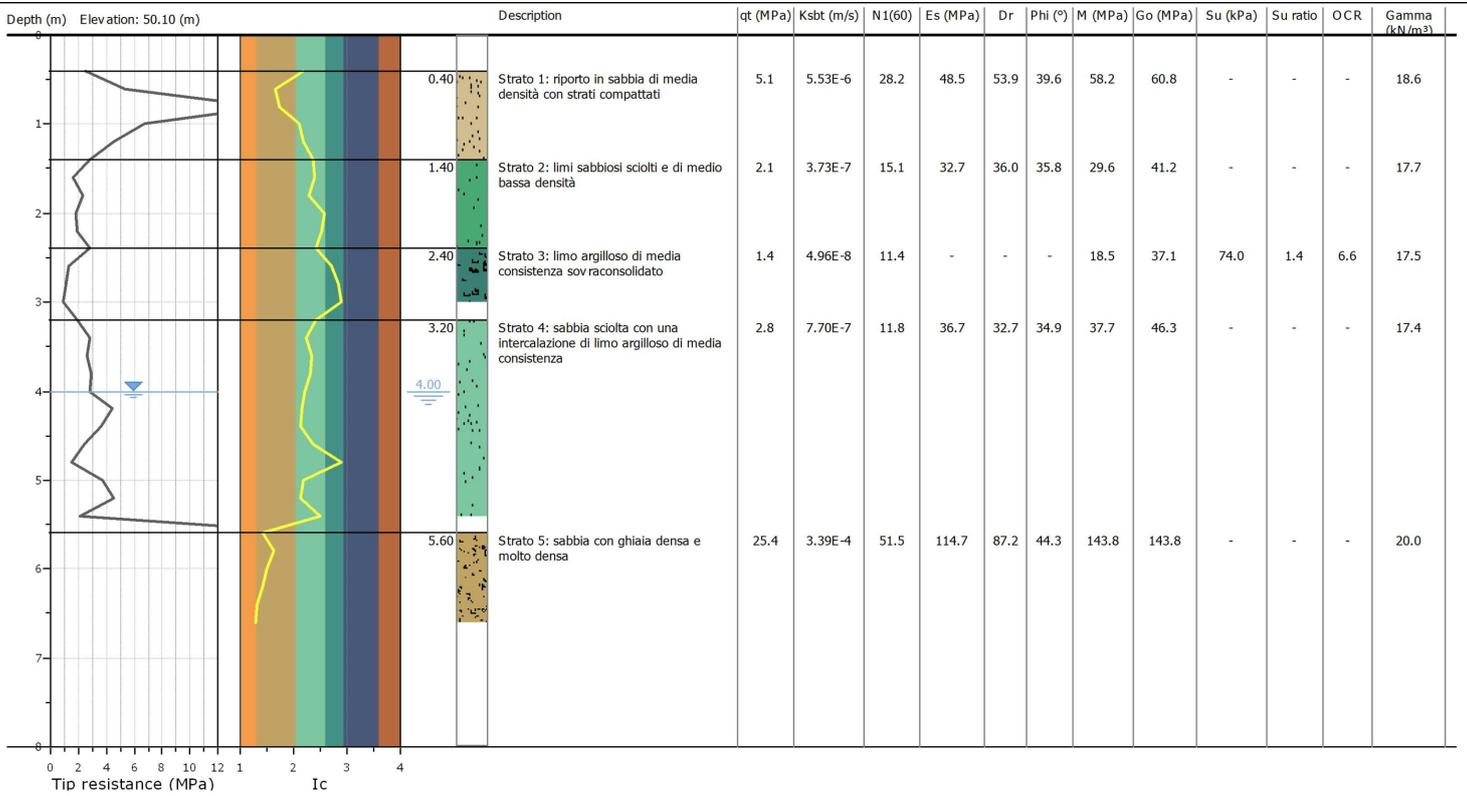
località: Via Mattei-v. Pertini X = 553862; Y = 5006812 TERPRETAZIONE

