



**(RE-E-987) LAVORI DI ADEGUAMENTO
FUNZIONALE DELL'ARGINATURA MAESTRA DI PO
IN COMUNE DI BORETTO (RE) PER IL
CONTRASTO DEI FENOMENI DI FILTRAZIONE
(CUP: B74H17000280002 CIG: 7520378C3D)
1° LOTTO**

PROGETTO ESECUTIVO

00	06/2020	Emissione per commenti	GM	CC	DC
INDICE	DATA	M O D I F I C H E	DISEGN.	CONTR.	APPROV.
RELAZIONE GEOLOGICA					
I PROGETTISTI: Dott. Ing. Denis Cerlini Dott. Ing. Marco Belicchi Dott. Ing. Nicola Pessarelli Dott. Ing. Michele Ferrari GEOLOGIA: Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti Dott. Ing. Giulia Mainardi			HANNO COLLABORATO: Dott. Ing. Cecilia Benassi Dott. Ing. Daniele Mori ARCHEOLOGIA: Dott. Archeol. Daria Pasini ASPETTI TECNOLOGICI: Dott. Ing. Armando Vanin Dott. Ing. Lorenzo Belicchi		
IL RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI PROFESSIONISTI:			ELABORATO: BRTT 31.03		
<div>MAJONE&PARTNERS ENGINEERING</div> <div>STUDIO MAJONE INGEGNERI ASSOCIATI</div> <div> EN GEO S.r.l. INGEGNERIA STUDIO www.engeo.it</div> <div> Dott. Ing. Giulia Mainardi</div>			GIUGNO 2020		

INDICE

1. PREMESSA	2
1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
1.2 PARAMETRI DI PROGETTO	7
2. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	8
2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	8
2.2 GEOMORFOLOGIA	13
3. IDROGEOLOGIA	16
3.1 IDROGEOLOGIA LOCALE E RAPPORTI FIUME-FALDA	21
3.2 INFILTRAZIONI IDRICHE NEL NOVEMBRE 2018	24
3.3 PERMEABILITÀ	27
3.3.1 Campagne d'indagine pregresse	27
3.3.2 Campagna di indagini 2019	31
4. INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOFISICHE ED ANALISI DI LABORATORIO	40
4.1 CAMPAGNA DI INDAGINE 2019	41
4.1.1 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono	42
4.1.2 Prove di dissipazione	46
4.2 INDAGINI PREGRESSE	48
4.2.1 Campagna di indagine MagisPo 1995-2001	48
4.2.2 Campagna di indagine AIPO 2017	49
4.2.3 Database RER	52
5. LITOSTRATIMETRIA	54
6. ASPETTI SISMICI	56
6.1 CARATTERISTICHE SISMOTETTONICHE	56
6.2 SISMICITÀ DEL TERRITORIO	62
6.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA	64
6.4 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	68
6.5 COEFFICIENTI SISMICI DI PROGETTO	71
7. ASPETTI GEOTECNICI	73
7.1 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI	73
7.1.1 Depositi coesivi	73
7.1.2 Depositi granulari	75
7.2 MODELLO GEOTECNICO	76

1. PREMESSA

La presente relazione descrive lo studio geologico effettuato a supporto della progettazione esecutiva – 1° lotto dei lavori di adeguamento funzionale dell'arginatura maestra di Po in comune di Boretto (RE) per il contrasto dei fenomeni di filtrazione. In particolare l'intervento di primo lotto si concentra su un tratto di circa 187 m compreso tra la ditta Bacchi S.p.A. e via Geminiolo.

L'arginatura maestra del F. Po, all'interno del comune di Boretto (RE), in corrispondenza della S.S. n.62 della CISA è stata interessata a più riprese e in tempi diversi, da fenomeni di filtrazione (piping) con formazione di fontanazzi (sand boils) nelle aree immediatamente a ridosso del rilevato sul lato campagna.

Tra gli anni 1998 e 2001 negli ambiti dei Comuni di Brescello, Boretto, Gualtieri, Guastalla e Luzzara (Reggio Emilia) sono stati realizzati lavori di ringrosso e sopralzo lungo il tratto arginale maestro destro del F. Po, per uno sviluppo di circa 19 km, al fine di realizzare l'adeguamento in quota e sagoma nei confronti della piena di riferimento del PAI individuata dall'Autorità di Bacino del Fiume Po.

I suddetti lavori di rialzo e ringrosso sono stati eseguiti lungo il medesimo tratto arginale dove, nei cinque anni precedenti, era stato inserito, lato fiume, un sistema di diaframmi di tipo plastico di spessore 0.60 m e di profondità 15 - 20 m circa e in tratti vari. Tra Guastalla e Luzzara le diaframature hanno consentito di limitare e tenere sotto controllo i fenomeni di filtrazione, sia nel corso della piena del 2000, che superò i precedenti record storici del 1951 e del 1994, sia negli eventi successivi. Le opere realizzate dopo le piene del 1994 e del 2000, tra cui ringrossi e diaframmi, hanno dimostrato la loro efficacia, tuttavia si sono evidenziati alcuni punti critici.

In particolare, nel corso della piena del novembre 2014 i prolungati livelli idrometrici hanno evidenziato, in alcuni tratti del Po in Comune di Boretto, ancora una volta la pericolosità di infiltrazioni a tergo delle arginature diaframmate, con la formazione di fontanazzi; alcuni di essi, i più pericolosi, si sono manifestati dove già in passato avevano fatto la loro comparsa.

Tali fenomeni hanno richiesto un'accurata indagine geognostica, svolta da AIPO nel 2017, che, unitamente ad altri dati disponibili, ha consentito la corretta ricostruzione del modello geologico/idrogeologico dell'area oggetto dello studio.

Il progetto di fattibilità tecnica ed economica aveva preliminarmente definito il tratto di intervento; tuttavia, a seguito di nuove indagini ed approfondimenti di natura tecnica ed economica, tale tratto è stato modificato in fase di progettazione definitiva, riducendolo leggermente nella parte di valle.

La progettazione esecutiva in oggetto riguarda il primo lotto funzionale di interventi, da realizzarsi nell'ambito dei finanziamenti disponibili. In particolare, rispetto agli interventi individuati nel progetto Definitivo, il primo lotto funzionale riguarda un tratto in cui la realizzazione delle opere risulta prioritaria, in virtù delle maggiori problematiche di filtrazione evidenziate anche nel corso degli ultimi eventi di piena del fiume Po (Fig. 1).

Gli interventi individuati nel presente progetto costituiscono una prima risposta ad un problema che si è verificato essere esteso all'intero tratto arginale compreso tra il ponte di Viadana (sezione 01, inizio tratto di studio) e l'argine golenale immediatamente a monte di Pieve Saliceto (sezione 62, fine tratto di studio).



Fig. 1 – 1°lotto di intervento (linea tratteggiata rossa)

Lo studio è stato effettuato nel rispetto della normativa vigente, richiamata nel successivo paragrafo 1.1, e, in particolare delle “Norme tecniche per le costruzio-

ni", di cui al Decreto ministeriale 17 gennaio 2018, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 8 del 20 febbraio 2018.

La presente relazione geologica è corredata dalle seguenti tavole:

- Tav. BRTT 3106 - Carta geolitologico morfologica – scala 1:10.000
- Tav. BRTT 3107 - Carta idrogeologica – scala 1:10.000
- Tav. BRTT 3108 – Planimetria con ubicazione delle indagini – scala 1:2.000
- Tav. BRTT 3109 – Sezione litostratimetrica ed idrogeologica longitudinale – scala H=1:5.000, V=1:250
- Tav. BRTT 3110 – Sezioni litostratimetriche ed idrogeologiche trasversali – scala 1:500

I risultati di tutte le indagini in situ e di laboratorio utilizzate sono riportati nei seguenti allegati (ciascun allegato, per maggiore chiarezza, è suddiviso, al suo interno in fascicoli, come illustrato di seguito):

- BRTT 31.04 - Campagna geognostica 2019
 - 31.04.1 Prove penetrometriche
 - 31.04.2 Stratigrafie pozzo e piezometri
 - 31.04.3 Interpretazione prove di dissipazione
- BRTT 31.05 - Campagna geognostica AIPO 2017
 - 31.05.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.05.2 Prove penetrometriche
 - 31.05.3 Prove geofisiche
 - 31.05.4 Prove di laboratorio
- BRTT 31.06 - Campagna geognostica MagisPo 2001
 - 31.06.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.06.2 Prove penetrometriche

- 31.06.3 Prove di laboratorio
- BRTT 31.07 - Database geologico regionale
 - 31.07.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.07.2 Prove penetrometriche
 - 31.07.3 Stratigrafie pozzi idrici

Si precisa che, sebbene l'intervento non richieda particolari valutazioni di carattere geotecnico e sismico, vista la problematica oggetto del progetto, inerente esclusivamente gli aspetti idrogeologici, nella presente relazione, per completezza della documentazione, sono stati redatti anche i capitoli 6 - ASPETTI SISMICI e 7 - ASPETTI GEOTECNICI.

1.1 Normativa di riferimento

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Istruzioni per l'applicazione delle “Norme Tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 17-01-2018, Circolare 11 febbraio 2019;
- Decreto ministeriale 17-01-2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni
- DGR 1164 del 23/07/2018 aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna
- Decreto ministeriale 14-01-2008 – Testo unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni Allegati A e B
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n° 36 del 27/07/2007
- Eurocodice 8 (1998) – Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997) – Progettazione geotecnica –Parte I: Regole Generali – UNI

- Eurocodice 7.2 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte I: Progettazione assistita da prove di laboratorio - UNI
- Eurocodice 7.3 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte II: Progettazione assistita da prove in sito - UNI
- O.P.C.M. n° 3274 (2003) - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"

1.2 Parametri di progetto

Coerentemente con quanto disposto dalle NTC 2018 (Cap. 2.4), in accordo con i progettisti, sono stati definiti i seguenti parametri di progetto:

- VITA NOMINALE: *“Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica”* la cui vita nominale è $V_n \geq 100$ anni (come definito dalla Tab. 2.4.I delle N.T.C. 01/2018);
- CLASSE D'USO: *Classe IV: “Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”, e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica”* (come definito dal paragrafo 2.4.2 delle N.T.C. 01/2018);
- PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA: Considerata la classe d'uso IV, il coefficiente d'uso risulta $C_u=2.0$ (cfr. Tab. 2.4.II delle N.T.C. 01/2018), e di conseguenza il periodo di riferimento del rilevato arginale oggetto d'intervento è $V_R=V_N \cdot C_u= 200$ anni.

2. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

2.1 Inquadramento geologico

Il tratto di argine in studio, territorialmente appartenente al Comune di Boretto, dal punto di vista geologico, ricade nella pianura reggiana, la quale, a sua volta, è compresa in quella emiliano-romagnola che costituisce il settore meridionale della pianura padana, la più grande pianura alluvionale d'Italia, edificata dai depositi del fiume Po e dei suoi affluenti.

Essa ha cominciato a formarsi nel Pleistocene medio, circa 500.000 anni fa, quando, a seguito del sollevamento in atto, il mare si è spostato dal margine appenninico, via via sempre più verso est, sino alla sua attuale posizione.

Il sottosuolo è contraddistinto da un forte accumulo di sedimenti alluvionali quaternari che appoggiano, con discontinuità a discordanza semplice, sul substrato di sedimenti marini del pliocene superiore e del pleistocene inferiore.

L'assetto di tale corpo sedimentario è il risultato dell'evoluzione deposizionale dei corsi d'acqua, legata sia alle variazioni climatiche pleistoceniche sia ai recenti movimenti tettonici della zona di margine, vale a dire di quella fascia interposta tra la Pianura s.l. in abbassamento e l'Appennino in sollevamento.

E' possibile riconoscere nella Pianura dell'Emilia-Romagna alcuni ambienti deposizionali: le conoidi alluvionali sono tipiche della zona pedeappenninica, ad esse fa seguito la piana alluvionale, che passa verso costa alla piana deltizia del fiume Po ed alla piana costiera.

I sedimenti di questi ambienti deposizionali sono costituiti prevalentemente da: ghiaie nelle conoidi alluvionali; sabbie, limi ed argille nella piana alluvionale; sabbie nella piana deltizia e costiera.

Nel sottosuolo i depositi della pianura costituiscono un cuneo che si allarga velocemente procedendo dal margine appenninico verso nord; lo spessore massimo di questi depositi arriva ad oltre 600 metri.

L'assetto geostrutturale delle formazioni prequaternarie è caratterizzato da una successione plicativa ad anticlinali e sinclinali spesso fagliate e sovrascorse, con assi a vergenze appenniniche.

In tale schema la pianura reggiana è compresa nell'arco delle pieghe emiliane caratterizzate da due distinti fasci di *thrust*: il primo, più meridionale, detto fronte di accavallamento appenninico (P.T.F.), definisce il limite della catena appenninica affiorante; il secondo, detto fronte di accavallamento esterno (E.T.F), definisce il limite dell'Appennino sepolto, rappresentato dalle strutture anticlinali di Busseto e di Brè, che proseguono, verso SE, nelle strutture di Collecchio e Parma (cfr. Fig. 2), a nord della quale è ubicato il Comune di Boretto (a ciò consegue che lo spessore dei depositi continentali nella zona di studio risulta di alcune centinaia di metri).

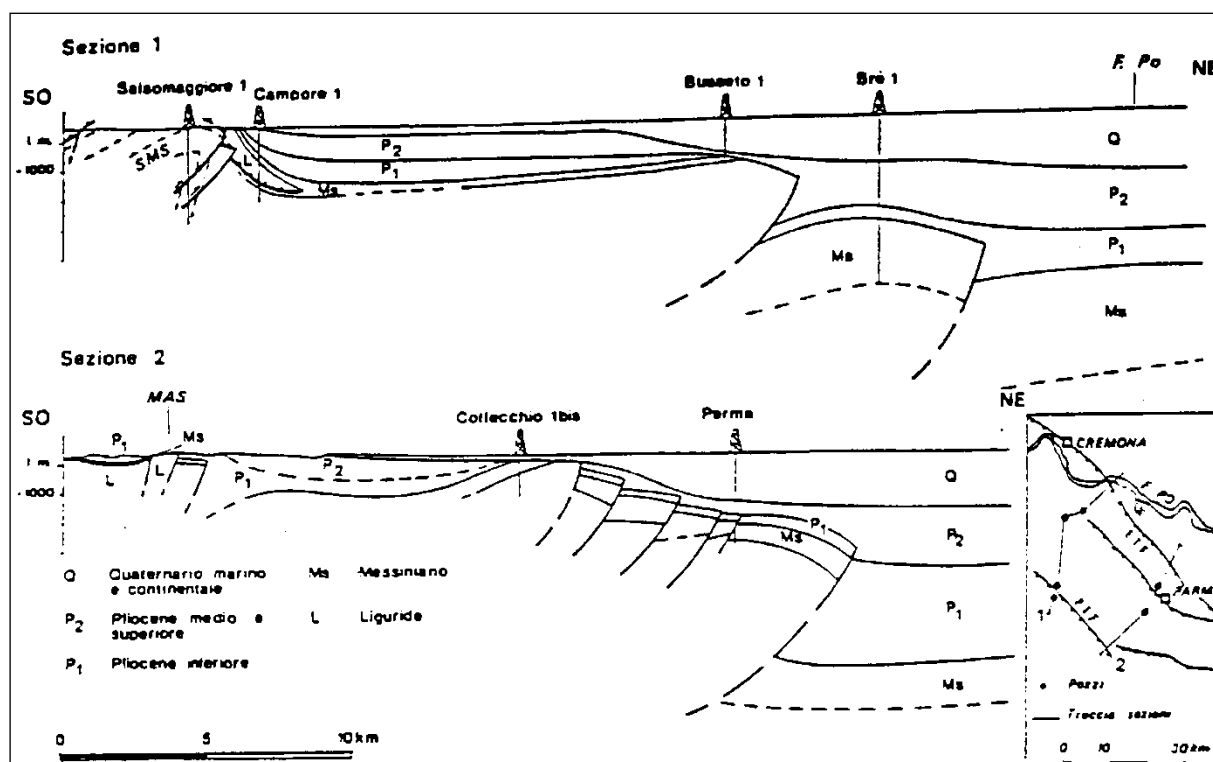


Fig. 2 - Sezioni geologiche dal Fronte di accavallamento pedeappenninico (PTF) al Fronte di accavallamento esterno (ETF) (da Bernini e Papani, 1987)

Queste strutture risultano tagliate trasversalmente dalle linee tettoniche del Taro e dello Stirone che determinano un inarcamento (in pianta) della linea dei *thrust*.

L'andamento strutturale dell'Appennino sepolto può essere interpretato come effetto di una compressione e di un raccorciamento crostale che, secondo i moderni schemi geodinamici, risulta legato ad un doppio fenomeno di subduzione e/o ispessimento della crosta. In tale quadro d'insieme si giustifica lo sviluppo della rete idrografica maggiore che risulta conforme ai principali assi di sinclinali sepolte.

A scala padana la successione quaternaria ha un forte carattere regressivo con sabbie e peliti torbiditiche alla base, seguite da un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progradante, ricoperto al tetto da depositi continentali.

In conformità con quanto assunto dal Servizio Geologico e cartografico della Regione Emilia-Romagna, le unità stratigrafiche definite ed utilizzate nel presente

studio rientrano nella classe delle Sequenze Deposizionali *sensu Mitchum et Al.* (1977).

Dal punto di vista gerarchico si distinguono due Sequenze Principali (Supersintemi secondo la terminologia delle U.B.S.U.) denominate come segue:

- Supersintema del Quaternario Marino, costituito da terreni paralici e marini depositi tra il Pliocene superiore e il Pleistocene medio.
- Supersintema Emiliano-Romagnolo, costituito da depositi di ambiente continentale depositi a partire da 650.000 anni BP.

Nel complesso i depositi superficiali, nell'area in questione, sono relativi all'Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore, a sua volta suddivisa in sottounità denominate Subsintemi.

Essa è caratterizzata da due direzioni di progradazione: la prima, assiale, est-ergente, originata dal fiume Po; la seconda, trasversale, nordest-ergente, originata dai sistemi di alimentazione appenninica.

Sulla base delle direzioni di progradazione possono essere individuate le seguenti classi di sistemi deposizionali:

- pianura pedemontana ad alimentazione appenninica
- pianura alluvionale ad alimentazione appenninica
- pianura alluvionale di alimentazione assiale (paleo Po)
- pianura alluvionale di alimentazione mista

Il territorio studiato ricade all'interno del sistema deposizionale pianura alluvionale ad alimentazione mista.

Con riferimento alla cartografia geologica della Regione Emilia-Romagna – Progetto CARG, elaborata secondo i concetti di stratigrafia sequenziale sopracitati, i depositi affioranti nell'areale di studio possono essere attribuiti al Subsintema di Ravenna, di età olocenica. Questi sono costituiti da sabbie e limi stratificati con copertura di limi argillosi o limi sabbiosi. Lo spessore massimo raggiunto dall'unità è inferiore a 20 m mentre il profilo di alterazione varia da qualche decina di cm fino ad 1 m. Il tetto è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relit-

ta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discordante sulle unità più antiche.

Tali depositi presentano una stratificazione di tipo cuneiforme, la cui granulometria è in stretto rapporto con l'energia delle correnti fluviali che li hanno originati: i sedimenti grossolani sono il risultato di una deposizione avvenuta in ambiente di canale fluviale, di argine o di rotta, mentre, quelli fini di una sedimentazione per trascinamento avvenuta in zone distali dall'alveo attivo (piana inondabile).

Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica, all'interno del Subsistema di Ravenna, viene distinta un'unità di rango gerarchico inferiore: l'unità di Modena, costituita da una successione sedimentaria la cui deposizione è inquadrabile nell'ambito degli eventi alluvionali che hanno caratterizzato gli ultimi 1.500 anni di storia evolutiva.



AES8 – Subsistema di Ravenna
 b1 – Depositi alluvionali in evoluzione

AES8a – Unità di Modena
 b2 – depositi alluvionali terrazzati

Fig. 3 – Stralcio della Carta geologica della Regione Emilia Romagna

Nella carta geologico morfologica di Tav. BRTT 31.06 i depositi sono stati suddivisi sia per litologia che per ambiente deposizionale:

- l'alveo del Po e le relative aree golenali, con la sola eccezione della golena chiusa tra Pieve Saliceto e Gualtieri sono caratterizzati da depositi prevalentemente sabbiosi di canale fluviale, a loro volta suddivisi in
 - depositi di canale di taglio
 - depositi di barra di meandro
 - depositi di barra laterale
- La golena chiusa tra Pieve Saliceto e Gualtieri è caratterizzata da depositi prevalentemente limoso sabbiosi di argine prossimale
- Le aree extragolenali a ridosso delle arginature sono caratterizzate da depositi limoso sabbiosi di piana alluvionale
- I depositi più fini, argilloso limosi di piana inondabile caratterizzano le aree depresse della pianura.

2.2 Geomorfologia

Gli eventi morfogenetici, responsabili dell'attuale assetto del territorio in esame, sono riconducibili essenzialmente alla dinamica fluviale del periodo pleistocenico ed olocenico, alla quale, nel periodo storico, si è sovrapposta l'attività antropica mirata alla stabilizzazione e alla modellazione delle superfici del suolo compatibilmente alle esigenze economiche, produttive ed insediative.

Le interazioni tra i vari fattori morfogenetici, all'esterno delle golene, hanno dato luogo ad un paesaggio "congelato", relativamente omogeneo, contraddistinto da superfici pressoché piane, debolmente degradanti verso nord-est con gradiente topografico molto basso.

Nelle aree di pertinenza dei corsi d'acqua, invece, si continua a osservare un'intensa evoluzione morfologica, condizionata principalmente dagli episodi di sedimentazione e di erosione. che si manifestano, in prevalenza, in occasione de-

gli eventi di piena, e dalla presenza di opere di regolarizzazione del corso d'acqua, sia a difesa dalle esondazioni dei territori rivieraschi (rilevati arginali) sia al fine di rendere il fiume navigabile (difese spondali e pennelli).

Gli elementi morfologici rilevati nell'area oggetto di studio e nel suo intorno sono stati raffigurati nella Carta geologico-geomorfologica di Tav. BRTT 3106 distinguendo:

Forme naturali

- Fronte di erosione di barra
- Fontanazzi
- Barre fluviali

e

Forme antropiche

- Rilevati arginali (distinguendo quelli maestri da quelli golenali)
- Opere per la sistemazione dell'alveo di magra (indicandone anche la tipologia)
- Attività estrattive

Di particolare interesse per il presente studio è stato l'esame delle variazioni che l'alveo del fiume Po ha subito nel periodo recente, ovvero negli ultimi 100÷150 anni.

