

Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale difensivo tramite interventi di adeguamento in quota ed in sagoma a valle della cassa fino al confine regionale per garantire il franco di 1 metro, rispetto alla piena di TR 20 anni nello stato attuale, e la stabilità e resistenza dei rilevati (MO-E-1323)



B.1.9 - Intervento di ripristino spondale in corrispondenza dello stante sx 240 e sx 241

Progetto esecutivo

approvato
Dott. Ing. Ivo Fresia
verificato
Dott. Ing. Giuseppe Campi
elaborato
Dott. Geol. Giancarlo Villa

Il Progettista - Responsabile di progetto e delle integrazioni e prestazioni specialistiche: <i>Dott. Ing. Ivo FRESIA</i>	Il Geologo: <i>Dott. Geol. Giancarlo VILLA</i>
Il Coordinatore per la sicurezza in fase di progettazione: <i>Dott. Ing. Giuseppe CAMPI</i>	VISTO: Il Responsabile del procedimento <i>Dott. Ing. Ivano GALVANI</i>

RELAZIONE GEOLOGICA

E9.01.02

00	VL	GC	FR	Ottobre 2017
rev.	sigle			data

codice elaborato 0690-07-01-002R-01



Mod. PO01/06
Rev. 2
Data emissione: 11.2016

Indice

1	Premessa	1
2	Normativa di riferimento.....	2
3	Inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico	3
3.1	Geologia	3
3.2	Geomorfologia	5
3.3	Idrogeologia	6
4	Sismicità.....	9
4.1	Storia sismica.....	9
4.2	Classificazione sismica del territorio	14
5	Indagini geognostiche.....	16
5.1	Indagini pregresse	16
5.2	Campagna geognostica 2016	16
6	Caratteri litostratigrafici.....	19
7	Geotecnica.....	21
7.1	Elaborazione dei risultati delle indagini in situ.....	21
7.1.1	Depositi coesivi	21
7.1.1.1	Coesione in condizioni non drenate.....	21
7.1.1.2	Coesione in condizioni drenate e grado di sovraconsolidazione (OCR)	21
7.1.1.3	Angolo di resistenza al taglio.....	22
7.1.1.4	Modulo edometrico	22
7.1.2	Depositi granulari.....	22
7.1.2.1	Angolo di resistenza al taglio.....	22
7.1.2.2	Modulo edometrico	23
7.2	Modello geotecnico.....	23
7.2.1	Corpo arginale.....	23
7.2.2	Terreni di fondazione	24

1 Premessa

La presente relazione descrive la caratterizzazione geologica, idrogeologica, geotecnica e sismica per il progetto di "Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale difensivo tramite interventi di adeguamento in quota e in sagoma a valle della cassa fino al confine regionale per garantire il franco di 1 metro, rispetto alla piena di TR 20 anni nello stato attuale e la stabilità e resistenza dei rilevati.

AIPO in seguito alla redazione del progetto preliminare ha affidato allo Studio Geologico ENGEO S.r.l. il supporto alla Direzione Lavori per le indagini geognostiche e prove di laboratorio eseguite dallo "Studio Tecnico Geom. Ugo Celotti s.r.l." a partire dal Maggio 2016..

Le indagini e analisi sono state eseguite nel rispetto della normativa vigente, e, in particolare del D.M. 14/01/2008, Testo Unico - Norme Tecniche per le Costruzioni.

Esso ha comportato lo svolgimento delle seguenti attività:

- raccolta e analisi critica della documentazione geologica esistente con ricerca di eventuali indagini pregresse;
- sopralluoghi in sito, anche con personale AIPO, comprensivi di rilievo geologico e geomorfologico di dettaglio, finalizzati alla definizione delle criticità del tratto arginale e spondale oggetto di studio;
- redazione di elaborati cartografici preliminari di dettaglio, in collaborazione con i tecnici AIPO, atti a fornire alla ditta incaricata dell'esecuzione delle indagini le ubicazioni precise delle prove;
- assistenza alla DL nella pianificazione, controllo ed elaborazione delle attività di indagine, per tutta la durata della campagna geognostica;
- analisi tematiche relative alle caratteristiche fisiche del territorio in esame, con particolare attenzione agli aspetti geomorfologici e idrogeologici;
- ricostruzione della successione litostratigrafica locale e della distribuzione spaziale dei litotipi, con redazione di sezioni litologiche;
- correlazione dei dati delle indagini geognostiche con parametri geotecnici dei terreni ed elaborazione del modello geologico e geotecnico.

Nel seguito viene riportato quanto redatto dallo Studio ENGEO S.r.l. relativamente al II Stralcio funzionale.