LITOSTRATIGRAFICA



Location: Castiglione d'Adda

Cone Operator: Barbieri Marco



In situ data										Basic output data										
Depth (m)	qc (MPa)	fs (kPa)	u (kPa)	Other	qt (MPa)	Rf (%)	SBT	Ic SBT	γ (kN/m ³)	σ_{v0} (kPa)	u0 (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	Q1	Fr (%)	Bq	SBTn	n	Cn	Ic	Qtn
0.4	2.5	29.7	0	0	2.5	1.19	5	2.45	17.2	6.9	0	6.9	361.5	1.2	0	5	0.69	2	2.2	49.9
0.6	5.3	20.8	0	0	5.3	0.39	6	1.93	17.1	10.3	0	10.3	512.6	0.4	0	6	0.49	2	1.66	105.8
0.8	15.5	255.4	0	0	15.5	1.65	6	1.93	20.4	14.4	0	14.4	1075.2	1.6	0	6	0.52	2	1.74	309.7
1	6.8	166.3	0	0	6.8	2.45	5	2.3	19.6	18.3	0	18.3	370.1	2.5	0	5	0.66	2	2.09	135.6
1.2	4.5	104	0	0	4.5	2.31	5	2.41	18.9	22.1	0	22.1	202.6	2.3	0	5	0.7	2	2.2	89.6
1.4	2.8	71.3	0	0	2.8	2.55	4	2.6	18.3	25.8	0	25.8	107.7	2.6	0	5	0.77	2	2.37	55.5
1.6	1.6	20.8	0	0	1.6	1.3	4	2.63	16.7	29.1	0	29.1	54	1.3	0	5	0.77	2	2.39	31.4
1.8	2.3	32.7	0	0	2.3	1.42	5	2.52	17.3	32.6	0	32.6	69.6	1.4	0	5	0.73	2	2.28	45.3
2	1.8	56.6	0	0	1.8	3.14	4	2.81	17.9	36.1	0	36.1	48.8	3.2	0	4	0.85	2	2.58	35.3
2.2	1.9	52.3	0	0	1.9	2.75	4	2.75	17.8	39.7	0	39.7	46.9	2.8	0	4	0.83	2	2.53	37.2
2.4	2.8	78.4	0	0	2.8	2.8	4	2.63	18.4	43.4	0	43.4	63.6	2.8	0	5	0.79	1.94	2.42	53.5
2.6	1.3	43.6	0	0	1.3	3.35	3	2.94	17.4	46.9	0	46.9	26.7	3.5	0	4	0.91	1.99	2.72	25
2.8	1.1	43.6	0	0	1.1	3.96	3	3.04	17.4	50.3	0	50.3	20.9	4.2	0	3	0.96	1.93	2.84	20.3
3	0.9	30.5	0	0	0.9	3.39	3	3.07	16.9	53.7	0	53.7	15.8	3.6	0	3	0.98	1.84	2.89	15.5
3.2	1.9	23.8	0	0	1.9	1.25	4	2.56	16.9	57.1	0	57.1	32.3	1.3	0	5	0.8	1.56	2.41	20.8