Allo scopo sono stati, innanzitutto, considerati gli studi per la "Cartografia delle variazioni planimetriche dell'alveo fiume Po da confluenza Stura di Lanzo a Pontelagoscuro" redatta dall'Autorità di Bacino per il Fiume Po, di seguito riportati.

Come si può constatare dalla Fig. 4, nell'area oggetto di studio, il fiume Po, nel periodo storico considerato (1882-2004) ha subito numerose divagazioni, ma sempre in sponda sinistra.

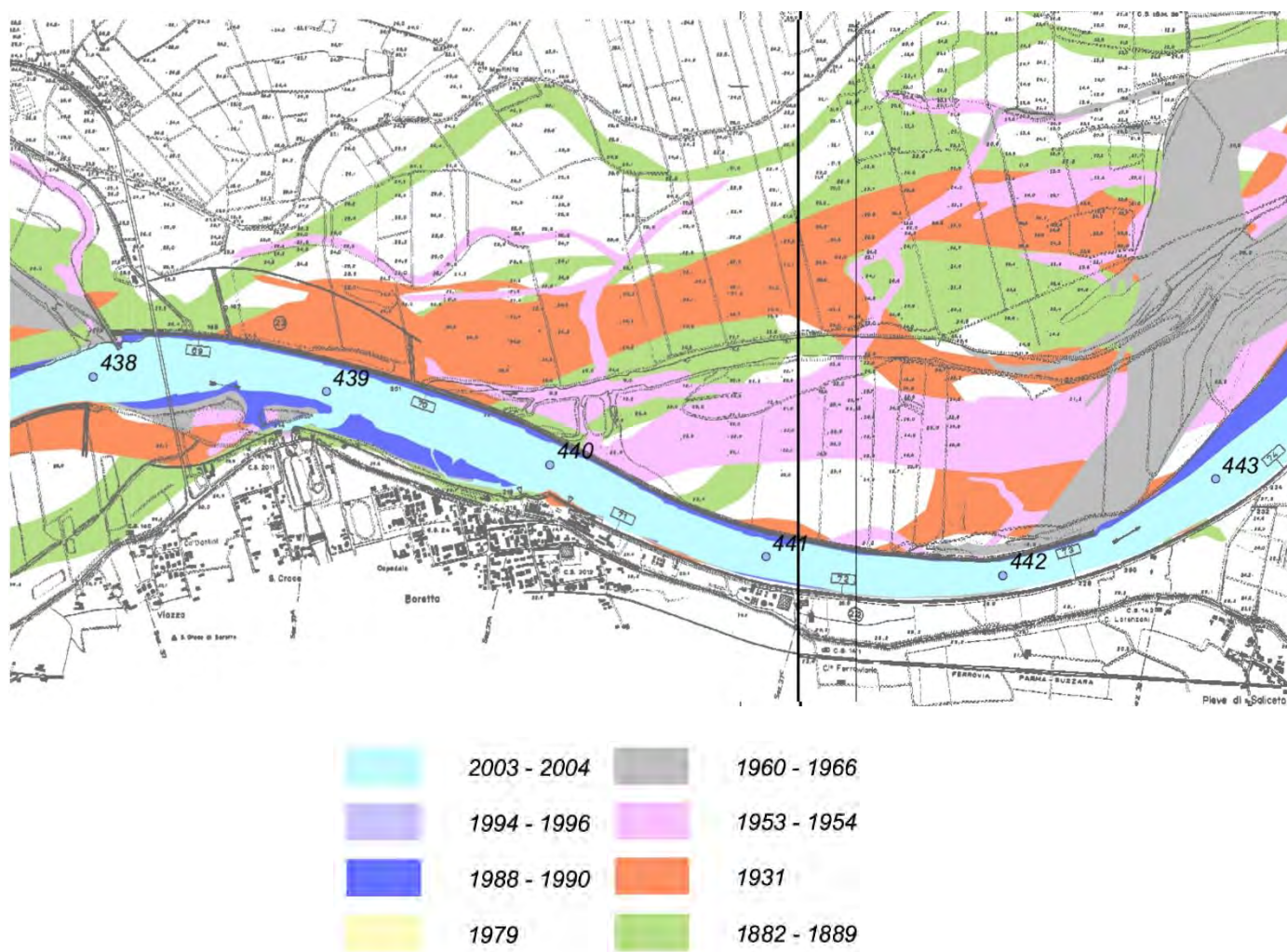


Fig. 4 – Stralcio da Tav. 31 - Cartografia delle variazioni planimetriche dell'alveo fiume Po da confluenza Stura di Lanzo a Pontelagoscuro (Autorità di Bacino del fiume Po, 2008)

3. IDROGEOLOGIA

Le caratteristiche degli acquiferi del territorio in esame vanno inquadrare nel modello evolutivo tridimensionale, sia idrogeologico che stratigrafico, dell'intera Pianura Padana Emiliano-Romagnola. A riguardo, secondo gli studi della Regione Emilia-Romagna e di Eni-Agip (1998) si distinguono, sia in superficie che nel sottosuolo, 3 Unità Idrostratigrafiche di rango superiore:

- il “Gruppo acquifero A” che corrisponde al “Sintema emiliano-romagnolo superiore”;
- il “Gruppo acquifero B” che corrisponde al “Sintema emiliano-romagnolo inferiore”;
- il “Gruppo acquifero C” che corrisponde al “Supersintema del Quaternario marino”.

PRINCIPALI UNITA' STRATIGRAFICHE					ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE								
AFFIORANTI			SEPOLTE				GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO							
QUATERNARIO CONTINENTALE	TERRE ROSSE, DILUVIUM, ALLUVIUM, TERRAZZI E ALLUVIONI	DILUVIUM p.p.	FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE	FORMAZIONE DI OLIVATELLO	UNITA' DI VILLA DEL BOSCO	UNITA' DI QA DI SOLA	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO SUPERIORE	UNITA' DI BORGO PANIGALE	ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI	~0.12	PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE	A	A1	
														A2	
	DILUVIUM p.p.	FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE	FORMAZIONE DI OLIVATELLO	UNITA' DI VILLA DEL BOSCO	UNITA' DI QA DI SOLA	UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE		SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOLO INFERIORE	CRIZZANTE DI FOSSOLO		~0.35-0.45	PLEISTOCENE MEDIO		B	B1
															B2
QUATERNARIO MARINO	MILAZZANO SABBIE di CASTELVETRO p.p. SABBIE GIALLE di IMOLA p.p.		SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 3		SUPERSISTEMA DEL QUATERNARIO MARINO	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 3	~0.65	~0.8	0.89	PLEISTOCENE INFERIORE	C	C1			
	MILAZZANO e CALABRIANO p.p. SABBIE di CASTELVETRO p.p. SABBIE GIALLE di IMOLA p.p.		SUBSISTEMA QUATERNARIO MARINO 3									C2			
	CALABRIANO p.p. SABBIE di MONTERICCO FORMAZIONE di TERRA del SOLE p.p.		SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2									~1.0	1.72	C3	
	CALABRIANO p.p. FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p.		SISTEMA QUATERNARIO MARINO 1									~2.2	1.72	C4	
P ₂	FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p.		SUPERSISTEMA DEL PLOCENE MEDIO-SUPERIORE			PLOCENE MEDIO SUPERIORE	~2.2	~3.3-3.6	3.55	PLOCENE MEDIO - SUPERIORE		C5			
							~3.9			PLOCENE INFERIORE MIOCENE			ACQUITARDO BASALE		

Fig. 5 – Schema idrostratigrafico della Pianura Emiliano-Romagnola

Dette unità sono separate tra loro da superfici di discontinuità stratigrafica, che sui principali fronti di accavallamento della catena corrispondono a discordanze angolari osservabili sia in affioramento (sul margine appenninico) che in sismica (sul margine appenninico, e sui fronti della catena sepolta); i limiti tra le unità corrispondono quindi a fasi di attivazione tettonica.

Grazie alla gran mole di dati sismici messi a disposizione, è stato possibile mappare in scala 1:250.000 in tutta la pianura emiliano – romagnola la profondità del limite basale dei tre gruppi acquiferi.

Le carte mostrano come gli andamenti dei limiti basali delle tre unità siano chiaramente influenzati dai principali fronti di accavallamento della catena sepolta, e come, conseguentemente, lo spessore delle unità sia maggiore nelle sinclinali e minore sulle anticlinali. Lo spessore di ciascuno dei gruppi acquiferi è generalmente dell'ordine di alcune centinaia di metri.

Al di sopra dei limiti basali delle unità idrostratigrafiche sopra descritte si individuano dei potenti intervalli argilloso – limosi spessi sino ad alcune decine di metri, caratterizzati da geometria tabulare e da una continuità laterale di estensione regionale, che può essere interrotta solamente nelle zone di alto strutturale.

Questi corpi fini costituiscono delle barriere di permeabilità (acquitardo o acquiclude) realmente continue e fanno sì che i tre gruppi acquiferi siano tra loro isolati idraulicamente, e che pertanto il flusso idrico rimanga confinato all'interno della medesima unità, ad esclusione delle zone in cui avviene la ricarica diretta dei gruppi acquiferi di cui si dirà più oltre.

Negli studi della Regione Emilia-Romagna e di Eni-Agip viene anche illustrata attraverso alcune sezioni geologiche l'architettura interna dei tre gruppi acquiferi. Ciascuno di essi è articolato secondo una organizzazione ciclica dei depositi molto marcata; sulla base di questa ciclicità è stato possibile suddividere ciascuno dei gruppi acquiferi in complessi acquiferi.

Sono stati distinti 4 complessi acquiferi nei gruppi acquiferi A e B, e 5 complessi acquiferi nel gruppo acquifero C.

I complessi acquiferi vengono denominati con un numero progressivo dall'alto stratigrafico verso il basso, posto dopo il nome del gruppo acquifero (ovvero A1, A2, A3, ...).

In generale si osserva che ogni complesso acquifero è costituito da una porzione inferiore prevalentemente fine seguita da una superiore prevalentemente grossolana; lo spessore di ogni complesso acquifero è dell'ordine di alcune decine di metri. All'interno di ogni complesso acquifero la porzione grossolana viene denominata sistema acquifero, la porzione fine sistema acquitardo. Questi livelli a bassa permeabilità (acquitardi o acquicludi) causano una ulteriore compartimentazione all'interno dei tre gruppi acquiferi e fanno sì che i diversi complessi acquiferi siano tra loro isolati idraulicamente, ad esclusione delle zone in cui avviene la ricarica diretta di queste unità.

Dal punto di vista genetico, la ciclicità espressa dai complessi acquiferi viene messa in relazione ad eventi climatici che causano l'alternarsi di attivazioni e disattivazioni dei sistemi fluviali e deltizi.

I lavori svolti nell'ambito della realizzazione della Carta Geologica di Pianura, hanno permesso di dettagliare ulteriormente la stratigrafia, distinguendo, in particolare, un'unità pellicolare denominata A0, posta superiormente ad A1; questa unità corrisponde a depositi di età pleistocenica terminale ed olocenica, sedimentatisi dopo l'ultima glaciazione.

L'unità A0 comprende quindi i depositi presenti nel primo sottosuolo della pianura, nonché gran parte di quelli affioranti.

Le porzioni grossolane di A0 sono costituite da corpi non molto estesi, volumetricamente poco rilevanti, e, quando non sono amalgamate a depositi permeabili dell'unità A1, costituiscono degli acquiferi sfruttati esclusivamente a fini domestici. Ciò si verifica in un'ampia zona della pianura emiliana, interposta tra le conoidi appenniniche e i complessi acquiferi di pertinenza padana, di ampiezza sempre maggiore spostandosi da ovest verso est (cartografata, cautelativamente, considerando amalgamati anche corpi permeabili separati tra loro da uno spessore di argilla potente sino a due metri circa).

Alla luce di quanto sopra detto l'intero acquifero regionale è pertanto costituito da un complesso sistema multifalda, caratterizzato dalla gerarchizzazione degli acquiferi e degli acquitardi più sopra descritta. Tutte le falde presenti sono in condizioni confinate, ad esclusione delle zone in cui avviene la ricarica diretta degli acquiferi.

Tale assetto è schematizzato nella sezione di Fig. 6, ripresa dal database della Regione Emilia Romagna, e passante per la zona in studio, la cui ubicazione è riportata in Fig. 7

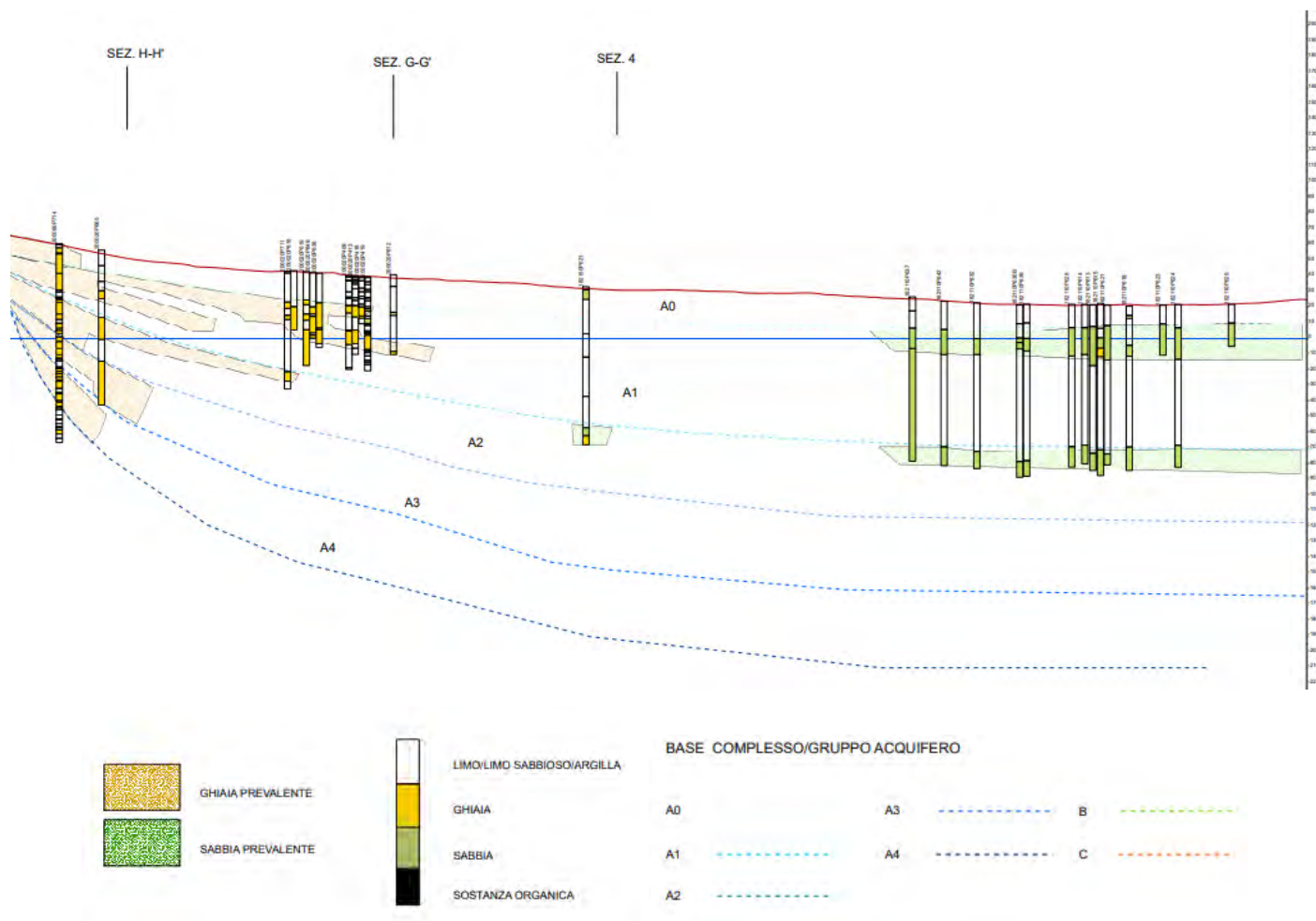


Fig. 6 – Sezione idrogeologica 133

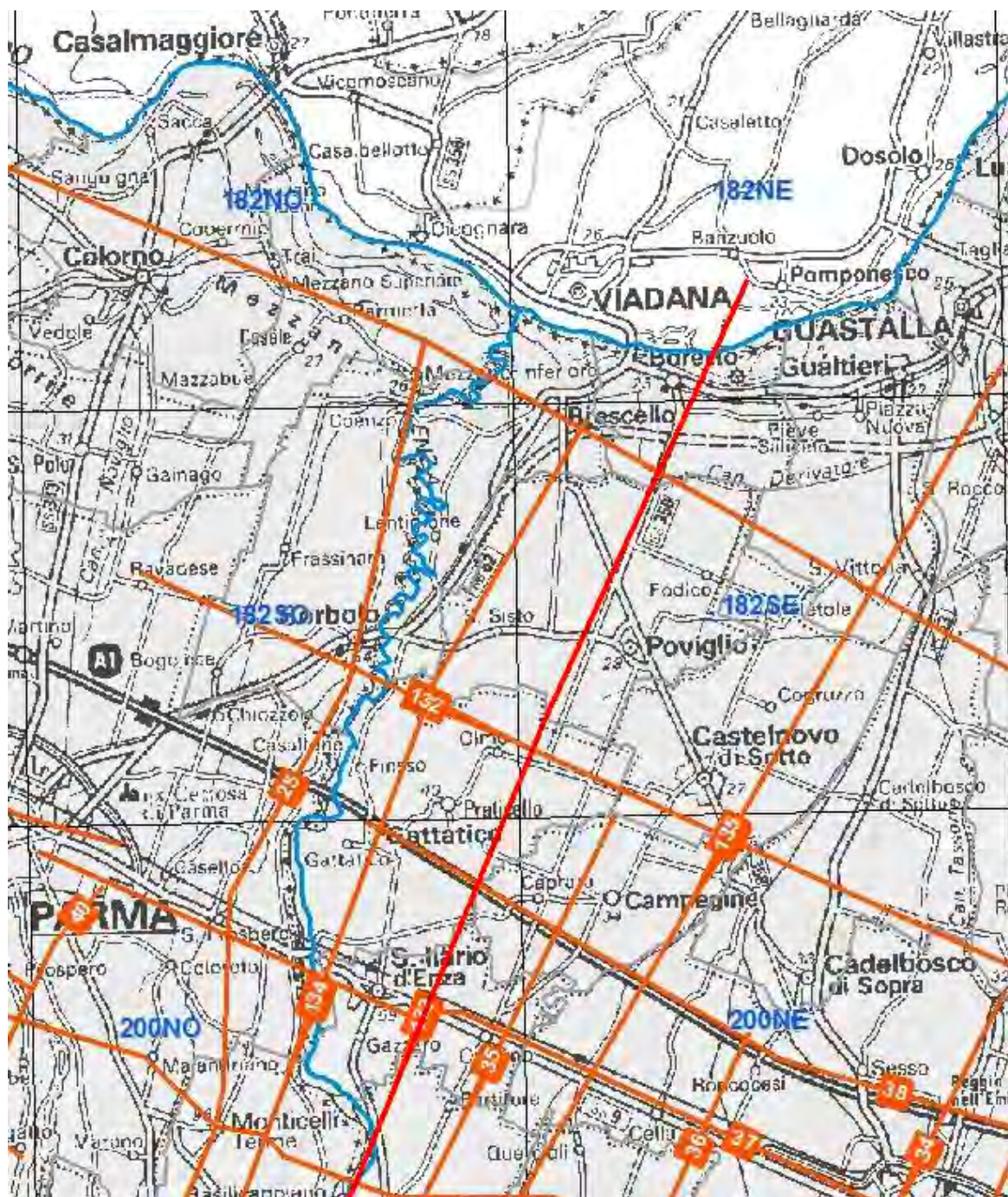


Fig. 7 – Ubicazione della sezione 133

3.1 Idrogeologia locale e rapporti fiume-falda

Più in dettaglio, l'area in esame ricade all'interno dell'Unità idrogeologica del Po, in cui la falda ha sede nei depositi permeabili depositi dallo stesso corso d'acqua. Questi presentano spessori considerevoli vicino al fiume, mentre, più a sud, tendono ad approfondirsi e assottigliarsi, fino a formare lenti di limitato spessore senza continuità laterale.

La fascia golenale, delimitata dall'argine oggetto di studio, in cui le litologie sabbiose sono affioranti o sub-affioranti, risulta caratterizzata da un primo acquifero in cui i livelli della superficie della falda, il fatto che essa risulti a pelo libero o in pressione e le direzioni del flusso idrico sotterraneo, risentono fortemente della presenza del fiume.

Questi costituisce un limite laterale a potenziale imposto. Una variazione di quota idrometrica ingenera un movimento analogo nei livelli freatici anche se d'ampiezza minore e sfasato nel tempo a seconda della distanza e della permeabilità dei terreni interessati.

Pertanto, il fiume risulta alimentante in fase crescente (effetto che assume dimensioni significative durante le lunghe piene autunnali e primaverili) mentre drena la falda quando decresce.

Uno studio di dettaglio dei rapporti fiume-falda, proprio nella zona di interesse, è stato svolto dal Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna (Severi e Biavati, 2013¹). In Fig. 8 è riportata l'ubicazione in pianta della sezione idrogeologica studiata, mentre in Fig. 9 è riportato l'assetto litostratigrafico ed idrogeologico della sezione stessa.