2 Normativa di riferimento

- Decreto ministeriale 14-01-2008 – Testo unitario – Norme Tecniche per le Costruzioni
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14-01-2008, Circolare 2 febbraio 2009
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n° 36 del 27/07/2007
- Eurocodice 8 (1998) – Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997) – Progettazione geotecnica –Parte I: Regole Generali – UNI
- Eurocodice 7.2 (2002) – Progettazione geotecnica –Parte 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"

3 Inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico

3.1 Geologia

Il territorio in esame ricade nella bassa pianura modenese, la quale costituisce una porzione del settore meridionale della pianura padana, la più grande pianura alluvionale d'Italia, formata 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 est 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.

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.

Il quadro stratigrafico del sottosuolo padano, ricostruito sulla base di profili sismici e di sondaggi, risulta caratterizzato da una potente successione terrigena del quaternario, suddivisibile, in senso stratigrafico in un'unità inferiore d'ambiente marino (Qm) e in un'unità superiore, affiorante, d'ambiente continentale (Qc).

Il Supersistema del Quaternario Marino (Qm), si è depositato a partire da poco dopo la fine del Pliocene (1,73 Ma BP), fino a 0.65 Ma BP (Pleistocene medio).

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo (Qc), costituito da depositi di ambiente continentale depositi a partire da 0.65 Ma BP è stato suddiviso a sua volta in due unità stratigrafiche principali: Unità Emiliana Inferiore e Unità Emiliana Superiore.

L'Unità Emiliano-Romagnola Inferiore (SERI), depositatasi presumibilmente tra circa 0,65 e 0,45÷0,35 Ma BP (Pleistocene medio), rappresenta la fase iniziale della sedimentazione continentale del Quaternario con limite inferiore e superiore di tipo erosivo. L'unità è sedimentata in un ambiente di piana alluvionale durante un periodo di subsidenza regionale, costituita in prevalenza da depositi fini con intercalazioni di corpi ghiaiosi e sabbiosi nastriformi, riferibili ad antichi paleoalvei fluviali, i quali diventano preponderanti in corrispondenza dell'apertura dei principali bacini vallivi sull'antistante pianura alluvionale.

L'unità Emiliana Superiore (SERS) ha avuto origine dopo un'importante fase tettonica di sollevamento regionale, con la quale ebbe inizio la rapida progradazione dei sistemi di conoide alluvionale nella zona antistante ai rilievi appenninici e dei sistemi fluvio-deltizi lungo la fascia del Po.

Per quanto riguarda i depositi pre-quadernari, essi formano un cuneo che, dal margine appenninico, si apre a ventaglio verso nord e sono caratterizzati da strutture tettoniche che si sviluppano formando una serie di anticlinali e sinclinali fagliate e sovrascorse con assi a vergenze appenniniche.

In particolare, il settore di pianura in esame ricade a sud delle Pieghe Ferraresi, struttura appartenente al fronte di accavallamento esterno (E.T.F) che definisce il limite settentrionale dell'Appennino sepolto (Fig. 1).

Le Pieghe Ferraresi sono un sistema di pieghe-faglie che hanno dato origine a due dorsali sepolte che nell'insieme descrivono, in pianta, un arco vergente verso nord, esteso tra Reggio Emilia e la costa adriatica, che si spinge fino ed oltre il Po tra Ferrara e Occhiobello (RO). In particolare, sono distinguibili una dorsale più interna, che ha il massimo sollevamento tra Novi di Modena e Medolla, nota come struttura o alto di Mirandola, e una più esterna che ha il culmine tra Bondeno e Ferrara.

La strutturazione di queste dorsali sepolte è il risultato dell'attività di faglie inverse (thrust) la cui attività è iniziata nel Pliocene medio-superiore, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud; di attivazione più recente sono le strutture retrovergenti con piano di scorrimento immergente verso nord (backthrust) che interessano soprattutto gli orizzonti più superficiali.

Nelle aree di sinclinale lo spessore delle alluvioni supera i 500 m mentre nelle zone di alto strutturale, si riduce fino a meno di 100 m, con grandi lacune stratigrafiche e, talora, anche il substrato risulta fortemente eroso.