3.4	2.8	26.7	0	0	2.8	0.95	5	2.36	17.2	60.5	0	60.5	45.3	1	0	5	0.73	1.44	2.23	39.5
3.6	2.6	35.6	0	0	2.6	1.37	5	2.47	17.5	64	0	64	39.6	1.4	0	5	0.78	1.42	2.35	35.9
3.8	2.9	35.6	0	0	2.9	1.23	5	2.4	17.5	67.5	0	67.5	42	1.3	0	5	0.76	1.35	2.3	38.2
4	2.8	20.8	0	0	2.8	0.74	5	2.3	16.9	70.9	0	70.9	38.5	0.8	0	5	0.73	1.29	2.22	35.1
4.2	4.4	47.5	1.96	0	4.4	1.08	5	2.22	18	74.5	2	72.5	59.7	1.1	0	5	0.7	1.25	2.15	54.2
4.4	3.6	26.7	3.92	0	3.6	0.74	5	2.21	17.3	77.9	3.9	74	47.6	0.8	0	5	0.7	1.23	2.14	43.5
4.6	2.4	26.7	5.89	0	2.4	1.11	5	2.45	17.1	81.4	5.9	75.5	30.7	1.2	0	5	0.8	1.25	2.38	29
4.8	1.5	65.3	7.85	0	1.5	4.35	3	2.96	18	84.9	7.8	77.1	18.4	4.6	0	3	0.99	1.29	2.9	18.3
5	3.7	32.7	9.81	0	3.7	0.88	5	2.24	17.5	88.4	9.8	78.6	46	0.9	0	5	0.72	1.19	2.18	43
5.2	4.5	44.6	11.77	0	4.5	0.99	5	2.19	17.9	92	11.8	80.3	55	1	0	5	0.71	1.17	2.14	51.5
5.4	2.1	26.7	13.73	0	2.1	1.27	5	2.53	17.1	95.4	13.7	81.7	24.6	1.3	0	5	0.84	1.18	2.49	23.8
5.6	19.2	74.3	15.7	0	19.2	0.39	6	1.44	19.1	99.3	15.7	83.6	228.6	0.4	0	6	0.43	1.08	1.41	206.4
5.8	19.8	181.2	17.66	0	19.8	0.91	6	1.67	20.1	103.3	17.7	85.6	230.1	0.9	0	6	0.52	1.08	1.64	213.5
6	29.3	231.7	19.62	0	29.3	0.79	6	1.51	20.5	107.4	19.6	87.8	332.7	0.8	0	6	0.46	1.06	1.49	310
6.2	26.9	157.4	21.98	0	26.9	0.59	6	1.44	20.1	111.4	21.6	89.8	298.3	0.6	0	6	0.44	1.05	1.42	290.8
6.4	35.5	187.1	23.55	0	35.5	0.53	7	1.32	20.4	115.5	23.5	91.9	385	0.5	0	7	0.39	1.03	1.31	365.8
6.6	35.9	178.2	25.51	0	35.9	0.5	7	1.3	20.3	119.5	25.5	94	380.6	0.5	0	7	0.39	1.02	1.29	365.5