¹ • Severi G. e Biavati G (2013) - Definizione del modello geologico e idrogeologico della zona arginale del fiume Po in destra idrografica da Boretto (RE) a Ro (FE) – Regione Emilia Romagna – Servizio geologico, sismico e dei suoli

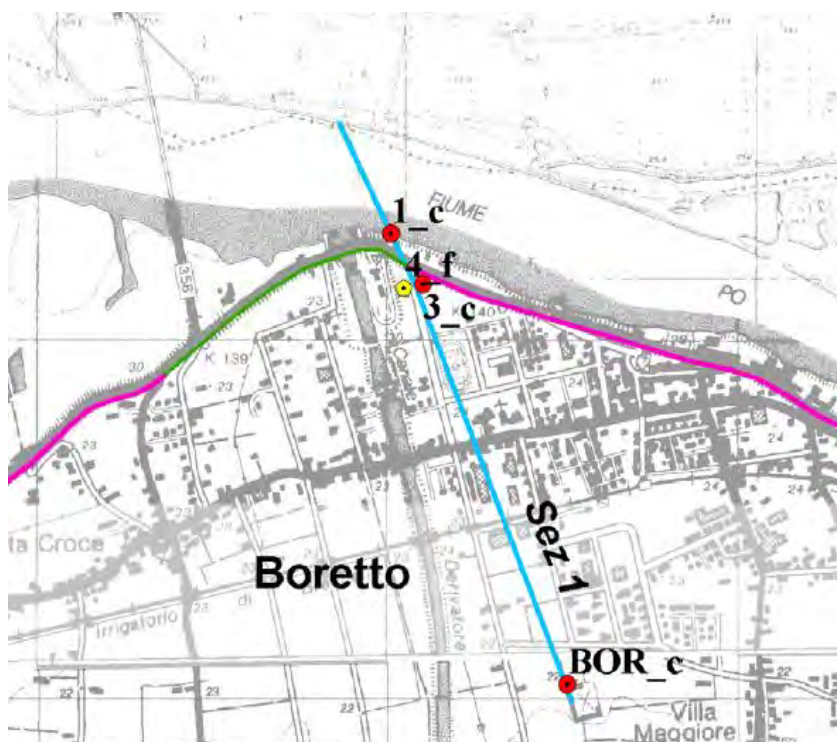


Fig. 8 – Ubicazione della sezione idrogeologica studiata

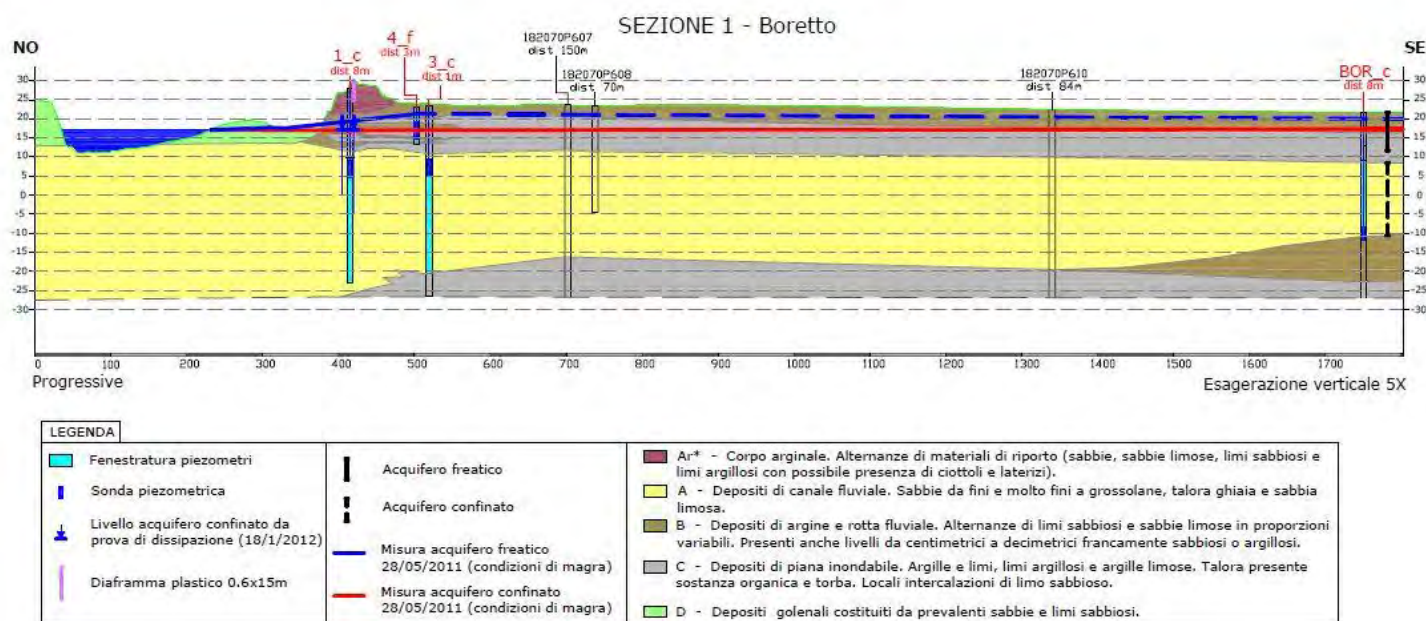


Fig. 9 – Sezione idrogeologica

In sintesi, è stato rilevato che nelle immediate vicinanze del fiume (dell'ordine di alcune decine di metri), l'andamento del livello dell'acquifero ospitato nelle sabbie è del tutto sovrapponibile a quello del fiume. Allontanandosi dal fiume, procedendo perpendicolarmente verso sud, si è osservato che entro 1-1.5 km di distanza dal fiume, l'andamento del livello dell'acquifero ha ancora delle evidenti fluttuazioni, influenzate da quelle del fiume. Durante le magre il livello dell'acquifero è più alto del livello del fiume e quindi l'acquifero cede acqua al fiume, mentre durante le morbide e le piene il Po è più alto dell'acquifero e quindi lo ricarica. Allontanandosi ulteriormente dal fiume, da 2.5 km di distanza da esso in poi, le oscillazioni del livello dell'acquifero confinato sono molto più blande e il livello dell'acquifero è influenzato dal fiume soltanto durante le piene maggiori. Anche in questo caso il carico idraulico dell'acquifero è maggiore rispetto al livello idrometrico del fiume durante i periodi di magra, e viceversa durante le morbide e le piene.

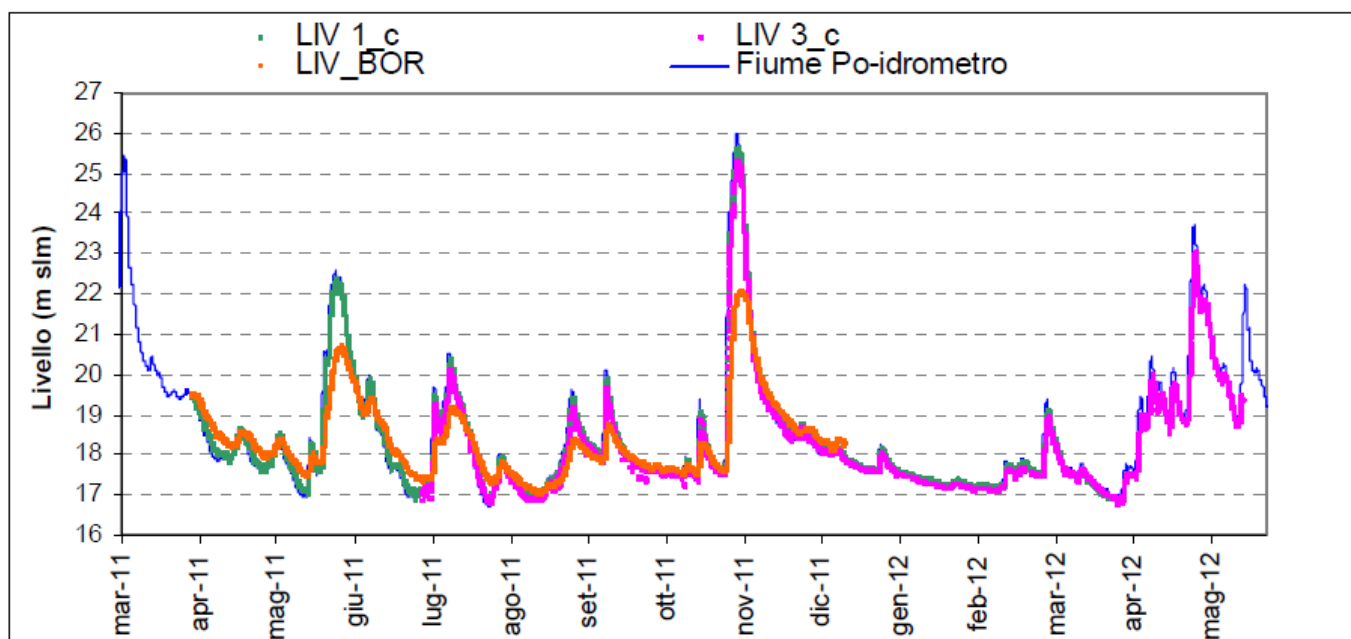


Fig. 10 - Livello idrometrico del Po confrontato con i livelli idrometrici dei piezometri indicati in Fig. 8

3.2 Infiltrazioni idriche nel novembre 2018

A seguito della piena del Po iniziata a fine Ottobre e prolungatasi fino al 10 Novembre, con un valore massimo di circa 6 m sullo zero idrometrico, è stato effettuato un sopralluogo al fine di valutare la possibilità di misurare i piezometri della Regione Emilia Romagna citati nel paragrafo precedente. Purtroppo, l'unico piezometro ancora attivo è quello posto presso il cimitero di Boretto, alla distanza di circa 1 km dall'argine fluviale.

Il piezometro è risultato chiuso mediante un lucchetto, ma era ben evidente che il livello di falda era superiore al piano campagna (Fig. 11), vista la fuoriuscita di acqua dal pozzetto, come, del resto, era da attendersi secondo lo studio della Regione.



Fig. 11 – Pozzetto del piezometro con evidente flusso di falda presso il Cimitero di Boretto

In tale occasione, inoltre, è stato fatto un rilievo delle aree interessate da affioramenti idrici imputabili alla piena.

In estrema sintesi si è verificato che gli affioramenti idrici potenzialmente attribuibili alla piena erano limitati ad un tratto abbastanza modesto, compreso tra la fine

dell'area urbanizzata a Ovest ed il fontanazzo storico posto a ridosso della ferrovia, ad Est (retino chiaro in Fig. 12).

In tale zona erano presenti:

- un ristagno al piede dell'argine con acqua affiorante sopra il piano campagna nel settore più occidentale (Foto 1)
- un abbondante ristagno al piede dell'argine con acqua affiorante sopra il piano campagna nella ristretta fascia di terreno compresa tra l'argine e la ferrovia nella zona del fontanazzo storico (Foto 2). In questa zona il ristagno era evidentemente confinato (ad Est) dalla banca realizzata in passato proprio per contrastare il fenomeno della filtrazione
- ristagni diffusi nei fossi a quote inferiori al piano campagna.

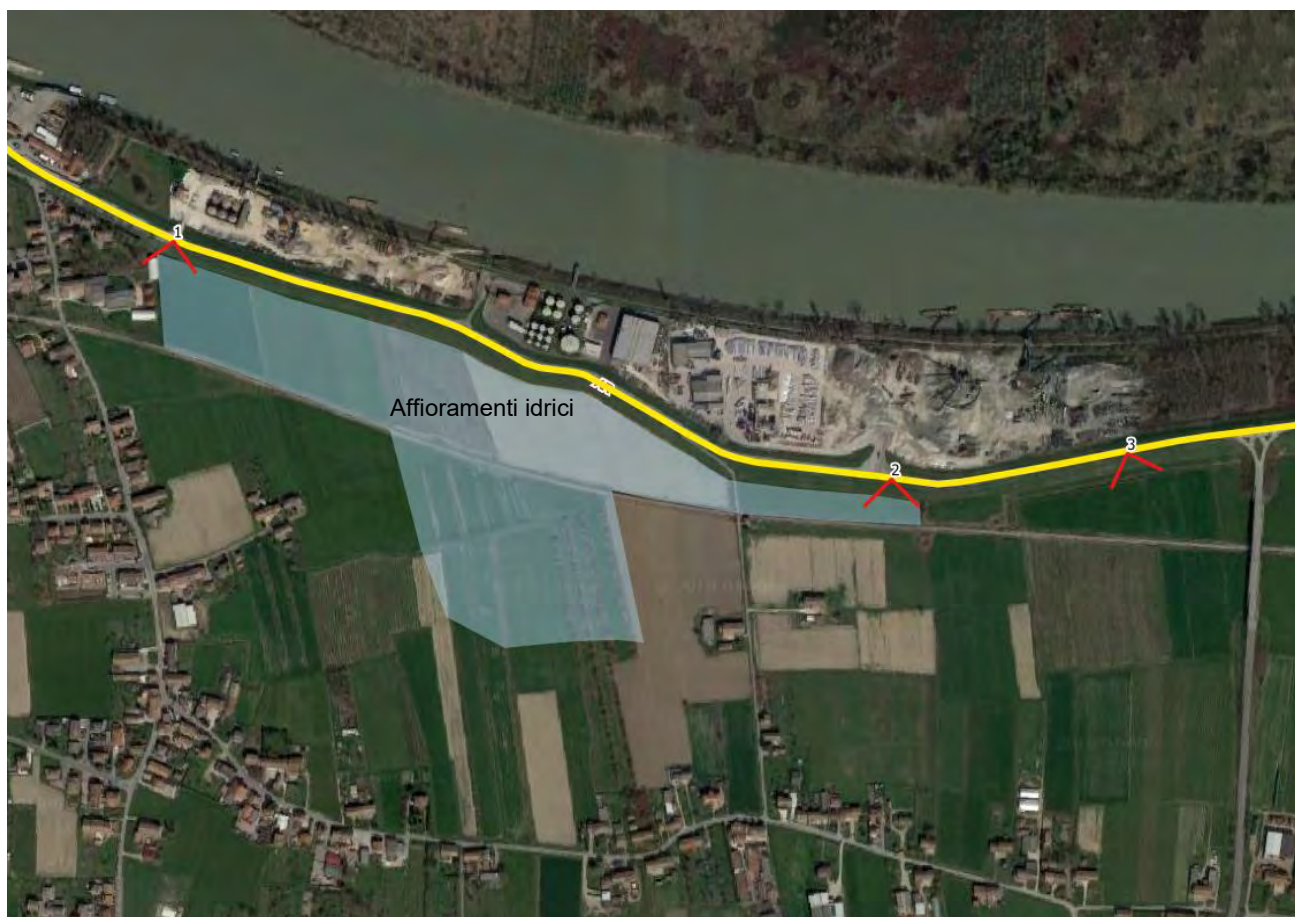


Fig. 12 – Ortofoto dell'area interessata da affioramenti idrici (il retino chiaro indica le aree con ristagni)

Il fatto che i ristagni idrici descritti fossero da imputarsi alla piena del Po e non alle intense precipitazioni dei giorni precedenti è testimoniata dal fatto che al contorno dell'area perimetrata in Fig. 12, anche i fossi più profondi risultavano asciutti.

Va segnalato, inoltre, che la zona interessata dal significativo fontanazzo sviluppatosi nel 2014 risultava completamente asciutta (Foto 3).



Foto 1 – Ristagni a ridosso dell'argine



Foto 2 – Ristagni in corrispondenza del fontanazzo storico, a monte della ribanca



Foto 3 - Area del fontanazzo innescatosi nel 2014

3.3 Permeabilità

La stima della permeabilità risulta fondamentale per lo studio in questione, per questo, di seguito, vengono dapprima riportati i risultati dei diversi studi realizzati in passato e poi vengono commentate le indagini svolte ad hoc nella campagna di indagine svolta nel 2019.

3.3.1 Campagne d'indagine pregresse

Sulla base dei dati bibliografici a disposizione, è stato evidenziato che indagini per la determinazione della permeabilità in loco sono state effettuate durante le campagne geognostiche *MagisPo 2001* e *AIPO 2017*, utilizzando metodi diversi.

Ulteriori stime della permeabilità (indirette) sono contenute nello studio effettuato dall'Università di Bologna (2017²).

² Garcia Martinez et alii (2017) - Analisi a ritroso della riattivazione dei fontanazzi presso gli argini maestri del fiume Po – Incontro annuale dei ricercatori di Geotecnica 2017 – IARG 2017 – Matera 5-7- Luglio 2017

3.3.1.1 Campagna di indagine Magispo 2001

Durante la campagna geognostica sono state eseguite 5 prove di permeabilità a carico variabile in situ nei terreni di fondazione dell'argine, in corrispondenza dei sondaggi a carotaggio continuo.

Sui campioni di laboratorio sono state eseguite 16 prove di permeabilità sui terreni arginali e 9 prove sui terreni di fondazione.

N° campione	Prof (m)	k (m/s)	Litologia
1	-1,2	1,50E-08	Limi argillosi - Sabbie
2	-1,3	3,00E-10	Limi argillosi
3	-2	6,00E-09	Limi argillosi
4	-1,4	3,00E-09	Limi argillosi - Sabbie
5	-1,4	9,00E-10	Limi argillosi
6	-0,5	1,00E-07	Limi argillosi - Sabbie
7	-0,6	1,00E-07	Limi argillosi
8	-0,7	1,00E-07	Limi argillosi - Sabbie
9	-0,7	1,00E-07	Limi argillosi - Sabbie
10	-0,7	9,90E-08	Limi argillosi - Sabbie
11	-4,4	3,00E-11	Argille limose - Limi sabbiosi
12	-1	4,10E-09	Limi argillosi - Sabbie
13	-1	7,10E-09	Limi argillosi
14	-0,7	3,10E-11	Limi argillosi - Limi sabbiosi
15	-0,7	2,80E-11	Limi argillosi
16	-0,7	3,60E-11	Limi argillosi - Limi sabbiosi

Tab. 1 – Prove di laboratorio sui terreni arginali

N° prova	Prof (m)	k (m/s)	Litologia
1	-9	2,00E-09	Limi argillosi
2	-8,8	1,00E-09	Limi argillosi - Sabbie limose
3	-12	1,50E-10	Limi argillosi
4	-9	1,00E-09	Argille limose
5	-13,5	2,00E-10	Argille limose
6	-8,7	3,27E-10	Limi argillosi
7	-16,5	4,50E-10	Limi argillosi
8	-7,5	7,50E-10	Argille limose
5	-9	6,30E-07	Limi sabbiosi

Tab. 2 – Prove di laboratorio sui terreni di fondazione

N° prova	Prof (m) (da sommità arginale)	k (m/s)	Litologia
1	-9,8	8,37E-08	Limi sabbiosi - Sabbie limose
2	-15	5,74E-08	Argille limose - Limi argillosi
3	-13,5	1,29E-09	Argille limose - Limi argillosi
4	-13,5	2,04E-08	Limi sabbiosi - Sabbie limose
5	-9	1,86E-05	Sabbie

Tab. 3 – Prove in situ sui terreni di fondazione

3.3.1.2 Campagna di indagine AIPO 2017

Per quanto riguarda la campagna AIPO, 2017, le prove di permeabilità sono state eseguite in situ nei fori di sondaggio.

Considerato che i sondaggi non sono stati tutti realizzati dalla sommità arginale, come invece avvenuto nelle campagne di indagini precedenti, nella tabella è indicata, oltre alla profondità, la posizione del sondaggio. La dicitura p.c. indica che il sondaggio è stato realizzato al piede dell'argine.

N° prova	Prof (m)	Posizione	k (m/s)	Litologia
S1 - Lf 1	-8.0	p.c.	1.15E-05	Sabbie fini limose
S1 - Lf 2	-19.5	p.c.	3.92E-05	Sabbie medio-fini debolmente limose
S2 - Lf 1	-13.5	p.c.	7.16E-06	Sabbie medio-fini debolmente limose
S3 - Lf 1	-18.0	Argine	4.89E-06	Sabbie fini debolmente limose
S3 - Lf 2	-24.0	Argine	1.19E-05	Sabbie fini debolmente limose
S4 - Lf 1	-9.0	p.c.	3.50E-05	Sabbie medio-fini

Tab. 4 – Prove in situ sui terreni di fondazione

Sulla base della profondità a cui sono stati prelevati i campioni su cui sono state eseguite le prove, si è suddivisa l'area in tre livelli a partire dal piano campagna:

argine (da 0 a -5 m), limi argillosi (da -5 a -15 m) e sabbie (oltre i -15 m). I range dei valori di k nei tre livelli sono riportati in tabella Tab. 5.

Litologia	k MAX	k MIN
Corpo arginale	1.00E-07	2.80E-11
Limi e argille dei terreni di fondazione	6.30E-07	1.50E-10
Sabbie dei terreni di fondazione	1.15E-05	4.89E-06

Tab. 5 – Valori massimi e minimi desunti dalle prove in situ e di laboratorio

3.3.1.3 Stima Università di Bologna

Infine, si riporta la valutazione della permeabilità effettuata nello studio del fenomeno di filtrazione di Boretto realizzata dall'Università di Bologna (Garcia Martinez et alii, 2017).

Nell'ambito di tale studio i valori di permeabilità non sono stati misurati direttamente ma calcolati con le formule empiriche proposte in Robertson (2010), basandosi sull'indice I_c derivato da prove penetrometriche elettriche con piezocono.

$$1.0 < I_c < 3.27 \quad k = 10^{(0.952 - 3.04 I_c)} \quad (m/s)$$

$$3.27 < I_c < 4.0 \quad k = 10^{(-4.52 - 1.37 I_c)} \quad (m/s)$$

I valori così stimati sono riportati nella seguente tabella.

Unità	k (m/s)	Litologia
Ar	3.98E-08	Alternanze di sabbie, sabbie limose, limi sabbiosi e limi argillosi
D1	1.84E-08	Depositi golenali prevalentemente costituiti da limi e limi argillosi
B	8.96E-09	Alternanze di limi e limi argillosi
C	1.18E-09	Argille con intercalazioni, talvolta frequenti, di materiale organico
A	4.41E-05	Depositi generalmente omogenei, costituiti da sabbie, talvolta sabbia limosa

Tab. 6 – Valori di permeabilità stimati**3.3.2 Campagna di indagini 2019**

Nel corso del 2019 è stata realizzata una campagna di indagini, pianificata in sede di progetto di fattibilità tecnica ed economica (cfr. § 4.1), che ha previsto anche la realizzazione di una prova di pompaggio e di prove di dissipazione durante l'esecuzione delle CPTU.

3.3.2.1 Campo prova di pompaggio Giugno 2019

La determinazione diretta della permeabilità dei terreni sabbiosi dell'acquifero interessati dal progetto è stata effettuata mediante un apposito campo prova ubicato come illustrato in Fig. 13. Tale campo prova è costituito da un pozzo profondo 45 m, e due piezometri profondi 20 m (All. 1.b). Lo spessore dell'acquifero risulta complessivamente di 38 m.



Fig. 13 – Ubicazione dei punti di prova

In Fig. 14 è riportato lo schema della disposizione del pozzo e dei piezometri, con le relative distanze.