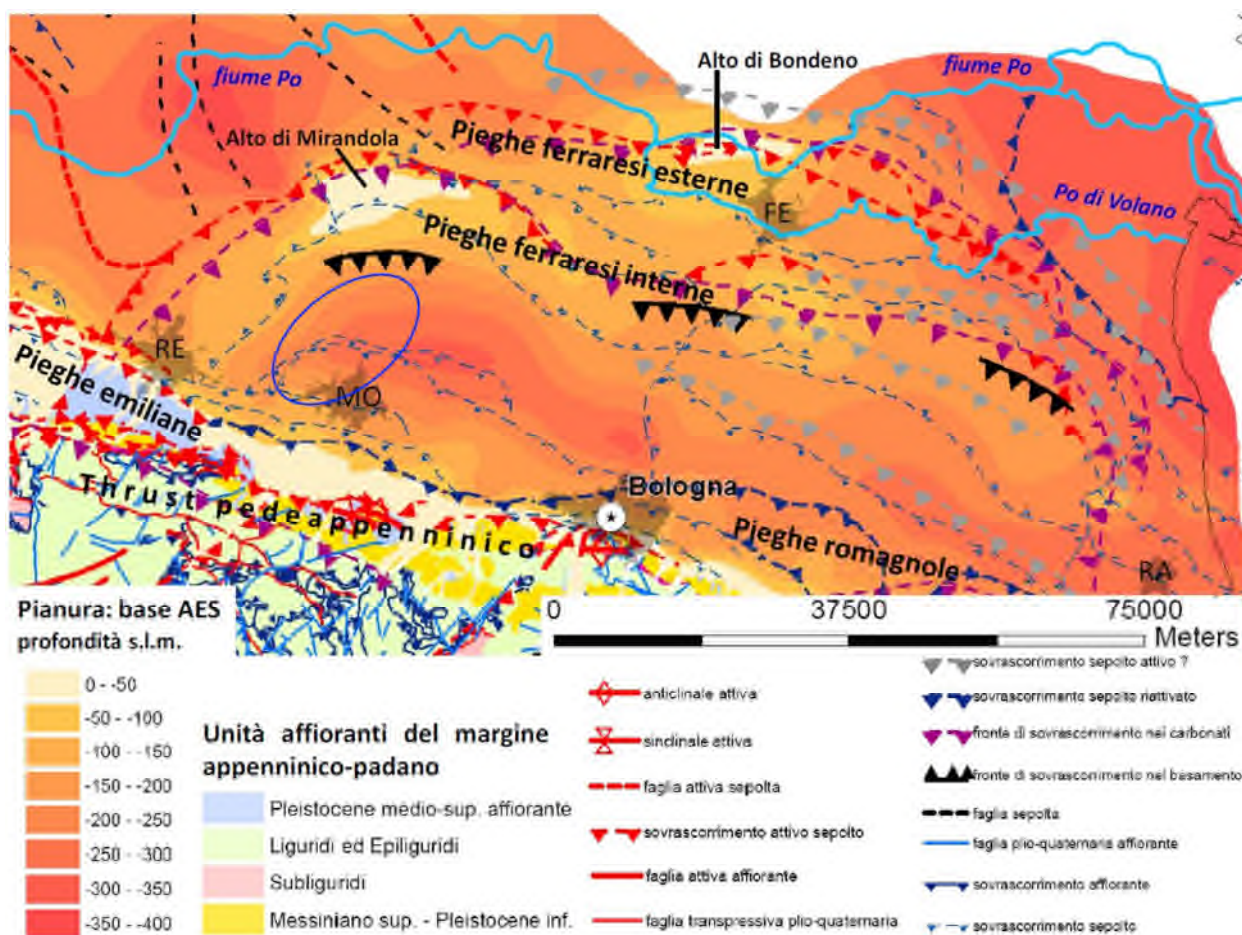


Fig. 1 Schema tettonico della porzione di pianura in cui ricade l'area oggetto d'intervento (tratto da "Quadro sismotettonico dell'Appennino emiliano-romagnolo e della Pianura Padana centrale" di L. Martelli, 2011)

Nel complesso i depositi affioranti nel territorio in esame sono relativi alla sottounità più recente del Supersintema Emiliano-Romagnolo, definita, in letteratura geologica, come Unità di Modena, appartenente al Subsintema di Ravenna (Pleistocene superiore-Olocene) e 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.

Trattasi di depositi di piana alluvionale, più specificatamente, di argine canale e rotta fluviale, di provenienza appenninica.

Lo spessore massimo dell'unità è di circa 10 metri. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di centimetri).

Il contatto di base con i subsintemi più antichi è erosivo, mentre, il limite di tetto è una superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente alla superficie topografica.

I depositi superficiali in esame sono stati distinti tra infragolenali ed extragolenali. Essi presentano tessiture variabili, comprese tra quelle dei limi sabbiosi e quelle delle argille, in relazione ai differenti ambienti in cui è avvenuta la sedimentazione. Nella planimetria geologica, allegata alla presente relazione, sono riportati i limiti dei depositi superficiali nel tratto relativo al II Stralcio funzionale.