In situ data										Estimations									
Depth (m)	qc (MPa)	fs (kPa)	SBTn	Ksbt (m/s)	SPT N60 (blows/30cm)	Constrained Mod. (MPa)	Dr (%)	Friction angle (°)	Es (MPa)	Go (MPa)	Nkt	Su (kPa)	Su ratio	Kocr	OCR	Vs (m/s)	State parameter	Ko	Sensitivity
0.4	2.5	29.7	5	1.89E-06	15	36.2	38	36	29.0	36.0	0	0	0	0	0.3	0	143	-0.1	0
0.6	5.3	20.8	6	8.09E-05	23	38.9	55	40	31.0	39.0	0	0	0	0	0.3	0	149	-0.1	0
0.8	15.5	255.4	6	4.63E-05	71	126.1	94	45	101.0	126.0	0	0	0	0	0.3	0	246	-0.3	0
1	6.8	166.3	5	3.89E-06	39	86.4	62	41	69.0	86.0	0	0	0	0	0.3	0	208	-0.2	0
1.2	4.5	104	5	1.90E-06	28	65.0	51	39	52.0	65.0	0	0	0	0	0.3	0	194	-0.2	0
1.4	2.8	71.3	5	5.94E-07	19	26.8	40	37	40.0	50.0	0	0	0	0	0.3	0	165	-0.1	0
1.6	1.6	20.8	5	5.00E-07	11	22.0	30	34	23	29.0	0	0	0	0	0.3	0	131	-0.1	0
1.8	2.3	32.7	5	1.06E-06	15	31.7	36	36	29	37.0	0	0	0	0	0.3	0	144	-0.1	0
2	1.8	56.6	4	1.25E-07	14	24.7	0	0	33	42.0	14	126	2.5	0.3	11.6	152	0	1.5	2.2
2.2	1.9	52.3	4	1.84E-07	14	26.0	0	0	33	41.0	14	132.9	2.7	0.3	12.3	151	0	1.6	2.5
2.4	2.8	78.4	5	4.05E-07	19	38.6	39	37	42	53.0	0	0	0	0	0.3	0	168	-0.1	0
2.6	1.3	43.6	4	4.82E-08	11	17.5	0	0	35.0	14.0	89.5	1.8	0.3	8.2	141	0	1.4	2	
2.8	1.1	43.6	3	2.09E-08	10	14.7	0	0	34.0	14.0	75.0	1.4	0.2	6.7	139	0	1.3	1.7	
3	0.9	30.5	3	1.47E-08	8	11.8	0	0	30.0	14.0	66.4	1.1	0.3	5.1	131	0	1.2	1.9	
3.2	1.9	23.8	5	4.19E-07	10	25.8	29	34	28	35.0	0	0	0	0.3	0	143	0	0	0
3.4	2.8	26.7	5	1.50E-06	13	38.4	34	35	33	41.0	0	0	0	0.3	0	154	0	0	0
3.6	2.6	35.6	5	6.29E-07	12	35.5	32	35	36.0	45.0	0	0	0	0.3	0	159	-0.1	0	0
3.8	2.9	35.6	5	8.92E-07	13	39.7	33	35	38.0	47.0	0	0	0	0.3	0	162	-0.1	0	0
4	2.8	20.8	5	2.82E-06	11	28.2	32	35	33.0	41.0	0	0	0	0.3	0	154	0	0	0
4.2	4.4	47.5	5	2.70E-06	15	58.9	39	37	47.0	59.0	0	0	0	0.3	0	179	-0.1	0	0
4.4	3.6	26.7	5	2.87E-06	13	47.4	35	36	38.0	47.0	0	0	0	0.3	0	164	0	0	0
4.6	2.4	26.7	5	5.16E-07	10	32.5	29	34	34.0	43.0	0	0	0	0.3	0	156	0	0	0
4.8	1.5	65.3	3	1.36E-08	9	19.8	0	0	0	50.0	14	101.2	1.3	0.3	6.1	166	0	1.2	1.5
5	3.7	32.7	5	2.09E-06	13	51.5	35	36	41.0	52.0	0	0	0	0.3	0	170	0	0	0
5.2	4.5	44.6	5	2.74E-06	15	59.9	38	36	48.0	60.0	0	0	0	0.3	0	181	-0.1	0	0
5.4	2.1	26.7	5	2.82E-07	9	28.1	26	33	34.0	41.0	0	0	0	0.3	0	154	0	0	0
5.6	19.2	74.3	6	4.60E-04	38	102.6	77	43	82.0	103.0	0	0	0	0.3	0	230	-0.2	0	0
5.8	19.8	181.2	6	9.02E-05	46	142.1	78	43	113.0	142.0	0	0	0	0.3	0	263	-0.2	0	0
6	29.3	231.7	6	2.70E-04	61	172.7	94	45	138.0	173.0	0	0	0	0.3	0	287	-0.3	0	0
6.2	26.9	157.4	6	4.26E-04	53	146.0	90	45	116.0	146.0	0	0	0	0.3	0	267	-0.2	0	0
6.4	35.5	187.1	7	9.43E-04	64	167.0	100	46	133.0	167.0	0	0	0	0.3	0	294	-0.3	0	0
6.6	35.9	178.2	7	1.08E-03	63	164.8	100	46	131	168	0	0	0	0.3	0	282	-0.3	0	0