Fig. 14 – Schema di disposizione del pozzo e dei piezometri

In Fig. 15 viene rappresentata la curva calcolata dei massimi abbassamenti in funzione della distanza, nella direzione parallela al flusso della falda. La curva è stata calcolata sulla base del modello di approssimazione logaritmica di Jacob:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \text{Log} \frac{2.25Tt}{x^2 S}$$

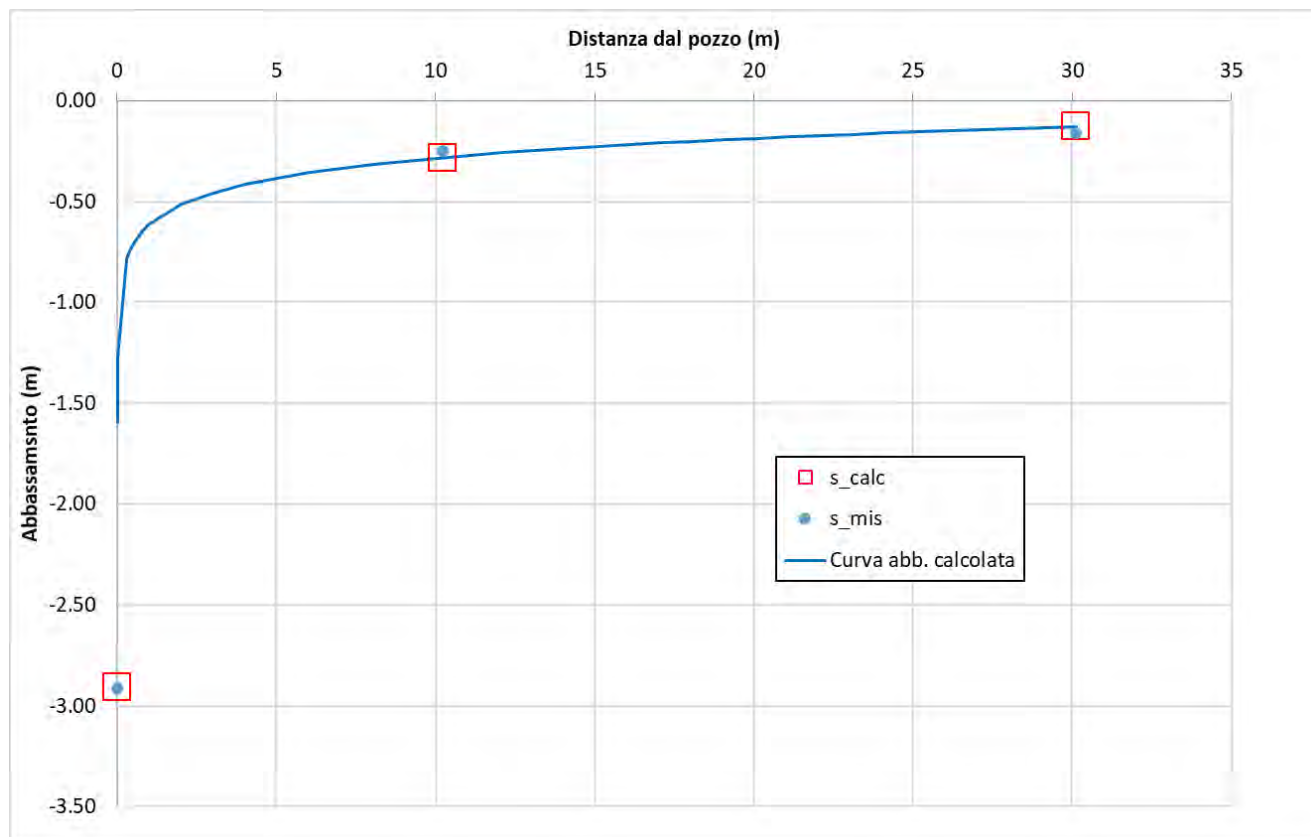


Fig. 15 - Curva calcolata degli abbassamenti in funzione della distanza (direzione di flusso della falda)

In Fig. 16 vengono riportate le curve abbassamenti-tempi per il pozzo ed i due piezometri di controllo.

In Fig. 17 vengono rappresentati gli stessi dati, per i soli piezometri, finalizzati alla valutazione delle rette di regressione logaritmica. Dalla figura si constata che i piezometri P_{z1} e P_{z2} presentano una marcata variazione della pendenza tra gli 80 ed i 110 minuti dall'inizio del pompaggio. In particolare, la pendenza tende ad aumentare, indicando la presenza di un limite imposto di trasmissività in diminuzione (riduzione dello spessore dell'acquifero o della permeabilità).

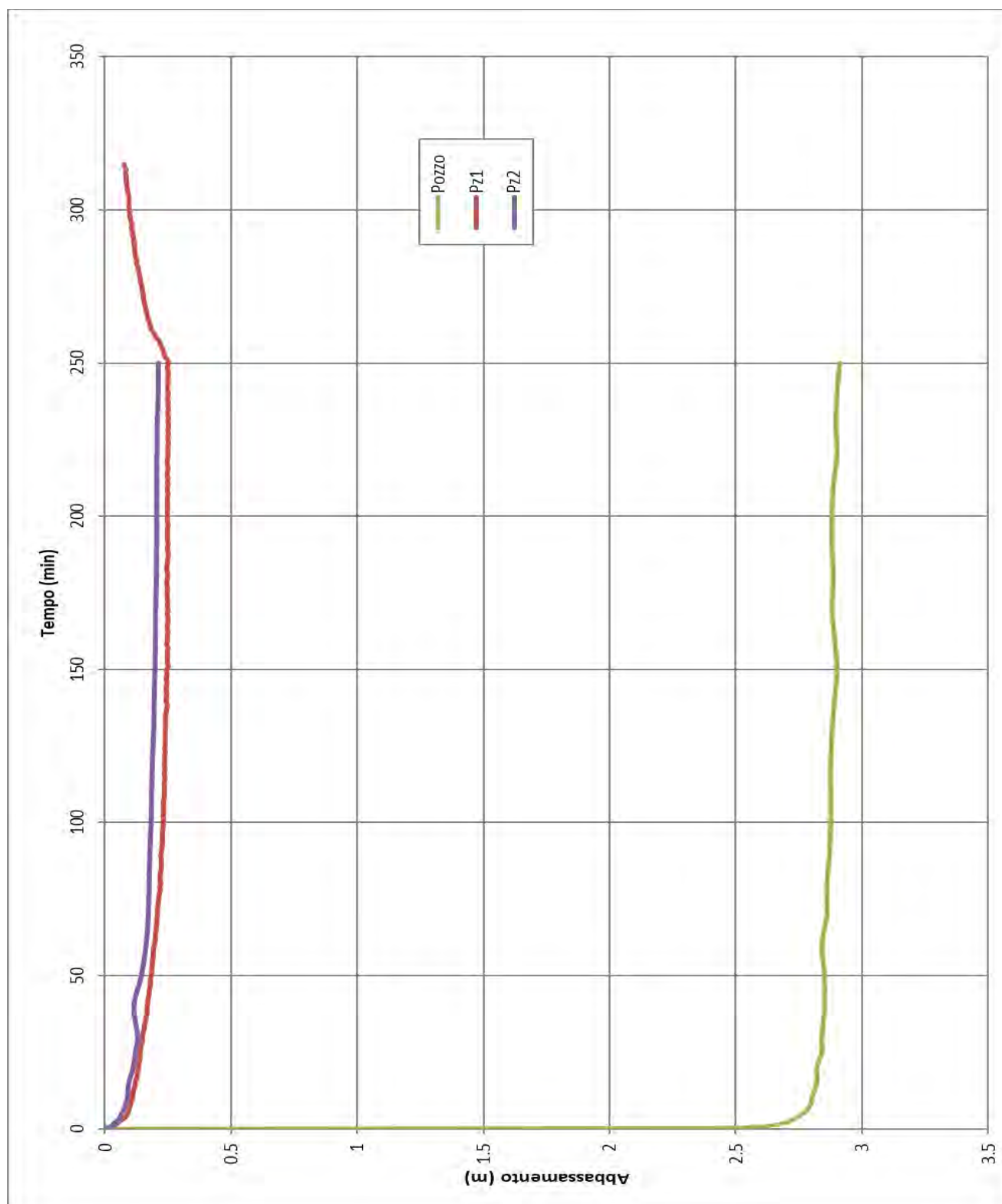


Fig. 16 – Grafico degli abbassamenti del tempo nei piezometri e nel pozzo di prova

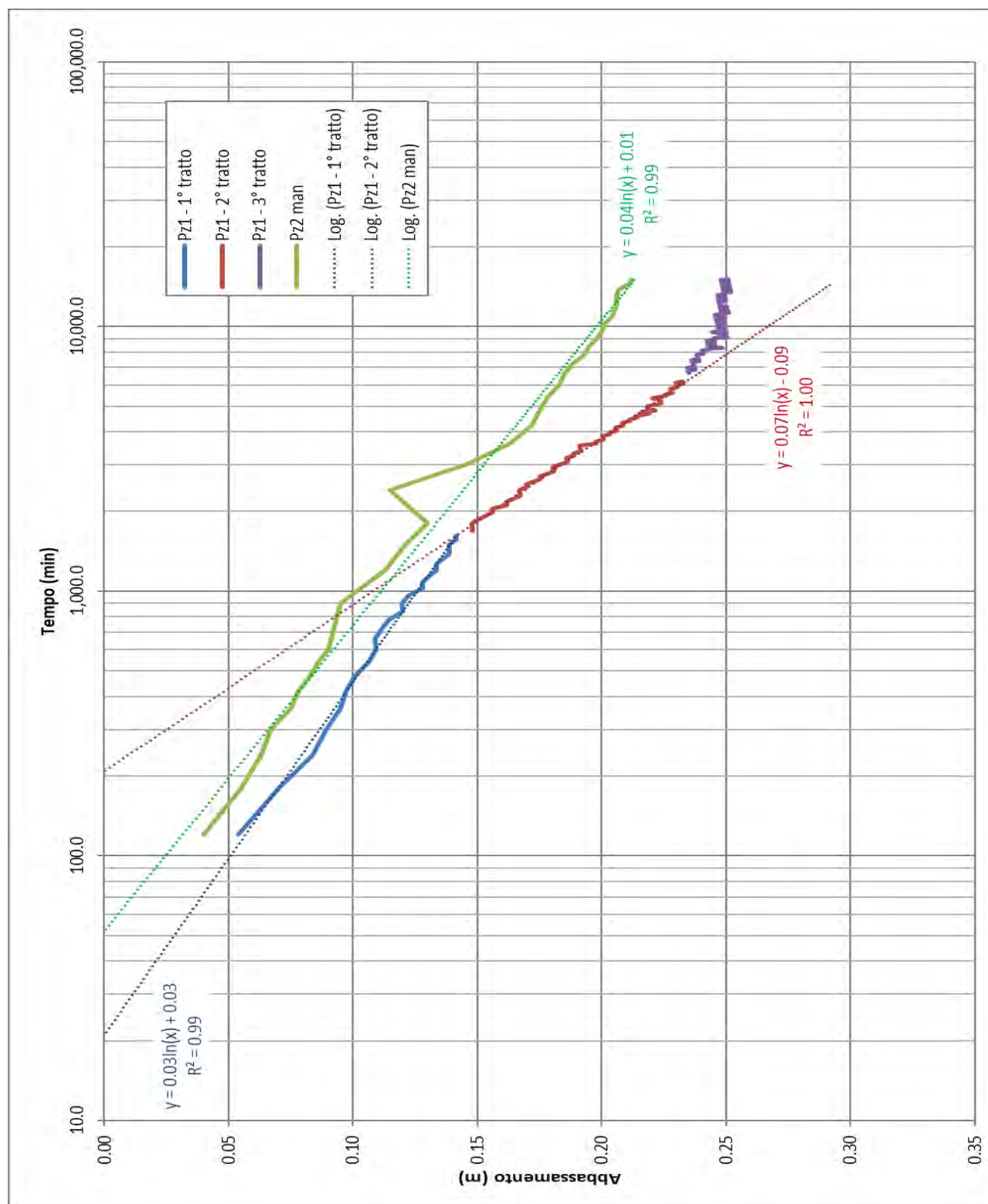


Fig. 17 – Rette di regressione logaritmica degli abbassamenti nei piezometri

3.3.2.1.1 Interpretazione della prova

3.3.2.1.1.1 Metodi

La prova di pompaggio a portata costante realizzata ha determinato l'instaurazione di un cono di depressione, le cui caratteristiche (forma e dimensione) dipendono da:

T = trasmissività dell'acquifero (kH)

S = coefficiente di immagazzinamento

Q = portata emunta

Secondo l'interpretazione data da *Theis (1935)* "la depressione indotta dal pompaggio si propaga radialmente in maniera indefinita, ma a velocità decrescente" secondo la relazione:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

Dove:

$$\frac{Q}{4\pi T} W(u)$$
$$\text{con } u = \frac{x^2 S}{4Tt}$$

in cui:

s = abbassamento registrato nel piezometro

x = distanza del piezometro di controllo dal pozzo

t = tempo dall'inizio della prova

Considerata la difficoltà di applicazione della formula ed i limiti connessi all'interpretazione (mezzo omogeneo ed isotropo, pozzo completo, ecc.)

l'interpretazione della prova è stata effettuata con il *modello di approssimazione logaritmica di Jacob (1950)*.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \text{Log} \frac{2.25Tt}{x^2 S}$$

Sull'andamento degli abbassamenti calcolati (s) sono state successivamente tracciate le rette di approssimazione logaritmica (Fig. 17).

A tale scopo sono stati utilizzati gli intervalli più significativi per le curve della prova eseguita. Le rette sono risultate sostanzialmente parallele, indicando che nonostante la ricarica della falda da parte del fiume, le due prove hanno dato il medesimo risultato.

Dalla formula di Jacob si ricavano:

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_2 - s_1)} \cdot \text{Log} \frac{t_2}{t_1}$$

Dove:

s_1, s_2 = abbassamenti ai tempi t_1 e t_2 in un singolo piezometro da cui, prendendo dal grafico t/s un valore $t_2 = 10 t_1$ si ricava:

$$T = 0.183Q/c$$

dove c = abbassamento modulare.

Ed inoltre:

$$S = \frac{2.25Tt_0}{x^2}$$

Dove:

t_0 = tempo di risposta del piezometro (ricavato dalla retta di approssimazione logaritmica)

x = distanza del piezometro dal pozzo di prova

3.3.2.1.1.2 Risultati

I seguenti parametri sono stati ottenuti una volta applicate le formule sopra riportate:

Piezometro	Trammissività m^2/s	Permeabilità m/s	Coeff. di immagazzinamento
Pz1 – 1° tratto	$5.23 \cdot 10^{-2}$	$1.38 \cdot 10^{-3}$	$2.36 \cdot 10^{-2}$
Pz1 – 2° tratto	$1.68 \cdot 10^{-2}$	$4.41 \cdot 10^{-4}$	$7.21 \cdot 10^{-2}$
Pz2	$3.16 \cdot 10^{-2}$	$8.31 \cdot 10^{-4}$	$3.91 \cdot 10^{-3}$

Tab. 7 – Risultati ottenuti dalle prove di pompaggio

Il range di permeabilità dell'acquifero è compreso tra 0.4 e $1.38 \cdot 10^{-3}$ m/s.

3.3.2.2 Prove di dissipazione (campagna indagini 2019)

La determinazione della permeabilità dei depositi fini soprastanti l'acquifero è stata effettuata nel corso delle prove penetrometriche mediate prove di dissipazione in foro (che verranno descritte in dettaglio nel capitolo successivo § 4.1.2).

I risultati delle prove sono sintetizzati in Tab. 8.

Prove di dissipazione - TERRENI COESIVI		
Prova	Prof.	Permeabilità
	m	m/s
CPTU1-P1	6.6	1.34E-08
CPTU5-P1	13.68	2.03E-07
CPTU6-P1	3.07	2.23E-08
CPTU7-P1	5.8	4.41E-09
CPTU8-P1	5.01	2.53E-09
CPTU10-P1	4.18	2.49E-09
CPTU11-P1	4	3.31E-10

Tab. 8 – Prove di dissipazione

4. INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOFISICHE ED ANALISI DI LABORATORIO

L'area di studio è stata oggetto di tre diverse campagne di indagine:

- Campagna indagine 2019, effettuata nel tratto dalla sezione 38 alla 51, lungo il quale saranno concentrati gli interventi di progetto; tale campagna di indagine è stata programmata nell'ambito del Progetto di fattibilità tecnica ed economica a seguito della prima definizione delle possibili aree di intervento.
- AIPO 2017, realizzata da Vicenzetto S.r.l sull'intero tratto arginale in esame;
- MagisPo 2001, realizzata dal Prof. S. Tagliavini per il progetto del sovrizzo arginale realizzato a seguito della piena del 2000. In realtà lo studio del 2001 comprende sia indagini appositamente realizzate in quell'anno, che la raccolta di dati del 1995, relativi ad indagini effettuate per la realizzazione di diaframmi plastici.

Per la migliore ricostruzione della stratigrafia dei terreni sono stati inoltre utilizzati i dati relativi alle stratigrafie riportate nel database del Servizio geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna, consultabile online all'indirizzo:
https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=geologia.

L'ubicazione di tutte le indagini utilizzate è riportata nella Tav. BRTT 3108 – Planimetria con ubicazione indagini.

I risultati di tutte le indagini in situ e di laboratorio utilizzate sono riportati nei seguenti allegati (ciascun allegato, per maggiore chiarezza, è suddiviso, al suo interno in fascicoli, come illustrato di seguito):

- BRTT 31.04 - Campagna geognostica 2019
 - 3104.1 Prove penetrometriche
 - 31.04.2 Stratigrafie pozzo e piezometri
 - 31.04.3 Interpretazione prove di dissipazione

- BRTT 31.05 - Campagna geognostica AIPO 2017
 - 31.05.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.05.2 Prove penetrometriche
 - 31.05.3 Prove geofisiche
 - 31.05.4 Prove di laboratorio
- BRTT 31.06 - Campagna geognostica MagisPo 2001
 - 31.06.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.06.2 Prove penetrometriche
 - 31.06.3 Prove di laboratorio
- BRTT 31.07 - Database geologico regionale
 - 31.07.1 Sondaggi stratigrafici
 - 31.07.2 Prove penetrometriche
 - 31.07.3 Stratigrafie pozzi idrici

4.1 Campagna di indagine 2019

Le indagini geognostiche effettuate durante tale campagna hanno avuto lo scopo di approfondire l'assetto litostratimetrico del tratto di argine individuato per la realizzazione degli interventi in progetto.

Di seguito vengono sintetizzate tutte le prove previste:

- N°9 prove penetrometriche con prova di dissipazione
- N°1 pozzo e N°2 piezometri (§ 3.3.2.1)

Nella planimetria di Tav. BRTT 3108 le indagini sono state riportate con suffisso 2019.

Nella tabella seguente viene riportato il dettaglio delle indagini utilizzate e la loro posizione in coordinate WGS84/UTM32N (EPSG:32632).

<i>Campagna di indagine</i>	<i>Codice</i>	<i>Tipo di indagine</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
Campagna indagini 2019	CPTU1_2019	CPTU	623911.8	4973269.8
Campagna indagini 2019	CPTU2_2019	CPTU	624070.4	4973187.0
Campagna indagini 2019	CPTU3_2019	CPTU	624068.6	4973118.0
Campagna indagini 2019	CPTU5_2019	CPTU	624298.2	4973156.7
Campagna indagini 2019	CPTU6_2019	CPTU	624590.9	4973200.2
Campagna indagini 2019	CPTU7_2019	CPTU	624687.8	4973215.5
Campagna indagini 2019	CPTU8_2019	CPTU	624702.4	4973115.2
Campagna indagini 2019	CPTU10_2019	CPTU	624845.9	4973217.8
Campagna indagini 2019	CPTU11_2019	CPTU	624854.0	4973158.7
Campagna indagini 2019	Pozzo_2019	POZZO	624514.7	4973169.1
Campagna indagini 2019	Pz1_2019	PIEZOMETRO	624516.5	4973158.6
Campagna indagini 2019	Pz2_2019	PIEZOMETRO	624518.9	4973139.0

Tab. 9 - Dettaglio delle indagini Campagna Indagini 2019

4.1.1 Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono

Sono state eseguite n°9 prove penetrometriche statiche, tutte con punta elettrica e piezocono, di cui n°4 fino alla profondità di 45 m da p.c. o rifiuto e n°5 spinte fino a 10 m da p.c. o rifiuto.

Le indagini più profonde sono state eseguite utilizzando un penetrometro Pagani da 200 kN di spinta massima, montato su MERCEDES UNIMOG.

Le prove meno profonde sono state effettuate con un penetrometro PAGANI TG63 cingolato da 100 kN.

Ciascuna prova è consistita nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta elettrica dotata di piezocono, di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ($V = 2 \text{ cm/s} \pm 0.5 \text{ cm/s}$). La penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta, che agisce su una batteria di aste (aste cave con il cavo di trasmissione dati all'interno), alla cui estremità inferiore è collegata la punta con piezocono.

Lo sforzo necessario per l'infissione viene determinato a mezzo di un opportuno sistema di misura estensimetrico collegato alla punta ed al manicotto dell'attrito laterale, e da un trasduttore di pressione per la misura della pressione interstiziale dei pori, cioè il carico idraulico istantaneo presente nell'intorno della punta, attraverso un setto poroso opportunamente saturato e disareato.

I dati delle resistenze alla punta, al manicotto laterale, della pressione dei pori e dell'inclinazione della punta vengono registrati su supporti magnetici e successivamente elaborati.

Le dimensioni della punta/manicotto sono standardizzate, e precisamente:

- diametro di base del cono $\phi = 35.7$ mm
- area della punta conica $A_p = 10$ cm²
- angolo apertura del cono $B = 60^\circ$

Nei diagrammi e nelle tabelle riportati in All.1.a sono riportati i seguenti valori di resistenza (rilevati dalle letture di campagna, durante l'infissione dello strumento):

- q_c (MPa) = resistenza alla punta (conica);
- R_l (kPa) = resistenza laterale (manicotto);
- U (kPa) = pressione dei pori (setto poroso);

I parametri sopra descritti sono rilevati ad intervalli regolari di 2 cm.

In Fig. 18 e in Fig. 19 sono rappresentati i grafici che rappresentano le variazioni della resistenza alla punta (R_p) e della resistenza laterale (R_l) con la profondità per le nove prove effettuate.