3.2 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 hanno dato luogo ad un paesaggio relativamente omogeneo, contraddistinto da superfici pressoché piane debolmente degradanti verso nord-est con gradiente topografico estremamente basso.

Le aree di pertinenza di corsi d'acqua (in particolare il fiume Secchia) sono rimaste le uniche in cui si osserva una evoluzione morfologica dipendente da fattori naturali.

Al contrario, la pianura circostante esprime il congelamento di una situazione originatasi antecedentemente alla limitazione degli alvei fluviali entro percorsi prefissati, in cui le opere di bonifica agraria, infrastrutturazione ed insediamento hanno conferito alla superficie topografica un assetto costante ed uniforme livellando tutte le asperità del terreno.

I pochi rilievi presenti, sono costituiti dai rilevati stradali, dai ponti e dagli argini dei corsi d'acqua.

Le superfici del suolo conservano tuttavia, anche se in forma relittuale, ancora le tipiche geometrie dell'ambiente fluviale, quali:

- dossi, di sistemi di canale-argine, molti dei quali sono oggi sede di strade e centri abitati in quanto sono le aree a minore rischio di allagamento
- tracce di alvei abbandonati, incassati o a livello della pianura, che non sempre sono direttamente osservabili sul terreno, ma possono essere individuati attraverso l'analisi comparata delle fotografie aeree, del microrilievo e della tessitura dei depositi superficiali
- ventagli d'esondazione, formati a seguito di diversioni, durante le piene dei corsi d'acqua, con rottura degli argini naturali

Sempre dal punto di vista geomorfologico va evidenziato come il fiume Secchia scorra all'interno di una golena sopraelevata di alcuni metri rispetto alla campagna circostante. Spesso, essa risulta anche a drenaggio difficoltoso; fatto cui consegue la permanenza di ristagni idrici contro l'arginatura, dopo gli eventi di piena.

L'alveo di magra è inciso e ben delimitato da scarpate d'erosione fluviale, alte quasi 10 metri.

3.3 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”.

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.

PRINCIPALI UNITA' STRATIGRAFICHE					ETA' (milioni di anni)	SCALA CRONOSTRATIGRAFICA (milioni di anni)	UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE									
AFFIORANTI			SEPOLTE				GRUPPO ACQUIFERO	COMPLESSO ACQUIFERO								
QUATERNARIO CONTINENTALE	DILUVIUM p.p.	FORMAZIONE FLUVIO - LACUSTRE	FORMAZIONE DI OLIVATELLO	UNITA' DI VALLA DEL BOZZO	UNITA' DI CA' DI SOLA	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOL	SISTEMA EMILIANO-ROMAGNOL SUPERIORE	UNITA' DI BORGOPANSALE	CRIZZANTE DI FOSCOLO	ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI	~0,12	0.125	PLEISTOCENE SUPERIORE - OLOCENE	A	A1	
															A2	
	A3															
	A4															
QUATERNARIO MARINO	MILAZZANO SABBIE (il CASTELVETRO p.p.) SABBIE GIALLE (il MOLLA p.p.)	MILAZZANO e CALABRIANO p.p. SABBIE (il CASTELVETRO p.p.) SABBIE GIALLE (il MOLLA p.p.)	CALABRIANO p.p. SABBIE (il MONTERICCIO FORMAZIONE (il TERRA (il SOLE p.p.)	CALABRIANO p.p. FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p.	SUPERSISTEMA DEL QUATERNARIO MARINO	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 3	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 1	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOL INFERIORE	UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE	~0,35-0,45	PLEISTOCENE MEDIO	B	B1	
															B2	
															B3	
															B4	
P ₂	FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p.	SUPERSISTEMA DEL QUATERNARIO MARINO	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 3	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 1	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOL INFERIORE	UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE	CRIZZANTE DI FOSCOLO	ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI	~0,65	~0,8	0.88	PLEISTOCENE INFERIORE	C	C1
																C2
																C3
																C4
P ₂	FORMAZIONE di CASTELL'ARQUATO p.p.	SUPERSISTEMA DEL QUATERNARIO MARINO	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 3	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 2	SISTEMA QUATERNARIO MARINO 1	SUPERSISTEMA EMILIANO-ROMAGNOL INFERIORE	UNITA' ALLUVIONALE INFERIORE	CRIZZANTE DI FOSCOLO	ALLUVIONI / QUATERNARIO MARINO E SABBIE DI ASTI	~2,2	~3,3-3,6	3.55	PLEISTOCENE MEDIO - SUPERIORE	C	C5
																C5
											~3,9	PLEISTOCENE INFERIORE MIOCENE	ACQUITARDO BASALE			

Fig. 2 Schema idrostratigrafico della Pianura Emiliano-Romagnola

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 acquicludo) 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.