prove eseguite per altre indagini (vasche liquami)
interpretazione e grafica con software CPet-It

località: Cascina Vinzaschina X = 555317; Y = 5009203

Project: progetto di due vasche liquami

CPT: CPT-02 (fs/1.5-2.5) - Total depth: 14.20 (m)

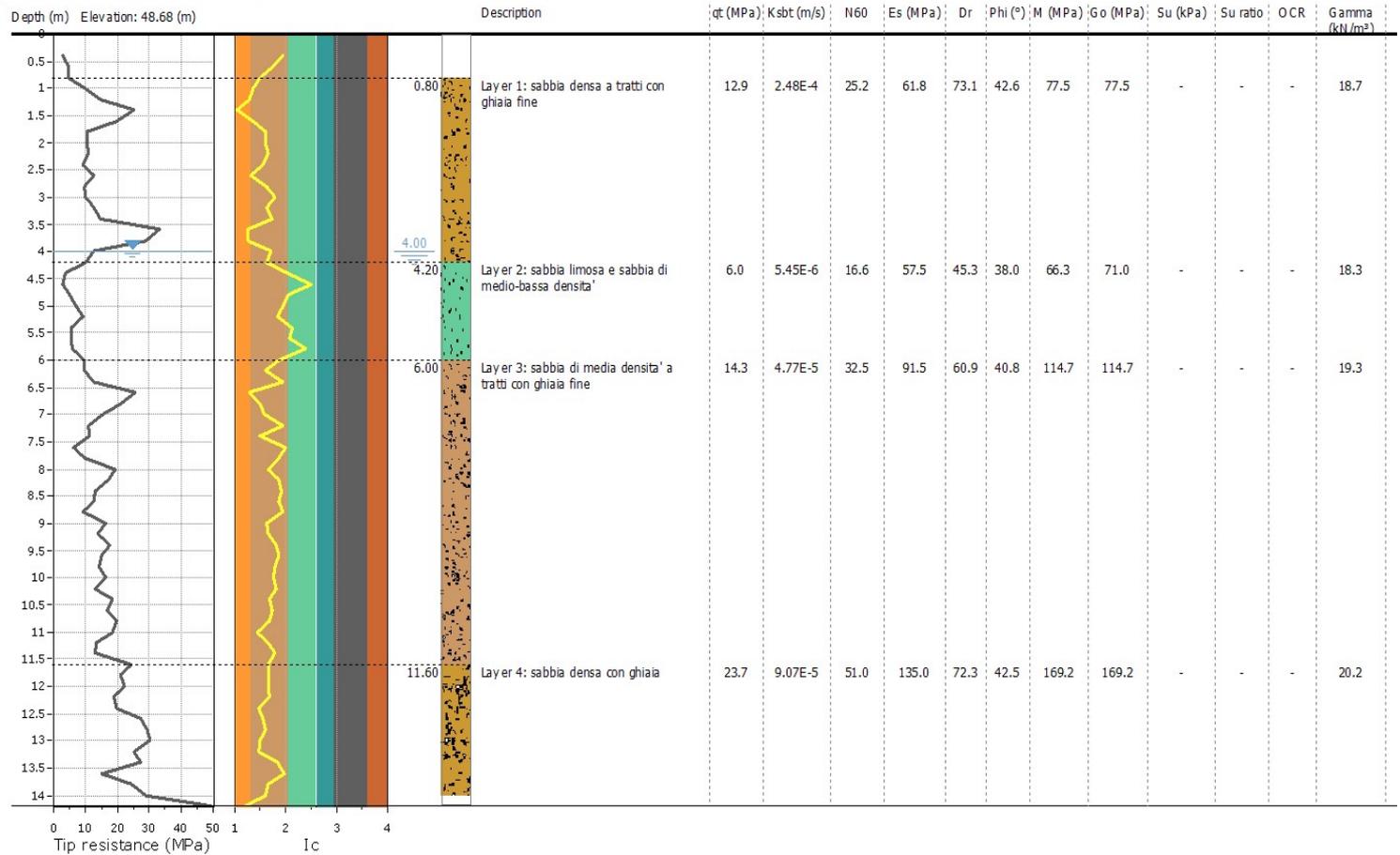


Table with multiple columns: In situ data (Depth, qc, fs, u, etc.), Base output data (qc, fs, u, etc.), and Estimations (Friction, Mod., etc.). It contains detailed numerical data for each depth interval from 0.4m to 14.2m.