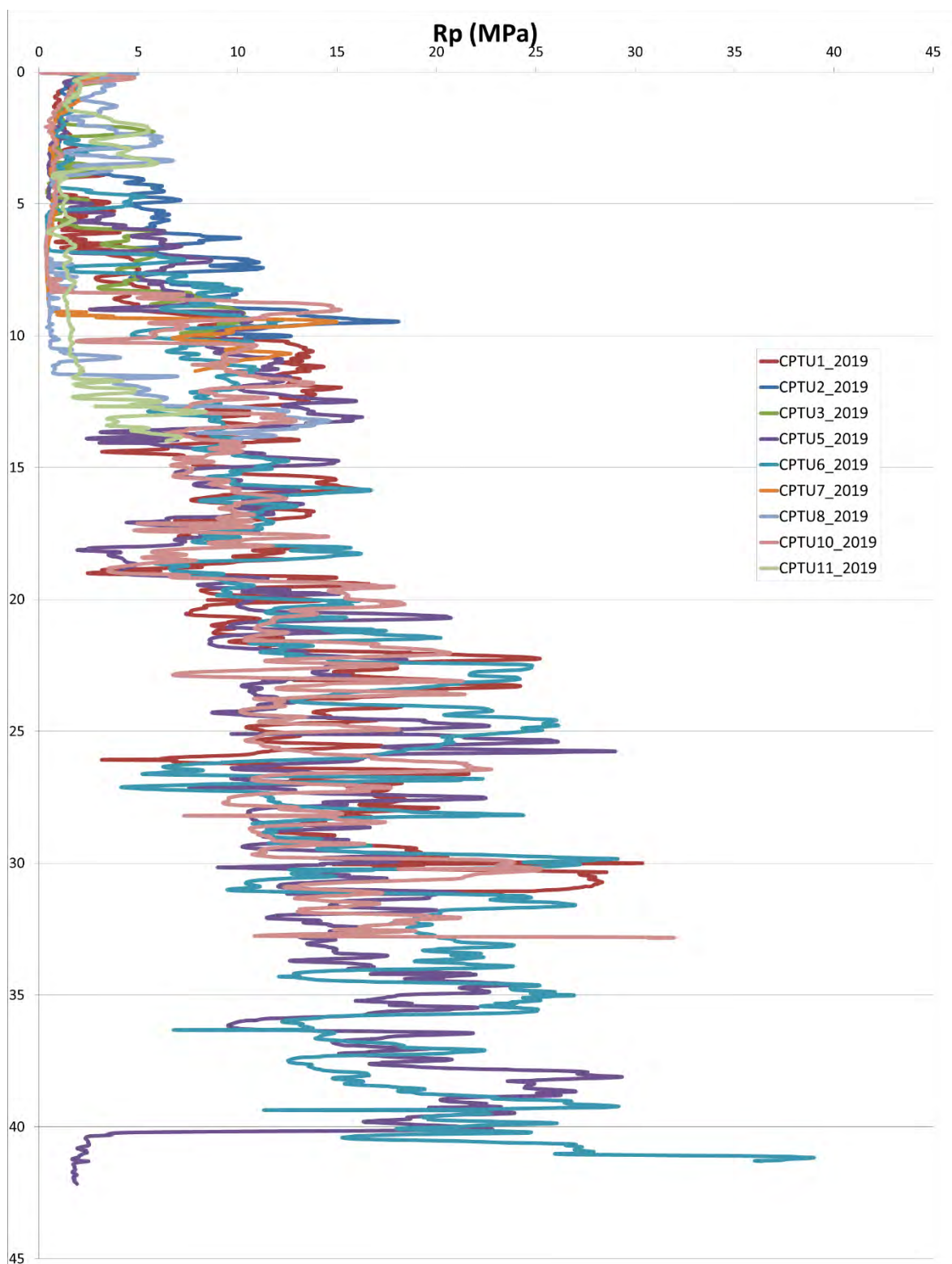


Fig. 18 – Rappresentazione grafica della resistenza alla punta (R_p) con la profondità

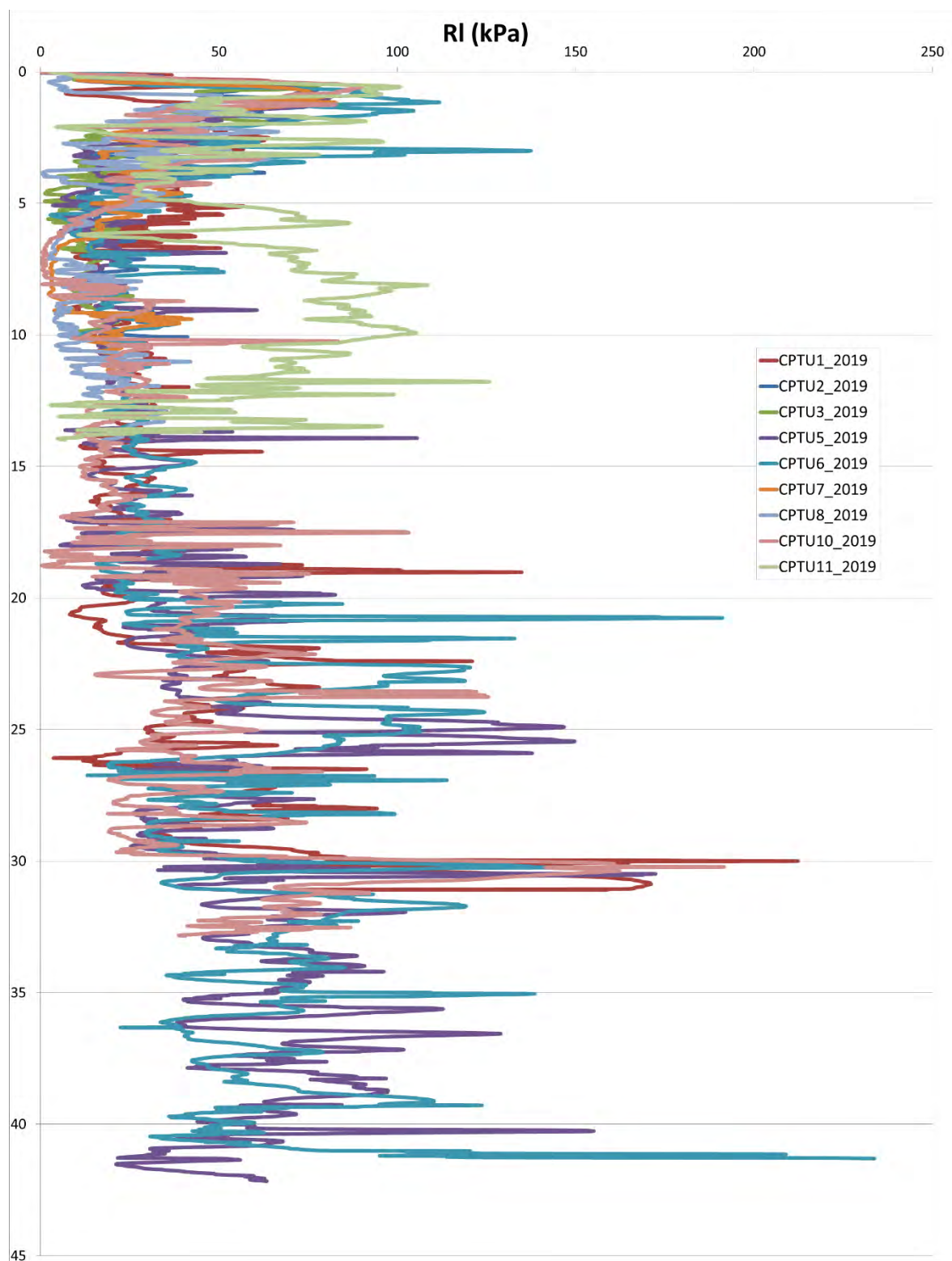


Fig. 19 – Rappresentazione grafica della resistenza laterale (RI) con la profondità

4.1.2 Prove di dissipazione

La prova di dissipazione viene eseguita utilizzando il piezocono, punta elettrica corredata di un sensore piezometrico, e permette la misura delle sovrappressioni interstiziali durante l'infissione.

La dissipazione ha inizio con l'arresto dell'infissione e la registrazione nel tempo della pressione interstiziale U_t . Essa inizia a decrescere dal valore iniziale U_i verso il valore di equilibrio corrispondente alla pressione idrostatica U_0 . Dalla velocità di dissipazione è possibile ricavare il coefficiente di consolidazione correlato alla permeabilità del terreno.

L'elaborazione delle prove di dissipazione è stata effettuata mediante il programma CPeT-IT2 della Geologismiki, mediante il metodo grafico indicato da Robertson e Campanella (1989).

Il coefficiente di permeabilità è ricavato dalla formula:

$$k = c_h * \gamma_w / M$$

dove:

γ_w = peso di volume dell'acqua

M = modulo edometrico

c_h = Coefficiente di consolidazione orizzontale calcolato con il metodo di Houlsby e Teh (1988) mediante l'espressione:

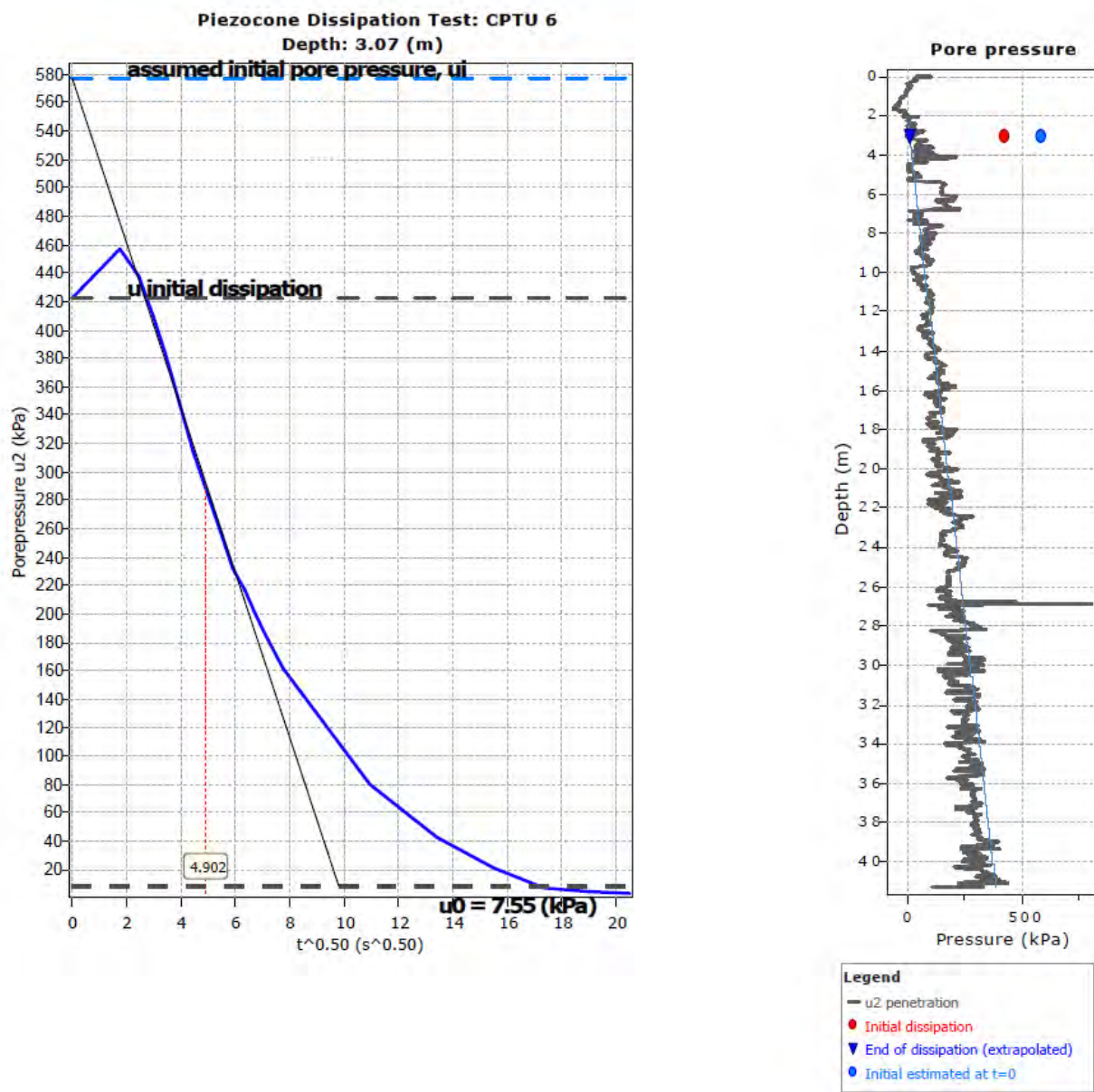
$$c_h = \frac{T * r^2 * I_r^{0.5}}{t_{50}}$$

dove:

T = fattore tempo (Houlsby e Teh, 1988)

r = raggio del piezocono

I_r = Indice di rigidezza



Tabular results

CPTU Borehole	Depth (m)	$(t_{50})^{0.50}$	t_{50} (s)	t_{50} (years)	G/S_u	c_h (m ² /s)	c_h (m ² /year)	M (MPa)	k_h (m/s)
CPTU 6	3.07	4.9	24	7.62E-007	375.99	6.62E-005	2088	29.17	2.23E-008

Fig. 20 – Esempio di applicazione del metodo di interpretazione delle prove di dissipazione

I tabulati di interpretazione delle prove sono riportati in All. 1.c.

I risultati delle prove sono sintetizzati in Tab. 10.

Prove di dissipazione - TERRENI COESIVI		
Prova	Prof.	Permeabilità
	m	m/s
CPTU1-P1	6.6	1.34E-08
CPTU5-P1	13.68	2.03E-07
CPTU6-P1	3.07	2.23E-08
CPTU7-P1	5.8	4.41E-09
CPTU8-P1	5.01	2.53E-09
CPTU10-P1	4.18	2.49E-09
CPTU11-P1	4	3.31E-10

Tab. 10 – Prove di dissipazione

4.2 Indagini pregresse

4.2.1 Campagna di indagine MagisPo 1995-2001

La campagna di indagine 2001 (che in realtà, come detto, comprende anche indagini del 1995) è costituita da:

- N° 19 prove penetrometriche statiche con punta meccanica
- N° 4 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono
- N° 4 sondaggi a carotaggio continuo

A corredo della campagna di indagine sono state realizzate prove di laboratorio su 10 campioni indisturbati costituite da:

- Caratterizzazioni (granulometria, umidità, peso di volume);
- Edometrie;
- Prove di taglio.

Nella planimetria di Tav. BRTT 3108 le indagini della campagna 2001 sono state riportate con il codice assegnato dal Prof. Tagliavini, unito al prefisso TA_.

In Tab. 11 viene riportato il dettaglio delle indagini utilizzate e la loro posizione in coordinate WGS84/UTM32N (EPSG:32632). In tabella il significato dei codici delle tipologie di indagine è il seguente:

- S: Sondaggio a carotaggio continuo

- CPTE: Prova penetrometrica statica con punta elettrica
- CPT: Prova penetrometrica statica con punta meccanica

Campagna di indagine	Codice	Tipo di indagine	x	y
Magispo 2001	TA_S1-D_1995	S	622150.8	4973940.45
Magispo 2001	TA_S1-E_1995	S	624629.16	4973234.53
Magispo 2001	TA_S1-F_1995	S	625355.51	4973379.28
Magispo 2001	TA_S4_2001	S	625838.35	4973318.78
Magispo 2001	TA_CPTE1-D_1995	CPTE	621873.93	4974081.76
Magispo 2001	TA_CPTE3-E_1995	CPTE	624685.56	4973244.43
Magispo 2001	TA_CPTE4-D_1995	CPTE	622169.26	4973937.98
Magispo 2001	TA_CPTE5-F_1995	CPTE	625494.31	4973395.89
Magispo 2001	TA_CPT15_2001	CPT	624976.8	4973287.05
Magispo 2001	TA_CPT16_2001	CPT	624271.84	4973189.76
Magispo 2001	TA_CPT1-E_1995	CPT	624440.6	4973203.1
Magispo 2001	TA_CPT1-F_1995	CPT	625110.25	4973312.45
Magispo 2001	TA_CPT2-D_1995	CPT	622002.65	4974021.49
Magispo 2001	TA_CPT2-D_1995	CPT	623454.75	4973516.94
Magispo 2001	TA_CPT2-E_1995	CPT	624575.35	4973228.5
Magispo 2001	TA_CPT2-F_1995	CPT	625212.71	4973333.55
Magispo 2001	TA_CPT3-D_1995	CPT	622098.66	4973968.11
Magispo 2001	TA_CPT3E-F_1995	CPT	625293.82	4973360.9
Magispo 2001	TA_CPT4-E_1995	CPT	624798.14	4973259.07
Magispo 2001	TA_CPT4-F_1995	CPT	625387.25	4973385.51
Magispo 2001	TA_CPT5-C_1995	CPT	621746.94	4974035.27
Magispo 2001	TA_CPT5-D_1995	CPT	622339.31	4973886.31
Magispo 2001	TA_CPT5-E_1995	CPT	624888.54	4973271.98
Magispo 2001	TA_CPT6-B_1995	CPT	621371.32	4973781.06
Magispo 2001	TA_CPT6-C_1995	CPT	621718.09	4974024.08
Magispo 2001	TA_CPT6-D_1995	CPT	622405.39	4973862.64
Magispo 2001	TA_CPT6-F_1995	CPT	625612.06	4973397.38

Tab. 11 – Dettaglio delle indagini Campagna Magispo 2001

4.2.2 Campagna di indagine AIPO 2017

La campagna di indagine 2017 comprende:

- N° 11 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono
- N° 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica, piezocono e cono sismico

- N° 7 sondaggi a carotaggio continuo
- N° 6 sezioni sismiche in onde P e onde S
- N° 21 sezioni geoelettriche (ERT)

A corredo della campagna di indagine sono state realizzate prove di laboratorio su 7 campioni indisturbati costituite da:

- Caratterizzazioni (granulometria, umidità, peso di volume);
- Edometrie;
- Prove di taglio
- Prove di permeabilità.

Nella planimetria di Tav. BRTT 3108 le indagini della campagna 2001 sono state riportate con il codice assegnato dalla Ditta Vicenzetto.

In Tab. 12 viene riportato il dettaglio delle indagini geognostiche utilizzate e la loro posizione in coordinate WGS84/UTM32N (EPSG:32632). In tabella il significato dei codici delle tipologie di indagine è il seguente:

- S: Sondaggio a carotaggio continuo
- CPTU: Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono
- SCPTU: Prova penetrometrica statica con punta elettrica, piezocono e cono sismico

Campagna di indagine	Codice	Tipo di indagine	x	y
AIPO 2017	S1	S	623499.47	4973346.87
AIPO 2017	S2	S	624496.67	4973147.03
AIPO 2017	S4	S	624607.9	4973155.4
AIPO 2017	S3	S	624512.39	4973224.1
AIPO 2017	SI-2	S	622408.05	4973869.88
AIPO 2017	SI3	S	624565.78	4973244.68
AIPO 2017	CPTU10	CPTU	624611.86	4973372.4
AIPO 2017	CPTU11	CPTU	624617.08	4973154.86
AIPO 2017	CPTU2	CPTU	623423.04	4973367.35
AIPO 2017	CPTU3	CPTU	623976.17	4973411.01
AIPO 2017	CPTU4	CPTU	623859.22	4973264.38
AIPO 2017	CPTU5	CPTU	624283.79	4973371.86
AIPO 2017	CPTU7	CPTU	624281.55	4973114.49
AIPO 2017	CPTU8	CPTU	624422.35	4973367
AIPO 2017	CPTU1	CPTU	623431.9	4973470.91
AIPO 2017	CPTU6	CPTU	624440.72	4973210.13

<i>Campagna di indagine</i>	<i>Codice</i>	<i>Tipo di indagine</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
AIPO 2017	SCPTU1	SCPTU	623554.51	4973437.56
AIPO 2017	SCPTU2	SCPTU	623930.92	4973295.27
AIPO 2017	SCPTU3	SCPTU	624345.48	4973193.11

Tab. 12 – Dettaglio delle indagini geognostiche Campagna AIPO 2017

In Tab. 13 viene riportato il dettaglio delle indagini geofisiche e la loro posizione in coordinate geografiche WGS84.

		<i>Inizio stendimento</i>		<i>Fine stendimento</i>	
		<i>LONG.</i>	<i>LAT.</i>	<i>LONG.</i>	<i>LAT.</i>
ERT	1	10.577819	44.901722	10.576091	44.901505
	2	10.577873	44.901613	10.576138	44.901389
	2b	10.577965	44.901511	10.576183	44.901297
	3	10.57787	44.901421	10.57615	44.901192
	4	10.577845	44.901353	10.576225	44.901142
	5	10.578172	44.900502	10.578066	44.901537
	6	10.579335	44.901367	10.574879	44.900873
	6b	10.579364	44.901201	10.57488	44.900824
	7	10.575986	44.900612	10.575896	44.901254
	8	10.566011	44.90347	10.564304	44.903833
	9	10.565751	44.903492	10.564181	44.90381
	9b	10.565973	44.903344	10.564215	44.903697
	10	10.565933	44.903274	10.564217	44.903628
	11	10.565916	44.903222	10.564193	44.903573
	12	10.565481	44.902009	10.565098	44.90352
	13	10.575549	44.900665	10.578255	44.900544
	14	10.577979	44.901604	10.577942	44.902031
	15	10.57773	44.901575	10.577683	44.902001
	16	10.577433	44.901537	10.577366	44.901954
	17	10.574855	44.900806	10.579364	44.901057
SISMICA	17b	10.579385	44.900972	10.574892	44.900767
	17c	10.57493	44.900721	10.579419	44.900708
	A	10.525502	44.902506	10.524218	44.902508
	B	10.535951	44.906408	10.536974	44.906979
	C	10.552793	44.907156	10.551583	44.907452
	D	10.561805	44.904457	10.560657	44.904884
	E	10.575757	44.901361	10.577011	44.90153
	F	10.578553	44.901701	10.577281	44.901616

Tab. 13 – Dettaglio delle indagini geofisiche Campagna AIPO 2017

4.2.3 Database RER

Dal database regionale sono stati estratti i soli dati utilizzabili per l'integrazione della sezione litostratimetrica, dove ritenuto necessario e cioè:

- N° 5 sondaggi a carotaggio continuo
- N° 6 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono
- N° 6 prove penetrometriche statiche con punta meccanica
- N° 1 stratigrafia di pozzi per acqua

Nella planimetria di Tav. BRTT 3108 le indagini estratte dal database regionale sono state riportate con il codice del database stesso.

In Tab. 14 viene riportato il dettaglio delle indagini utilizzate e la loro posizione in coordinate WGS84/UTM32N (EPSG:32632). In tabella il significato dei codici delle tipologie di indagine è il seguente:

- S: Sondaggio a carotaggio continuo
- CPTU: Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono
- CPT: Prova penetrometrica statica con punta meccanica
- PA: pozzo per acqua

Campagna di indagine	Codice	Tipo di Indagine	x	y
Database RER	182080C075	CPT	625230.92	4973296
Database RER	182070C029	CPT	623239.34	4973497
Database RER	182070C028	CPT	623208.12	4973506
Database RER	182070C059	CPT	623092.51	4973539
Database RER	182070C058	CPT	623090.56	4973551
Database RER	182080C076	CPT	625478.87	4973333
Database RER	182070B002	CPTU	624756.53	4973257
Database RER	182070U520	CPTU	622802.74	4973751
Database RER	182070U517	CPTU	621670.11	4974016
Database RER	182070U508	CPTU	623713.59	4973387
Database RER	182070B001	CPTU	621675.36	4974018
Database RER	182080U508	CPTU	625756.38	4973367
Database RER	182070P614	PA	621451.12	4973895

<i>Campagna di indagine</i>	<i>Codice</i>	<i>Tipo di Indagine</i>	<i>x</i>	<i>y</i>
Database RER	182070P503	S	621965.77	4974041
Database RER	182080P502	S	625855.88	4973100
Database RER	182110P501	S	622435.66	4972845
Database RER	182070P504	S	621988.32	4973989
Database RER	182070P506	S	624840.38	4973271

Tab. 14 – Dettaglio delle indagini del database RER

5. LITOSTRATIMETRIA

La correlazione di tutti i dati stratigrafici disponibili ha consentito di ricostruire la sezione litostratimetrica ed idrogeologica longitudinale (in asse all'argine) di Tav. BRTT 3109 e le Sezioni litostratimetriche ed idrogeologiche trasversali di Tav. BRTT 3110.

Le correlazioni sui depositi profondi lungo la sezione longitudinale sono state desunte sulla base delle prove lungo l'asse trasversale; le 8 sezioni trasversali all'argine sono state realizzate dove si disponeva di dati stratigrafici significativi per la loro ricostruzione.

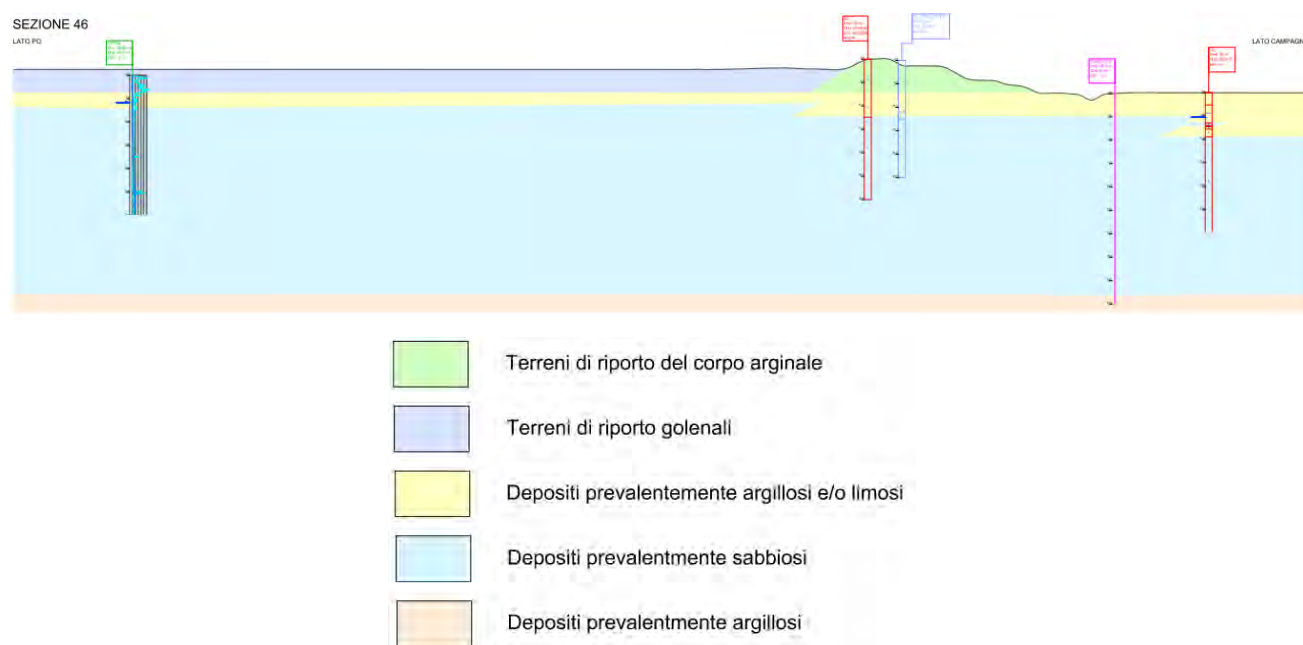


Fig. 21 – Stralcio della sezione trasversale 46

Le prime due classi individuano, indipendentemente dalle loro caratteristiche litologiche:

- I terreni di riporto del corpo arginale. Si tratta, in genere di depositi fini, coesivi, a granulometria limosa o limoso argillosa. Localmente, tuttavia, sono presenti modeste lenti sabbiose. E' evidente che gli argini hanno subito innumerevoli sovralti ed allargamenti nel corso dei secoli e la loro conforma-

zione è legata alla disponibilità dei materiali al momento del sovrizzo, determinando, quindi un'inevitabile disomogeneità litologica.

- I terreni di riporto golenali. Gran parte dell'area golenale aperta è interessata dalla presenza di insediamenti industriali. Tali aree, nel corso del tempo, sono state anch'esse sovenzate (non è noto con che tipo di materiali) in modo da consentirne la fruibilità per tempi più lunghi nel corso dell'anno. In alcuni tratti le aree golenali con insediamenti industriali risultano di ben 3.50 m più alte delle aree extragolenali.

Nei terreni di fondazione dell'argine i depositi naturali della piana alluvionale si distinguono:

- depositi prevalentemente argillosi e/o limosi: si tratta dei depositi di piana alluvionale e/o di piana inondabile legati alla deposizione con modeste velocità delle correnti di piena o in completa assenza di corrente. Hanno comportamento coesivo e presentano permeabilità bassa o molto bassa. Presentano uno spessore variabile da 4 a oltre 10 m al di sotto dell'argine e nelle aree extragolenali.
- depositi prevalentemente sabbiosi. Si tratta di depositi di canale o di barra, caratterizzati da granulometrie medie o fini, talora grossolane con raro ghiaietto; quasi assente la matrice fine. Sono presenti a partire da piano campagna nelle aree golenali non interessate da sovenzzi antropici, mentre si approfondiscono a 4-10 m sotto il rilevato arginale e nella zona extragolenale. I dati stratigrafici disponibili indicano uno spessore del banco sabbioso di circa 35-40 m (come rilevato dalle prove effettuate durante la campagna indagini 2019).
- depositi prevalentemente argillosi. Sono i depositi di base del banco sabbioso, rilevati soltanto in alcuni pozzi del database regionale e in sole due prove durante la campagna indagini 2019 (pozzo e CPTU5). Costituiscono, evidentemente, sedimenti legati ad una diversa fase deposizionale, durante la quale il canale principale del paleo-Po era localizzato in una posizione abbastanza distante dalla attuale.

6. ASPETTI SISMICI

Come già accennato in premessa si precisa che, sebbene l'intervento non richieda particolari valutazioni di carattere sismico, vista la problematica oggetto del progetto, inerente esclusivamente agli aspetti idrogeologici, nella presenta relazione, per completezza della documentazione, è stato affrontato anche l'aspetto sismico.

6.1 Caratteristiche sismotettoniche

Un elemento fondamentale nella valutazione del rischio sismico di un'area è l'identificazione delle faglie attive. Sebbene esistano, infatti, strutture a scorrimento lento asismico (*fault creep o tectonic creep*), molte delle faglie attive sono considerate sorgenti sismiche in quanto lo scorrimento istantaneo dei due lati delle stesse, che avviene allorché lo stress supera la resistenza delle rocce, genera il rilascio di onde elastiche che si propagano in tutte le direzioni. A tali faglie sismogenetiche è associato il maggior rischio.

Per la definizione di faglia attiva si fa normalmente riferimento alla possibilità che una faglia possa attivarsi in un intervallo di tempo futuro che interessa la nostra società. D'altra parte, le faglie che hanno la maggiore probabilità di muoversi in un futuro prossimo sono da ricercarsi tra quelle che si sono mosse nelle fasi più recenti della storia geologica. Così una delle definizioni più comunemente accettata è quella della *U.S Nuclear Regulatory Commission* (1982), che definisce attive le faglie che presentano un'attivazione negli ultimi 35.000 anni o almeno due negli ultimi 500.000 anni.

La Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna alla scala 1:250.000, oltre alla definizione della pericolosità sismica locale e all'individuazione di strutture potenzialmente sismogenetiche, offre anche un quadro delle relazioni fra attività tettonica attuale e i rischi naturali. In detto lavoro, infatti, l'analisi comparata della sismicità e delle strutture attive, evidenti per la loro espressione sia morfologica che geologica, unitamente ad una riconsiderazione dei dati disponibili sui movimenti verticali del suolo (sollevamento dei terrazzi alluvionali, subsidenza, evoluzione del

reticolo idrografico) e alla ricostruzione delle isobate delle 2 principali e più recenti superfici di discontinuità del sottosuolo (rispettivamente 450.000 anni, base del SERS, e 10.000 anni, base dell'Olocene), ha permesso di ottenere un quadro neotettonico e sismotettonico ben definito del territorio indagato.

Esaminando la Fig. 22, che può essere considerata lo schema di sintesi sull'attività neotettonica in Emilia-Romagna, emerge che le zone a maggiore sollevamento, con tassi >1 mm/anno, sono individuabili nella parte alta della catena, corrispondente al settore a monte del principale raddoppio crostale a conferma dell'attività di questa struttura.

L'area a sollevamento intermedio, con tassi mediamente ≥ 1 mm/anno, corrisponde al settore immediatamente retrostante la struttura superficiale del margine che da Bologna si estende verso NW fino alla valle del Taro.

Le aree a minore sollevamento (<1 mm/anno) si collocano immediatamente a valle della struttura crostale.

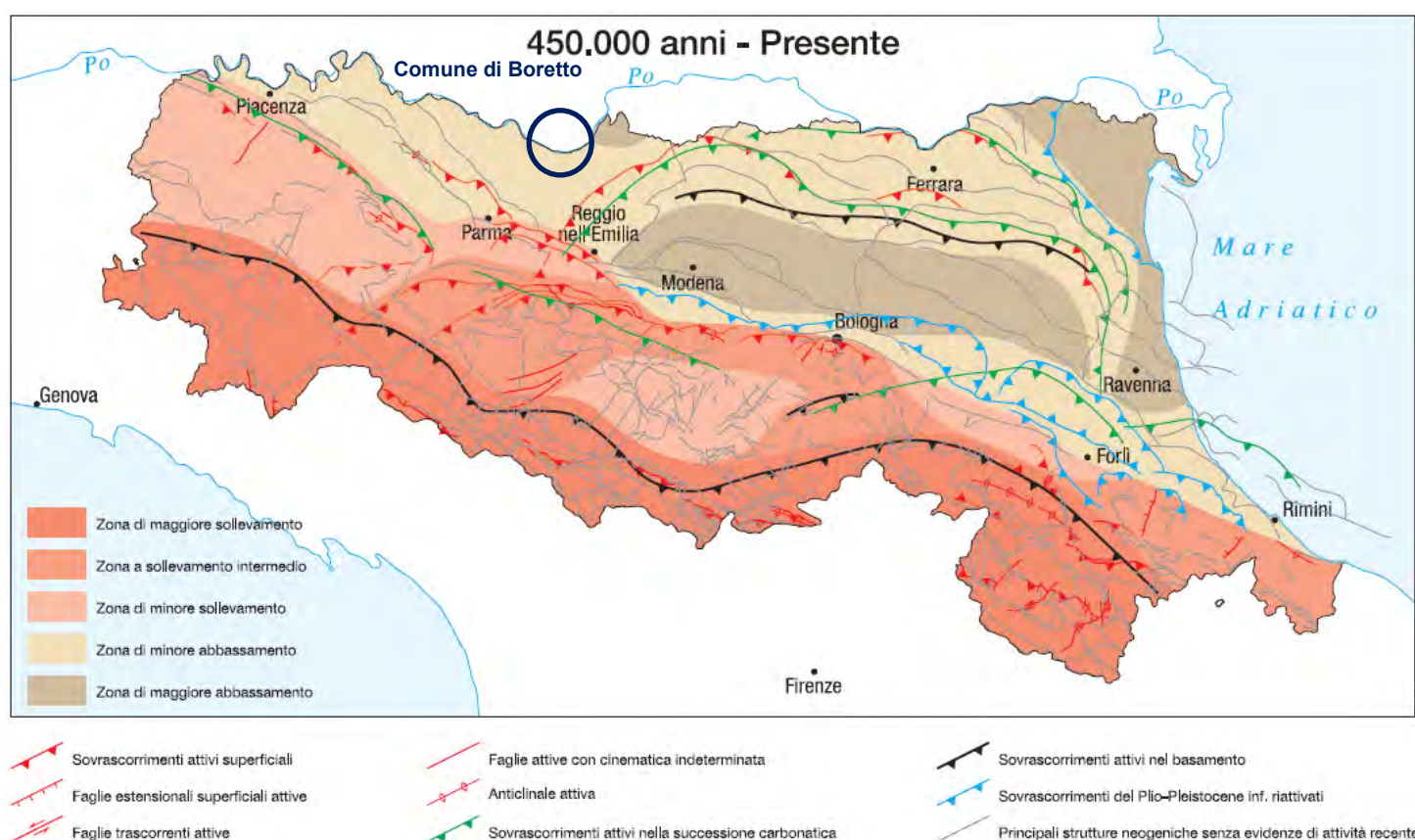


Fig. 22 - Schema di sintesi sull'attività neotettonica in Emilia-Romagna

Anche in pianura le zone di minore abbassamento, con tassi <1 mm/anno, corrispondono alle aree maggiormente interessate dalle strutture attive. Le strutture di questo settore sono sepolte e non mostrano, generalmente, evidenze in superficie.

In particolare, il sistema attivo delle Pieghe Emiliane e Ferraresi a nord di Parma/Reggio Emilia corrisponde al limite tra la zona in minore sollevamento della catena con la zona di minore abbassamento della pianura.

La sismicità legata alle strutture superficiali, con ipocentri mediamente ad una profondità inferiore a 15 km, risulta molto diffusa in catena e più localizzata in pianura, soprattutto in corrispondenza della dorsale ferrarese.

I meccanismi focali calcolati risultano compressivi e trascorrenti indicando direzioni di compressione sia NE-SW che NW-SE. I meccanismi focali distensivi sono nettamente secondari. Risulta quindi che la cinematica delle principali strutture attive superficiali è di tipo transpressivo.

La sismicità crostale, con ipocentri mediamente compresi tra 15 e 35 km, mostra una distribuzione simile a quella più superficiale ma con una densità inferiore. Anche in questo caso i meccanismi focali risultano compressivi e trascorrenti con direzioni di compressione sia NW-SE che NE-SW ed i meccanismi distensivi sono rari e ben localizzati.

La sismicità più profonda, con ipocentri oltre i 35 km, fino ad oltre 50 km, è sempre diffusa nel settore di catena e in corrispondenza del margine appenninico-padano, e decisamente minore in pianura. I meccanismi focali calcolati sono in accordo con quanto riscontrato nei livelli strutturali superiori.

Risulta così un modello geodinamico attivo in cui le strutture superficiali della copertura, quelle crostali nonché quelle del mantello, sebbene tra loro distinte, sono tutte coerenti e inquadrabili in un sistema transpressivo che rispetto alle zone esterne dell'avampaese padano, relativamente stabili, assume il significato di un sistema di ordine inferiore all'interno di una zona di trascorrenza destra.

In Fig. 23 è riportata la distribuzione delle strutture attive rispettivamente della copertura, della crosta e del mantello con una zonazione delle aree che maggiormente risentono della loro attività. Per questa zonazione si è tenuto conto anche degli effetti superficiali quali le aree di maggiore sollevamento in catena e di minore abbassamento in pianura, come pure della distribuzione delle aree a maggiore frequenza di fenomeni franosi. Si osserva che il comune di Boretto non è situato in zona di maggior risentimento degli effetti delle faglie attive.

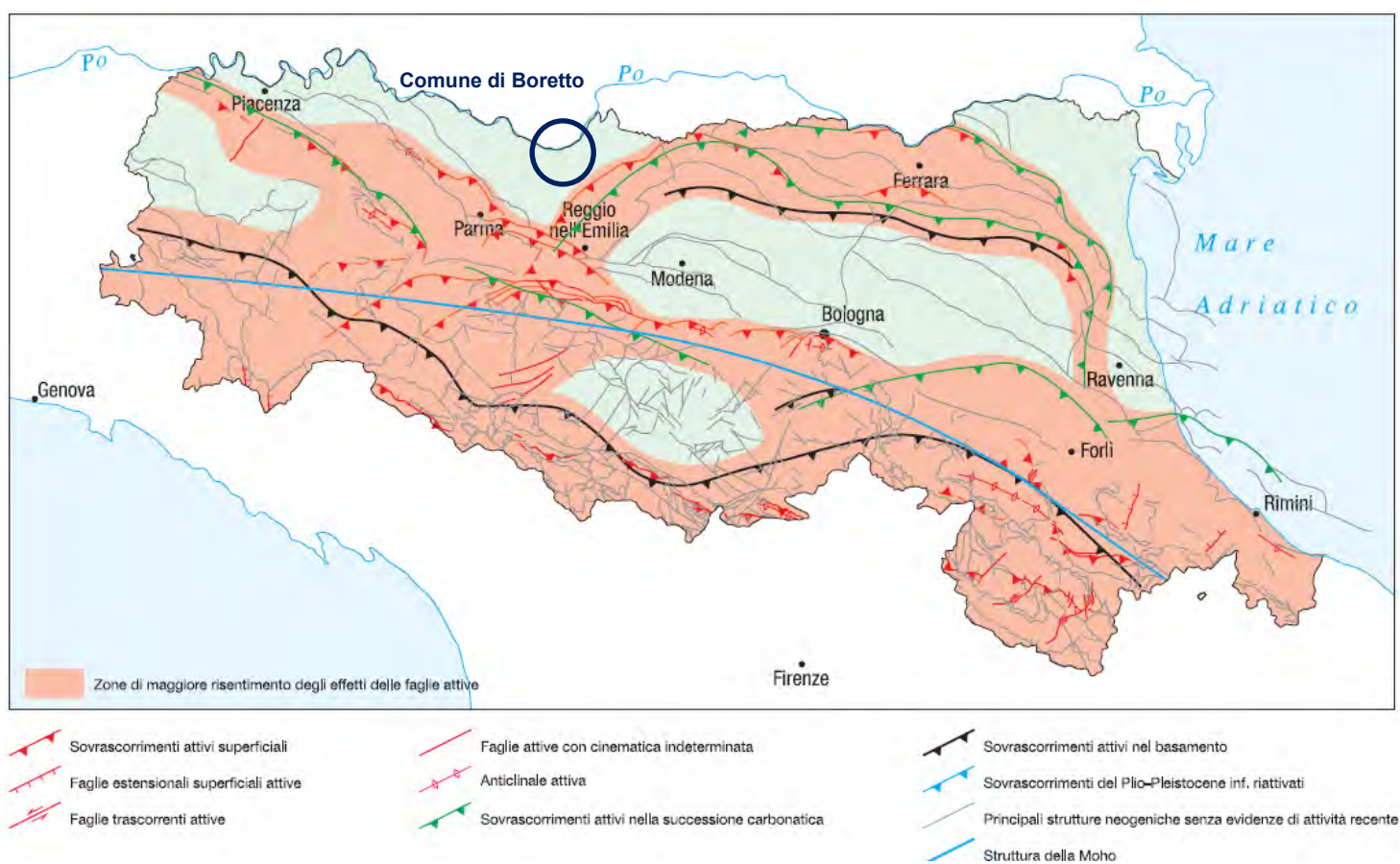


Fig. 23 - Zonazione delle aree che maggiormente risentono delle faglie attive

Lo stralcio della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna comprendente il Comune di Boretto è riportato in Fig. 24.

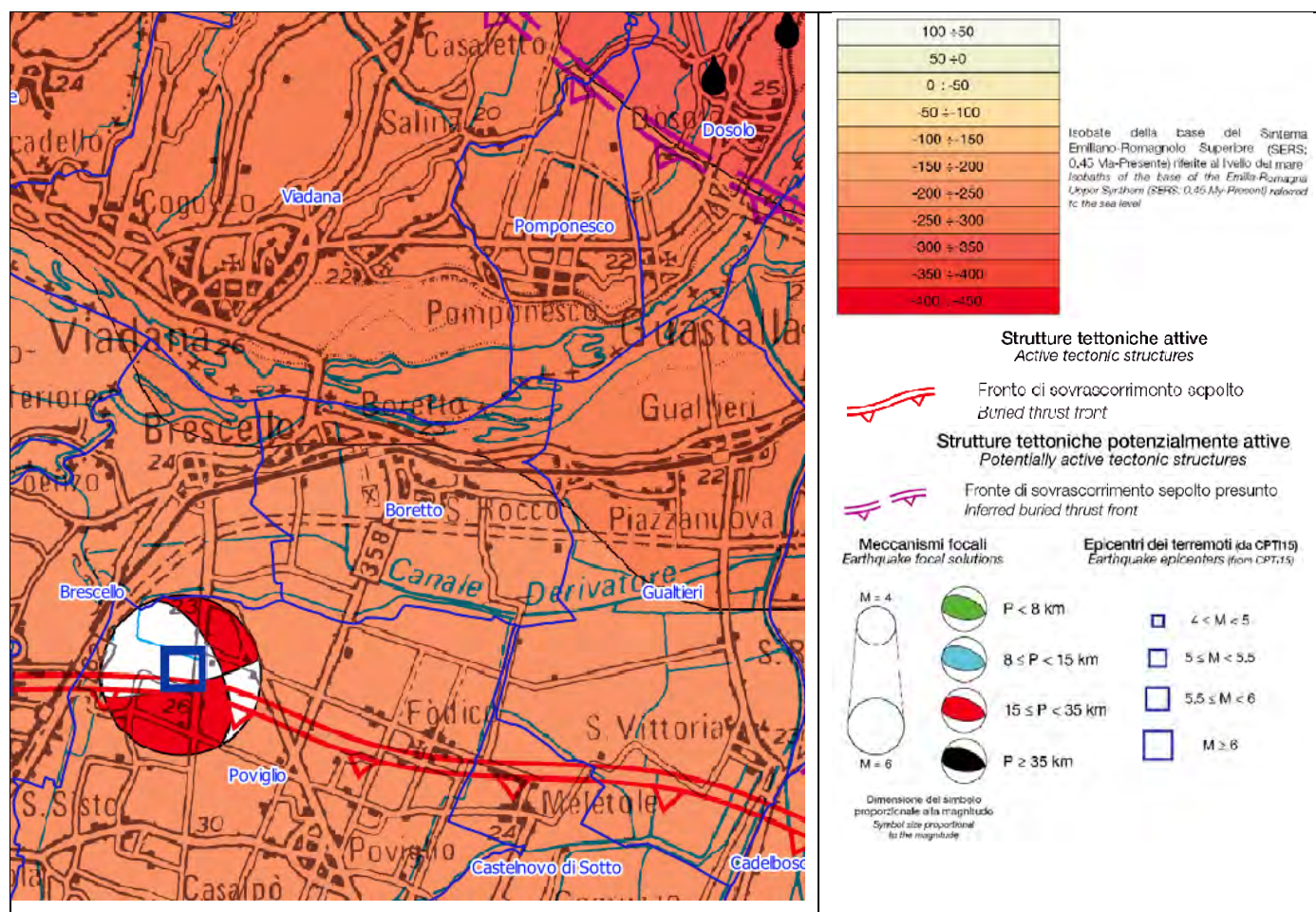


Fig. 24 - Stralcio della Carta sismotettonica della Regione comprendente il Comune di Boretto

Un elenco delle sorgenti sismogenetiche e delle faglie potenzialmente attive e capaci è contenuto nel DISS 3.2.1, il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana³.

Con riferimento all'immagine di Fig. 25, le sorgenti sismogenetiche più significative al contorno dell'area in studio sono:

- ITCS009 – Busseto-Cavriago, con magnitudo massima attesa Mw=5.6;
- ITCS049 – Campegine-Correggio, con una magnitudo massima attesa Mw=5.5;

³ Basili R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014

- ITCS051 – Carpi-Poggio Renatico, con una magnitudo massima attesa $M_w=6.0$;
- ITCS112 – Piadena, con una magnitudo massima attesa $M_w=5.5$.



Fig. 25 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche del DISS 3.2.1

Allo scopo di associare la sismicità dell'area con i meccanismi responsabili dell'innescio dei terremoti, si è fatto riferimento alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (a cura del gruppo di lavoro coordinato da C. Meletti e G. Valensise, 2004).

Tale lavoro, che sostituisce la precedente zonazione ZS4, suddivide il territorio nazionale in fasce contraddistinte da caratteristiche sismotettoniche omogenee (Cfr. Fig. 26).

A corredo degli studi di zonizzazione sono stati raccolti ed analizzati quasi 2.500 terremoti, degli ultimi 1.000 anni, con intensità epicentrale maggiore o uguale al V – VI grado MCS la cui magnitudo è maggiore o uguale a 4.

Come evidenziato in Fig. 26, l'area in studio risulta compresa tra la zona 912 e la zona 913, ma al di fuori da entrambe.

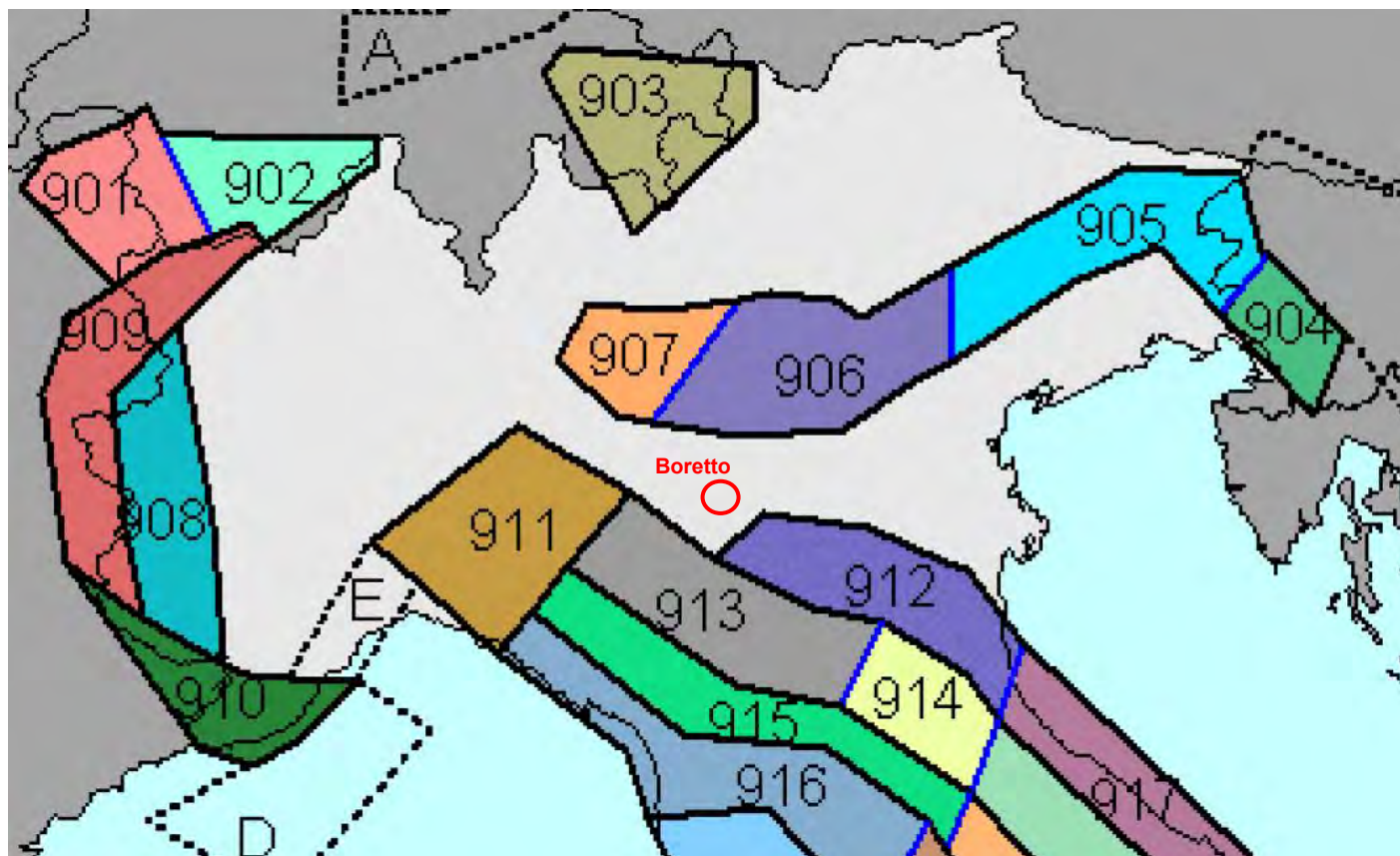


Fig. 26 – Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 (2004)

6.2 Sismicità del territorio

Nella valutazione della pericolosità sismica di una determinata area occorre, in primo luogo, definire la pericolosità di base attraverso una corretta analisi della sismicità evidenziando, sia la distribuzione spazio-temporale degli eventi, sia le caratteristiche di intensità degli stessi, seguita da una valutazione della pericolosità locale determinata dagli aspetti geologico-morfologici del territorio.

La storia sismica comunale è stata dedotta dal database DBMI15 utilizzato per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)⁴ aggiornato

⁴ Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azza-
 ro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istit-
 tuto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

al 2014, nel quale sono riportate le osservazioni macrosismiche relative all'abitato di Boretto.

Essa è riassunta nella Tab. 15, dove sono stati elencati gli eventi di maggior intensità al sito (Int.), indicando, per ciascuno di essi, oltre alla stessa intensità: l'anno, il mese (Me), il giorno (Gi), l'ora (Ho), il minuto (Mi) ed, eventualmente, il secondo (Se), in cui si è verificato, la denominazione dell'area epicentrale, il relativo numero di dati di intensità macrosismica (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
6-7	1806	02	12				Reggiano	28	7	5.21
4	1967	04	03	16	36	1	Reggiano	45	5	4.44
6-7	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
5	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
2	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
6	1987	04	24	02	30	2	Reggiano	54	6	4.64
6	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
5	1988	03	15	12	03	1	Reggiano	160	6	4.57
5-6	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
4-5	1996	10	26	04	56	5	Pianura emiliana	63	5-6	3.94
3	1996	10	26	06	50	2	Pianura emiliana	35	5-6	3.63
4-5	1996	11	25	19	47	5	Pianura emiliana	65	5-6	4.29
4	1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
5	2012	01	25	08	06	3	Pianura emiliana	25	5-6	4.98

Tab. 15 – Massimi eventi sismici verificatisi in corrispondenza dell'abitato di Boretto

Dalla lettura di Tab. 15 si evidenzia che i massimi eventi sismici censiti a Boretto si sono verificati il 12 febbraio 1806 e il 15 luglio 1971, entrambi con un'intensità al sito del VII-VIII grado della scala MCS.

Fatto salvo quanto sopra, si propone di tenere in considerazione anche quanto indicato nel lavoro elaborato per il Dipartimento dalla Protezione Civile, a cura di D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise, "Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani", determinate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA.

Secondo tale studio, basato in misura prevalente su valori realmente osservati, ma che contiene delle correzioni, per quelle località ove queste si siano rese necessarie, il territorio di Boretto è stato soggetto a terremoti di intensità massima pari all'VIII grado della scala MCS.

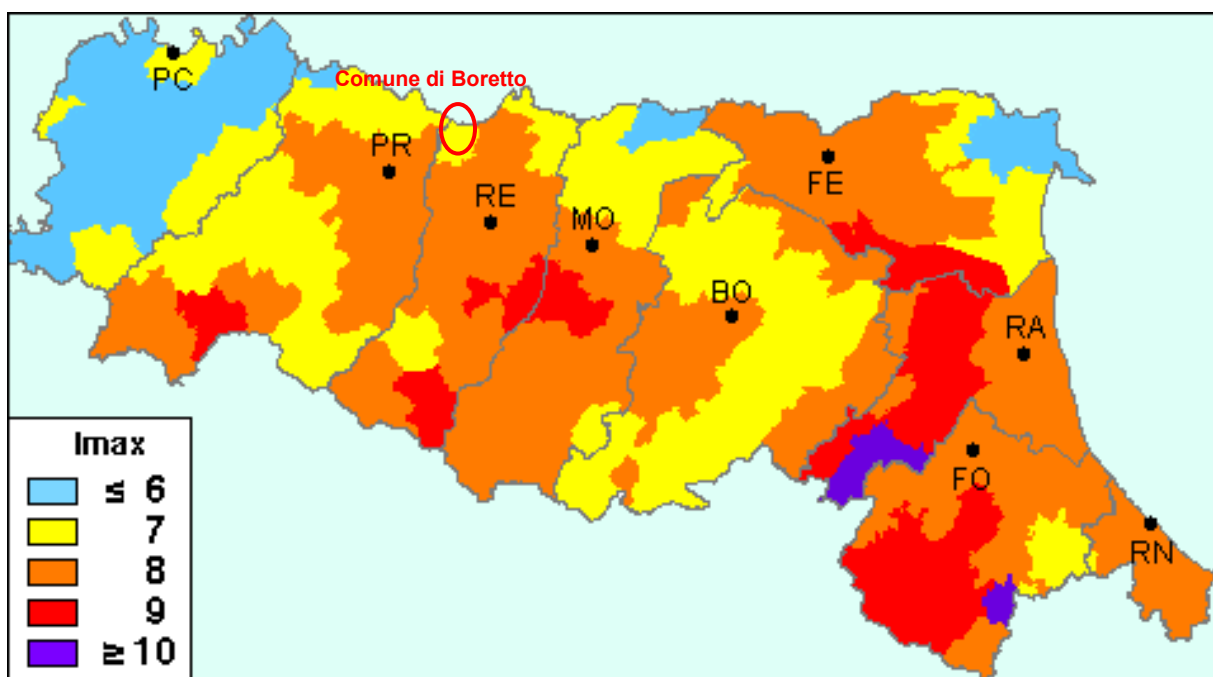


Fig. 27 – Carta della massima intensità macrosismica in Emilia Romagna

6.3 Classificazione sismica

La classificazione sismica dei comuni su tutto il territorio nazionale è stata stabilita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, utilizzando e aggiornando la precedente proposta nel 1998.

La suddivisione è articolata in 4 zone: le prime 3 corrispondono alle zone di sismicità alta (S=12), media (S=9) e bassa (S=6), contemplati nella Legge 64/74, mentre la zona 4 è di nuova introduzione.

Ciascuna zona è contraddistinta da un diverso valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Cfr. Tab. 16), eliminando di fatto la presenza di aree del territorio classificate come non

sismiche: in questo modo, ad ogni area del territorio nazionale viene attribuito un differente livello di pericolosità sismica.

Zona	Valori massimi di a_g
1	$>0,25$
2	$0,15 \div 0,25$
3	$0,05 \div 0,15$
4	$<0,05$

Tab. 16 – Valori di accelerazione orizzontale associati a ciascuna zona sismica

La classificazione vigente, identifica il Comune di Boretto in zona 3 (Cfr. Fig. 28), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, compresi tra $0,05 \cdot g$ e $0,15 \cdot g$ (dove g è l'accelerazione di gravità).

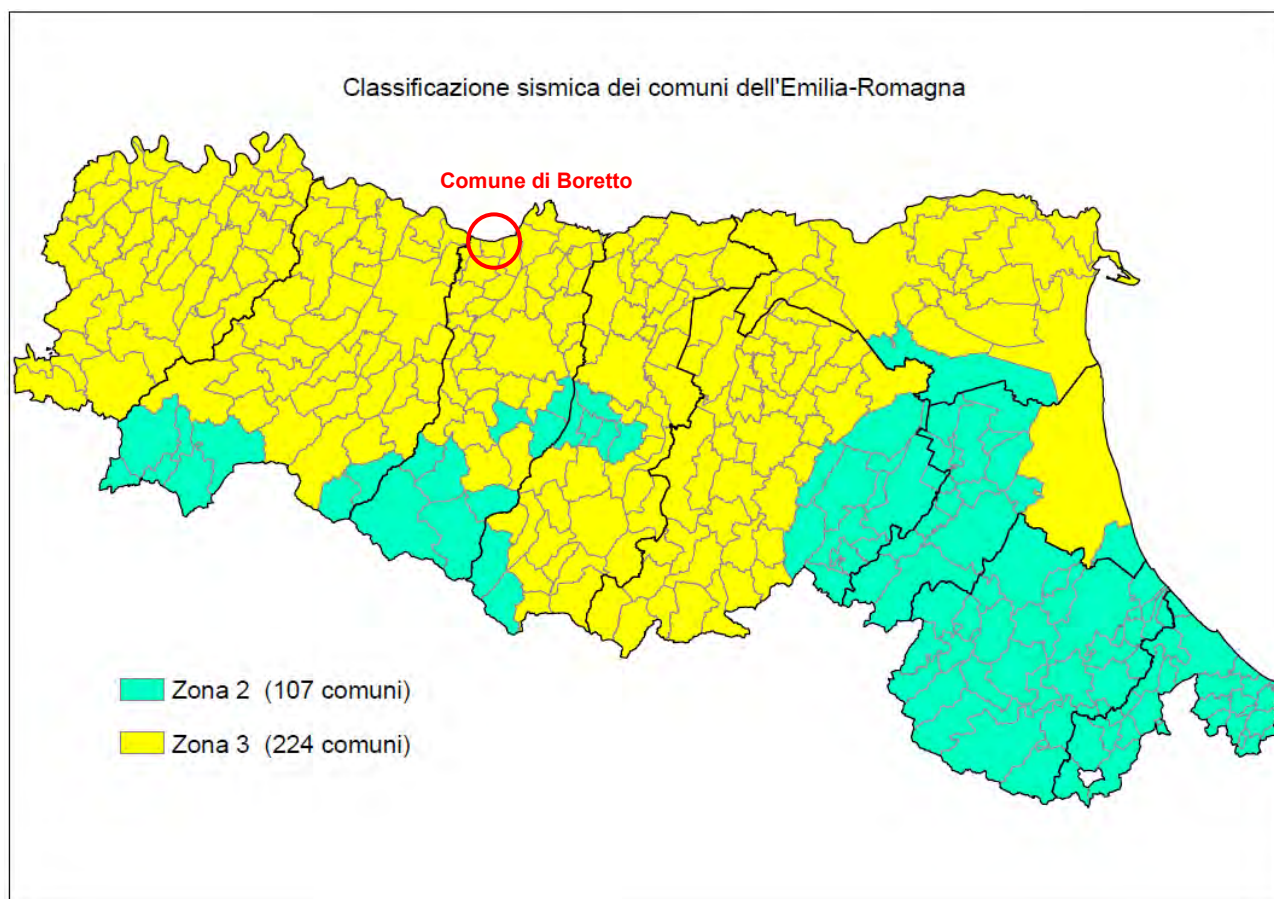


Fig. 28 – Classificazione sismica dei comuni della regione Emilia Romagna

Tale classificazione ha tuttavia valore esclusivamente a fini amministrativi; alle Norme Tecniche per le costruzioni del D.M. 14-01-2008, è infatti allegato un documento sulla pericolosità sismica (Allegato A), nel quale l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire dalla pericolosità sismica di base, più semplicemente chiamata pericolosità sismica che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle N.T.C., dalle accelerazioni a_g e dalle relative forme spettrali. Le forme spettrali previste sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Questi tre parametri sono definiti in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento), i cui nodi non distano fra loro più di 10 km, per diverse probabilità di superamento in 50 anni e per diversi periodi di ritorno (variabili tra 30 e 682 anni).

Per determinare il tempo di ritorno (T_R) si utilizza l'espressione:

$$T_R = \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

dove V_R è il periodo di riferimento della costruzione, mentre P_{V_R} è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento definito, per il rilevato arginale in esame, nel precedente paragrafo 1.2.

Quanto alle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} , sono stati assunti i valori indicati nelle N.T.C. 01/2018 (vedi Tab. 3.2.I del Paragrafo 3.2.1): in particolare, probabilità pari al 10%, per lo stato limite ultimo di Salvaguardia della Vita (SLV) e pari al 63%, per lo stato limite di esercizio di Danno (SLD).

Dato che il sito in esame (lon. 10.578772, lat. 44.902657⁵) non ricade nei nodi del reticolo di riferimento (Fig. 29), i valori dei parametri a_g , F_0 , T_c^* possono essere ricavati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Alla luce di quanto sopradescritto i valori dei tre parametri necessari per la determinazione delle azioni sismiche sono riportati nella seguente tabella.

Stato Limite	Tempo di ritorno $T_R(\text{anni})$	a_g (g)	F_0	T_c^* (s)
SLO	120	0.058	2.610	0.287
SLD	201	0.068	2.615	0.298
SLV	1898	0.143	2.592	0.334
SLC	2475	0.156	2.595	0.336

Tab. 17 – Valori dei parametri a_g , F_0 e T_c^* per i tempi di ritorno associati a ciascun stato limite

⁵ Considerata la lunghezza del 1°lotto di intervento la pericolosità sismica è stata riferita ad un punto baricentrico. Le coordinate geografiche sono riferite al sistema ED50

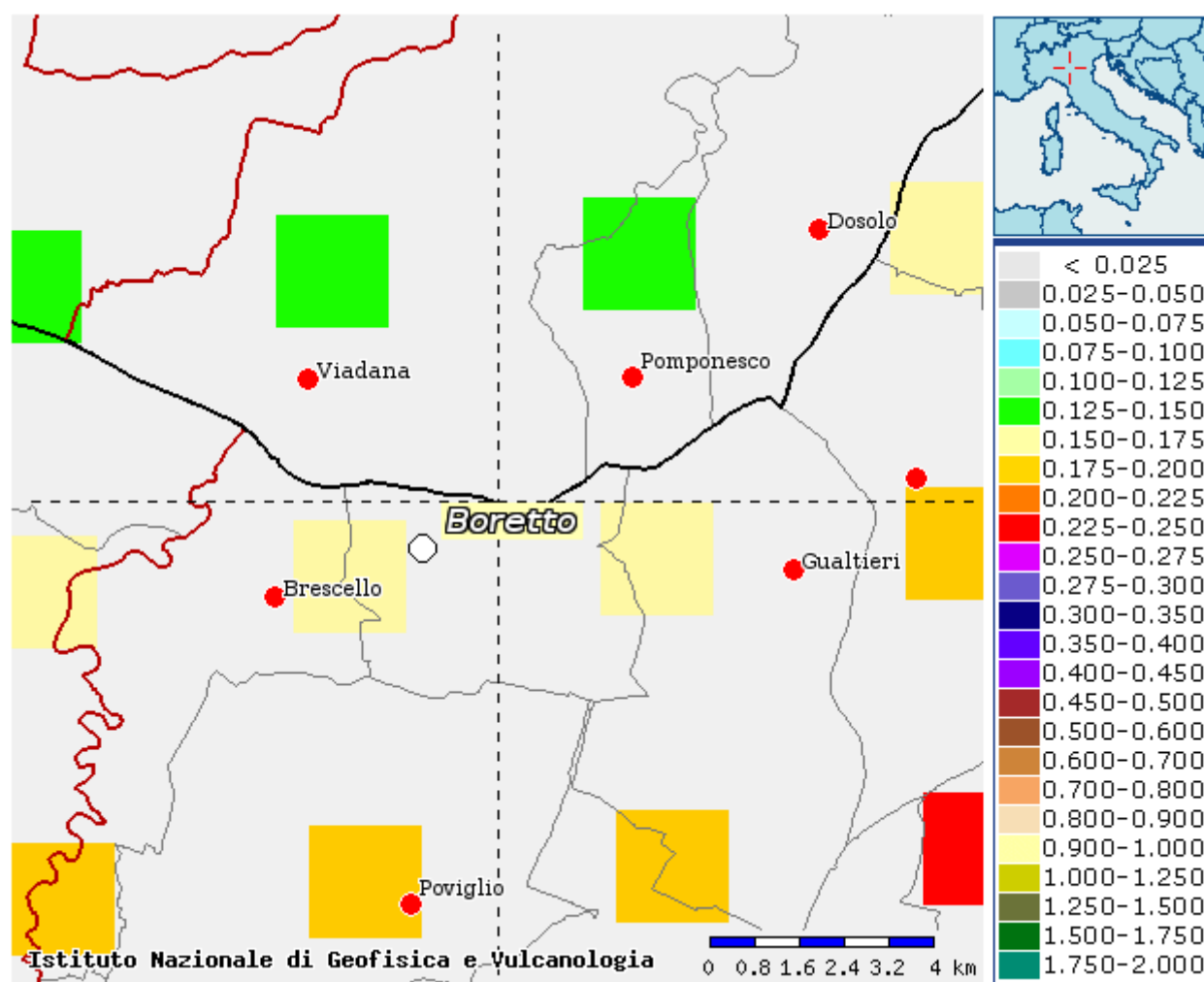


Fig. 29 - Mappatura dell'accelerazione orizzontale massima del terreno (a_g) con tempi di ritorno di 1898 anni

6.4 Categoria di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, il D.M. 17-01-2018 definisce 5 categorie in cui suddividere i terreni d'imposta in base ai valori di velocità delle onde sismiche trasversali fino al substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V_{Seq} è definita dal parametro V_{S30} , ottenuto ponendo $H=30$

m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

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

Tab. 18 - Categorie sismiche dei terreni

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio nei primi 30 m sotto il piano di posa della fondazione ($V_{S,eq}$) è definita come:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde dello strato i -esimo entro i 30 m dalla fondazione, N il numero degli strati e H la profondità del substrato.

Per la determinazione della velocità delle onde sismiche nel terreno si sono utilizzati i dati delle tre prove penetrometriche con cono sismico realizzati dalla Ditta Vicenzetto nel 2017. Le tre prove in questione sono state tutte realizzate al piede interno dell'argine, nella zona golenale, leggermente sovralzata rispetto al piano campagna extragolenale.

I grafici della V_s in funzione della profondità per le tre prove sono riportati in Fig. 30.

La $V_{s,30}$ nelle tre prove è risultata:

- SCPTU1 = 255 m/s
- SCPTU2 = 261 m/s
- SCPTU3 = 239 m/s

Sulla base dei risultati di tali prove si constata che i terreni presentano **categoria sismica C**.

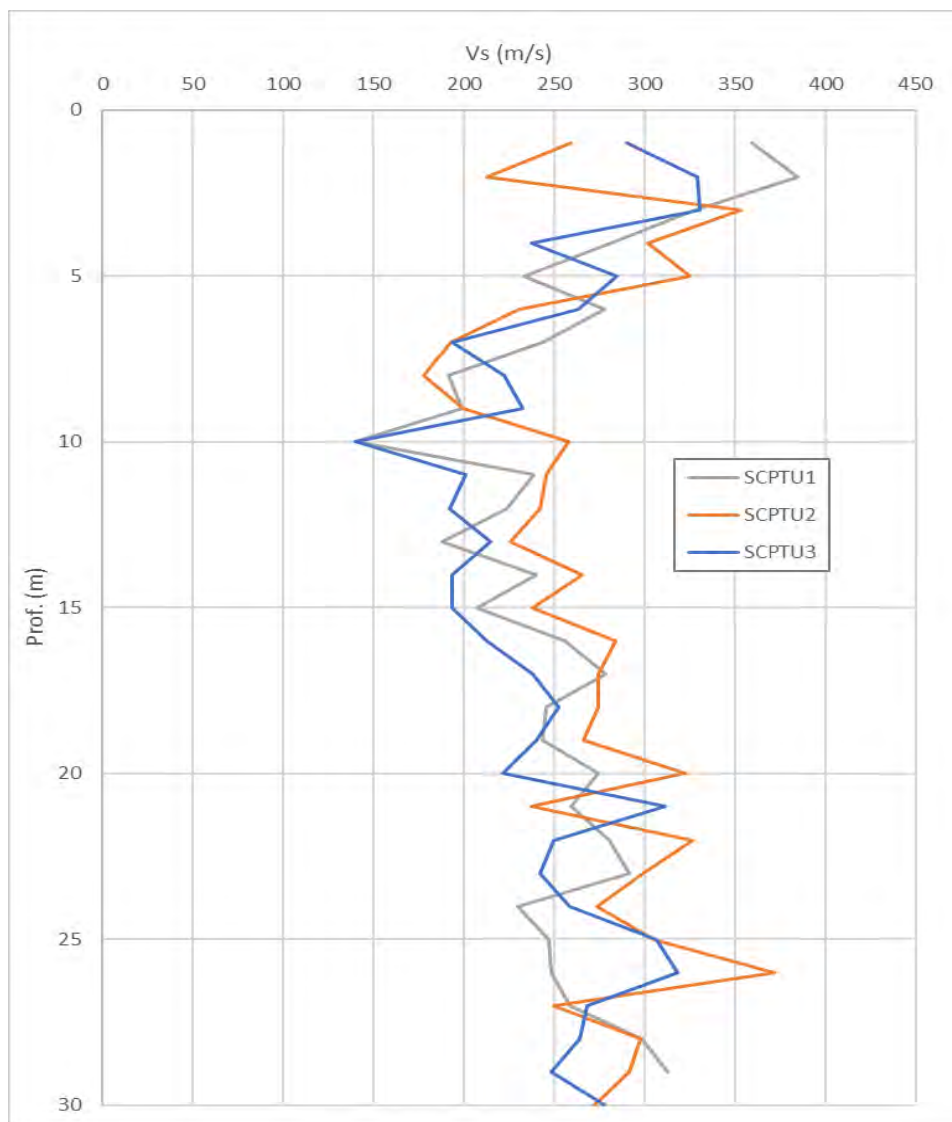


Fig. 30 – Grafico della Vs in funzione della profondità registrata nelle prove SCPTU del 2017

6.5 Coefficienti sismici di progetto

Sulla base della categoria di appartenenza del terreno, il D.M. 17-01-2018 introduce i coefficienti S_s e C_c per tener conto dell'amplificazione stratigrafica del valore dell'azione sismica di progetto.

Per le categorie B, C, D e E, questi due parametri possono essere calcolati attraverso le espressioni riportate in Tab. 19, dove i valori di F_0 e T_C^* sono relativi al sottosuolo di categoria A, g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Catego- ria	S_s	C_c
A	1.00	1.00
B	$1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.20$	$1.10 \cdot (T_C^*)^{-0.20}$
C	$1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.50$	$1.05 \cdot (T_C^*)^{-0.33}$
D	$0.90 \leq 2.40 - 1.50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.80$	$1.25 \cdot (T_C^*)^{-0.50}$
E	$1.00 \leq 2.00 - 1.10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.60$	$1.15 \cdot (T_C^*)^{-0.40}$

Tab. 19 - Valori dei parametri S_s e C_c

Altro parametro introdotto dal D.M. 17-01-2018 è il coefficiente di amplificazione topografica S_T , per tener conto delle condizioni topografiche del territorio. In assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella Tab. 3.2.VI⁶, in funzione delle categorie topografiche definite nel paragrafo 3.2.2 e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

⁶ Capitolo 3 – Azioni sulle costruzioni, paragrafo 3.2 Azione sismica, del D.M. 17-01-2018 “Norme Tecniche per le Costruzioni”.

Essendo l'intervento in progetto ubicato in pianura, la categoria topografica corrispondente è la T1 superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, che corrisponde ad un valore del coefficiente S_T pari a 1.00.

Con i valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* riportati in Tab. 20 per i vari stati limite, si ottengono i valori dei coefficienti sismici riportati nella Tab. 20 seguente.

	Ss	Cc	St	Amax (m/s²)	Beta	Kh	Kv
SLO	1.50	1.59	1.0	0.854	0.20	0.017	0.009
SLD	1.50	1.57	1.0	1.006	0.20	0.021	0.010
SLV	1.48	1.51	1.0	2.082	0.24	0.051	0.025
SLC	1.46	1.50	1.0	2.233	0.24	0.055	0.027

Tab. 20 - Coefficienti sismici di progetto

7. ASPETTI GEOTECNICI

Come già accennato in premessa si precisa che, sebbene l'intervento non richieda particolari valutazioni di carattere geotecnico, vista la problematica oggetto del progetto, inerente esclusivamente agli aspetti idrogeologici, nella presente relazione, per completezza della documentazione, è stato affrontato anche l'aspetto geotecnico.

La caratterizzazione geotecnica dei terreni è stata effettuata esclusivamente per il tratto arginale oggetto di progettazione definitiva.

Purtroppo, nel tratto in questione non sono disponibili analisi di laboratorio, pertanto la parametrizzazione geotecnica è stata basata prevalentemente sulle prove CPT e CPTU.

7.1 Caratterizzazione geotecnica dei terreni

Le indagini hanno evidenziato la presenza nel sottosuolo sia di depositi a comportamento coesivo sia a comportamento granulare.

Per tale caratterizzazione geotecnica dei terreni, sono stati utilizzati i risultati delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU) della campagna indagine 2019, integrati con i risultati delle indagini della campagna 2017 presenti nel tratto di approfondimento.

Nei successivi paragrafi viene indicato come, per tali terreni, siano stati ricavati i parametri geotecnici, basandosi sui risultati delle prove, mediante utilizzo di correlazioni semi-empiriche.

7.1.1 Depositi coesivi

7.1.1.1 Resistenza al taglio in condizioni non drenate

La coesione non drenata (C_u) è stata determinata dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche CPTU, mediante la seguente equazione (Baligh e Campanella, 1975): il valore della C_u è espresso nell'unità di misura della R_p .

$$C_U = \frac{R_P}{N_K}$$

Assumendo $N_K=18$, valore comunemente accettato in bibliografia per terreni consimili della pianura reggiana.

7.1.1.2 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio (ϕ') è stato stimato a partire dai valori dei colpi N_{SPT} , in base alla correlazione proposta da De Mello (1971) mediante le formule proposte da Shioi e Fukuni (1982):

$$\Phi' = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15$$

dove il valore di N_{spt} viene ricavato utilizzando la correlazione di *Robertson* (1983) che lo mette in relazione alla resistenza alla punta (q_c) del penetrometro:

$$N_{SPT} = \frac{q_c}{4.5}$$

7.1.1.3 Coesione efficace

La resistenza al taglio in condizioni drenate, o coesione efficace c' , è stata determinata facendo riferimento a quanto proposto da *Cherubini* (2000), (*Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on c' , ϕ' soils, Canadian Geotechnical Journal*, 37, 264–269), applicando la correlazione più cautelativa:

$$c' = -0.1793 \cdot \phi' + 15.21$$

7.1.1.4 Modulo edometrico

Il modulo di deformazione confinato (E_{ed}) è stato ricavato dai valori di resistenza alla punta (q_c) ottenuti dalle prove penetrometriche statiche, in accordo alla correlazione di Mitchell e Gardner (1975). Il modulo edometrico si ottiene utilizzando la seguente espressione:

$$E_{ed} = \alpha q_c$$

dove i valori di α sono riportati nella Tab. 21 di seguito riportata (w_n = umidità naturale espressa in percentuale).

Argille di bassa plasticità (CL)	$q_c < 0.7$ (MPa)	$3 < \alpha < 8$
	$0.7 < q_c < 2$ (MPa)	$2 < \alpha < 5$
	$q_c > 2$ (MPa)	$1 < \alpha < 2.5$
Limi di bassa plasticità (ML)	$q_c < 2$ (MPa)	$1 < \alpha < 3$
	$q_c > 2$ (MPa)	$3 < \alpha < 6$
Limi e argille di alta plasticità (MH, CH)	$q_c < 2$ (MPa)	$2 < \alpha < 6$
Limi organici (OL)	$q_c < 1.2$ (MPa)	$2 < \alpha < 8$
Torba e argilla organica (Pt, OH)	$50 < w_n < 100$	$1.5 < \alpha < 4$
	$100 < w_n < 200$	$1 < \alpha < 1.5$
	$w_n > 200$	$0.4 < \alpha < 1$

Tab. 21 – Correlazione di Mitchell e Gardner (1975)

7.1.2 Depositi granulari

7.1.2.1 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio (ϕ') è stato stimato in base alla correlazione proposta da Shioi e Fukuni (1982) per la Road Bridge Specification :

$$\Phi' = 27 + 0.3 N_{spt}$$

I valori di N_{SPT} sono ricavati, ancora una volta, tramite la correlazione empirica:

$$N_{SPT} = \frac{q_c}{4.5}$$

7.1.2.2 Modulo elastico

Il valore del modulo elastico E è stato ricavato mediante la seguente relazione:

$$E = 2.5 R_p$$

7.2 Modello geotecnico

L'individuazione del modello geotecnico del terreno di fondazione è stata basata sull'interpretazione della stratigrafia dei terreni effettuata nel capitolo 5.

In Fig. 31 si riporta il modello geotecnico del tratto di argine in cui saranno concentrati gli interventi di progetto; come si evince dalla figura il corpo arginale, a livello cautelativo, è stato suddiviso in due ulteriori strati rispetto al modello litostratimetrico, per tener conto del differente comportamento geotecnico.

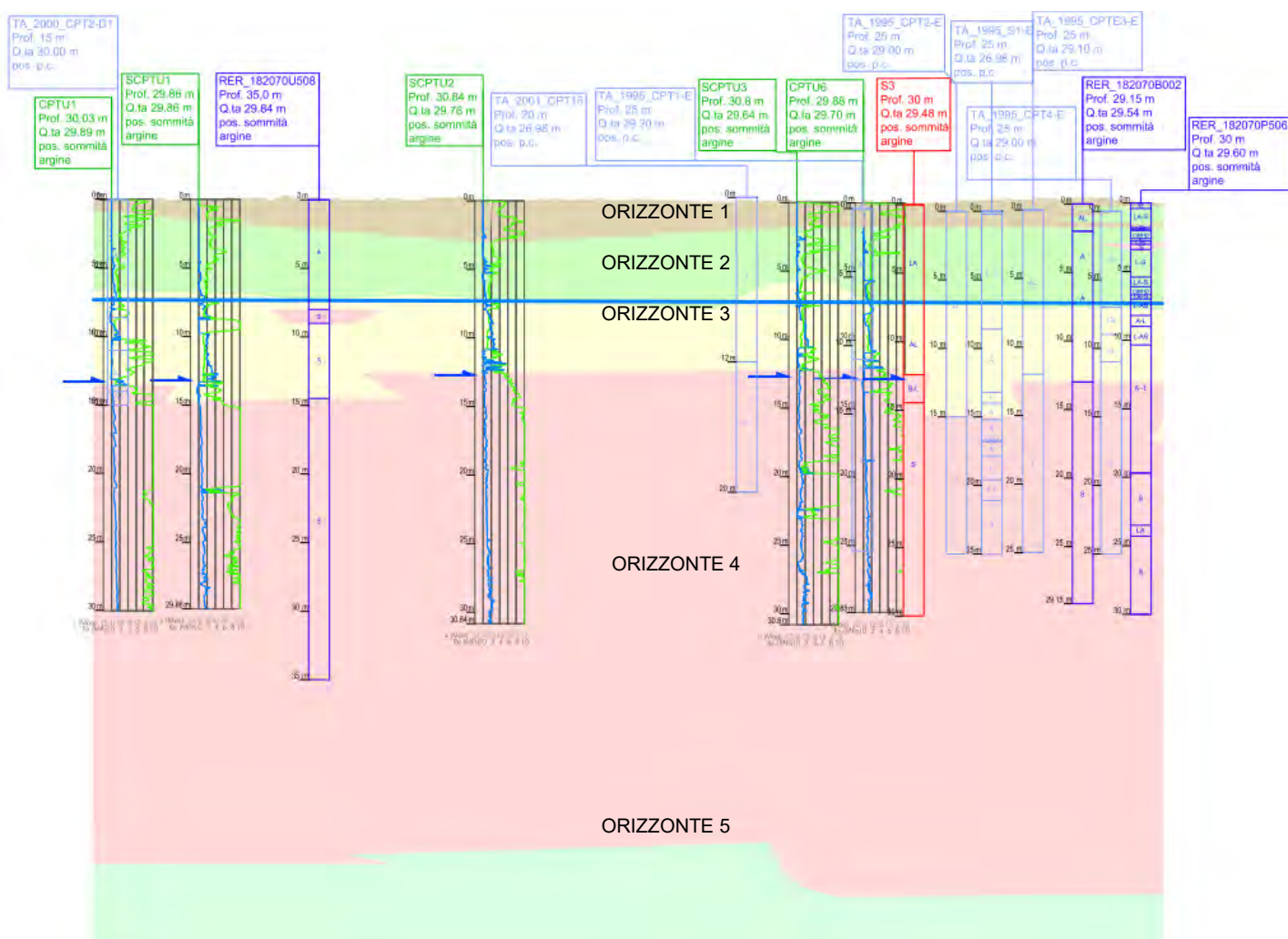


Fig. 31 – Sezione geotecnica del tratto di intervento (i dati profondi sono stati desunti dalle prove effettuate lungo le sezioni trasversali)

Le diverse unità litologiche sono state correlate alle caratteristiche geotecniche dei terreni determinate con i metodi descritti nel capitolo 6.

Nel modello geotecnico i parametri di resistenza al taglio e deformabilità, relativi a ciascun orizzonte, vengono espressi sia indicandone i valori medi, sia quelli caratteristici (da utilizzare per valutazioni semiprobabilistiche, in ottemperanza alle N.T.C. 2018).

Per i diversi terreni, il valore caratteristico della coesione non drenata e dei parametri di deformabilità è stato valutato come il valore corrispondente al 5° percentile della distribuzione della media, utilizzando una distribuzione lognormale.

Per l'angolo di attrito interno il valore caratteristico è sempre riferito al 5° percentile della distribuzione della media, utilizzando però una distribuzione gaussiana (normale).

In Fig. 32 viene riportato, a titolo di esempio, il grafico della distribuzione dei valori di Cu per l'orizzonte 2; il margine di errore, considerato l'insieme dei dati disponibili, risulta pari a circa 1.75 (kPa), con un intervallo di confidenza pari al 95%.

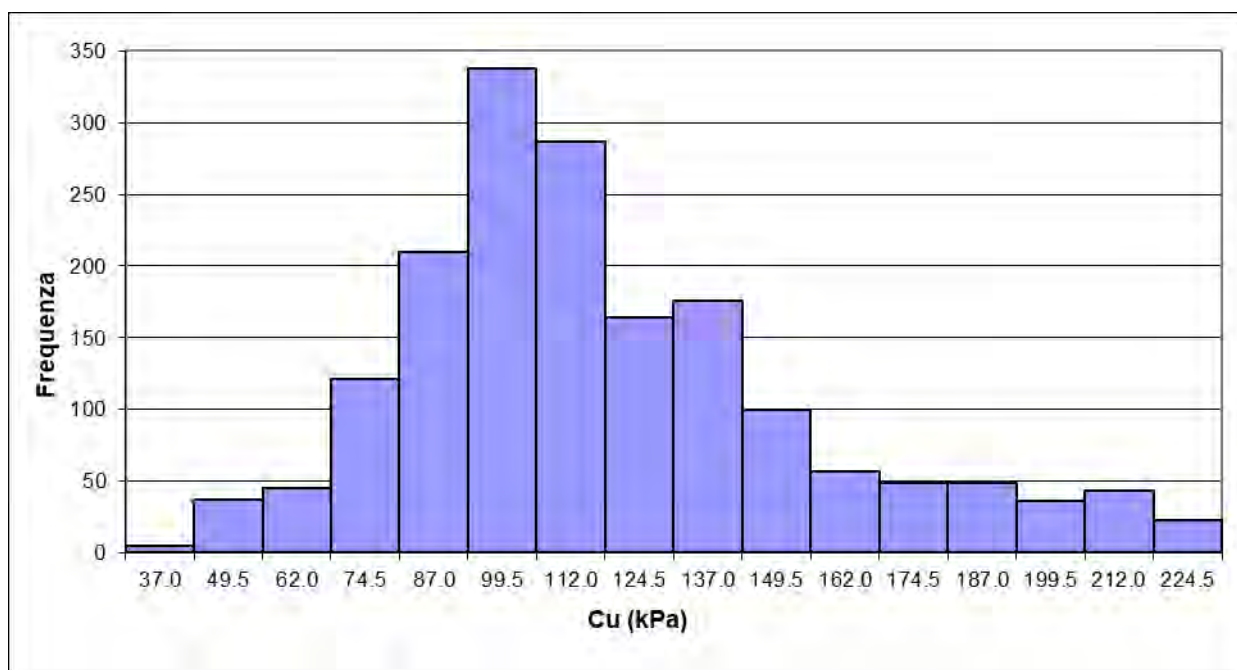


Fig. 32 – Curva di distribuzione dei valori di Cu per l'orizzonte 2

Nel modello geotecnico dell'area indagata sono stati distinti 4 diversi orizzonti, come segue (p.c. indica la sommità arginale):

- da p.c. a circa -1.24/-3.05 m da p.c.:
Orizzonte 1 – Corpo arginale, terreni di riporto del rilevato arginale sabbioso-limosi;
- da -1.24/-3.05 m a circa -5.75/-7.81 m da p.c.:
Orizzonte 2 – Corpo arginale, terreni di riporto del rilevato arginale argilloso-limosi;
- da -5.75/-7.81 m a -12.68/-15.78 m da p.c.:
Orizzonte 3, depositi prevalentemente argillosi e/o limosi;
- da -12.68/-15.78 m a -46.60/-50.64 m da p.c.:
Orizzonte 4, depositi prevalentemente sabbiosi;
- da -46.60/-50.64 m a max profondità indagata (circa 55 m):
Orizzonte 5, depositi prevalentemente argillosi;

Di seguito viene proposta la caratterizzazione di dettaglio delle differenti tipologie di orizzonti.

ORIZZONTE 1

- Comportamento granulare
- Parametri geotecnici:

	$\phi' (^{\circ})$	E (MPa)
Valore caratteristico	30.72	16.43
Valore Medio	31.25	16.87

- peso specifico $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$

ORIZZONTE 2

- Comportamento coesivo;
- Parametri geotecnici:

	ϕ' (°)	C' (kPa)	C_u (kPa)	E_{ed} (MPa)
Valore caratteristico	23.15	11.03	110.18	6.06
Valore Medio	23.20	11.04	111.86	6.13

- peso specifico $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$

ORIZZONTE 3

- Comportamento coesivo;
- Parametri geotecnici:

	ϕ' (°)	C' (kPa)	C_u (kPa)	E_{ed} (MPa)
Valore caratteristico	22.11	11.38	67.57	4.29
Valore Medio	22.16	11.39	67.92	4.32

- peso specifico $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$

ORIZZONTE 4

- Comportamento granulare
- Parametri geotecnici:

	ϕ' (°)	E (MPa)
Valore caratteristico	32.92	29.89
Valore Medio	32.95	29.90

- peso specifico $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$

ORIZZONTE 5

- Comportamento coesivo
- Parametri geotecnici:

	$\phi' (^{\circ})$	C' (kPa)	C_u (kPa)	E_{ed} (MPa)
Valore caratteristico	23.60	10.91	114.90	5.90
Valore Medio	23.69	10.96	118.94	6.13

- peso specifico $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$