Questo inquadramento strutturale sostituisce il modello di acquifero che considerava i livelli impermeabili presenti nel sistema come non continui, e pertanto l'intera pianura emiliano-romagnola veniva assimilata ad un acquifero monostrato con un'unica falda in continuità, libera, parzialmente confinata o in pressione procedendo da ovest verso est.

Considerando la ricostruzione idrostratigrafica effettuata da Regione Emilia-Romagna e da Eni-Agip raffigurata nella Sezione 26 consultabile sul sito del Servizio Geologico Regionale (la più vicina alla zona oggetto di studio) e riportata nello stralcio di Fig. 3, si osserva che la dorsale ferrarese provoca un forte assottigliamento dello spessore dei singoli gruppi acquiferi.

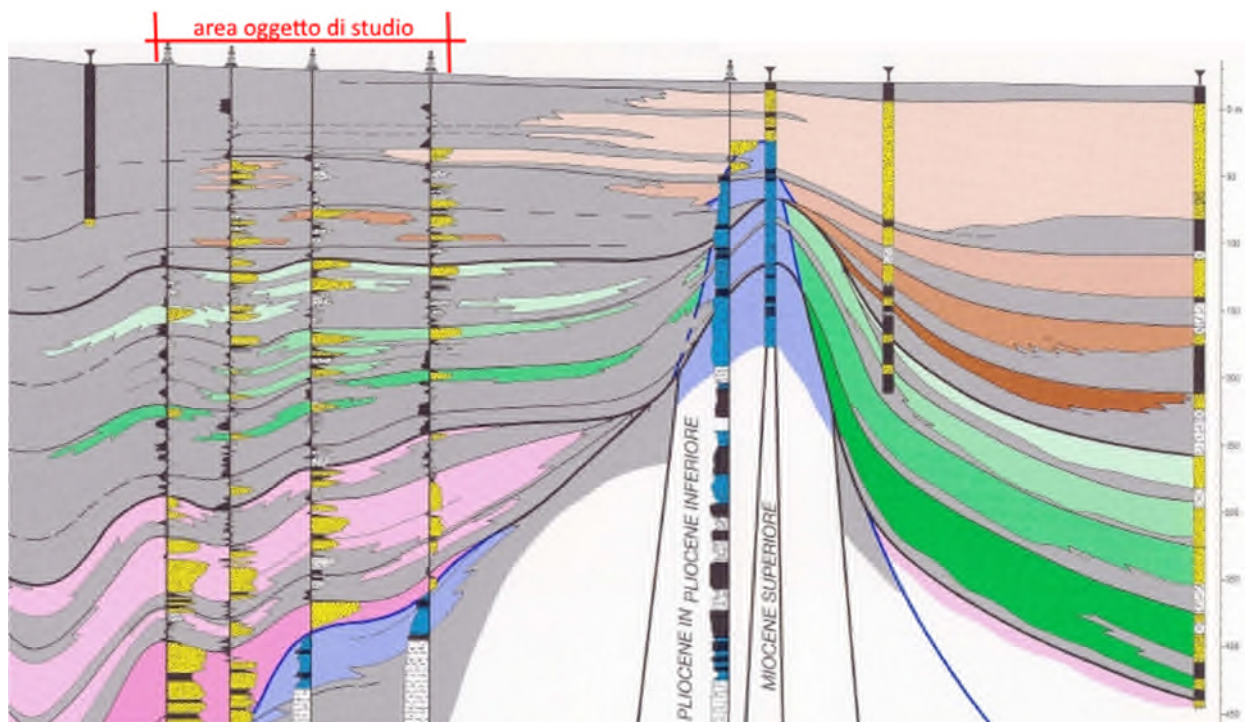


Fig. 3 Stralcio della Sezione idrostratigrafica n. 26 (tratto dal sito Servizio geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna)

Infatti la profondità della base del gruppo acquifero A (in color marrone), che nelle zone circostanti raggiunge i 250 m circa di profondità dal p.c., in corrispondenza dell'asse della dorsale risulta inferiore ai 100 m (70÷80 m circa); analogamente, la base dell'acquifero B (in colore verde) passa da un massimo di 450 m circa ad un minimo di 120÷150 m di profondità dal p.c.

Un altro aspetto molto evidente è che, nel settore più vicino al fiume Po, la percentuale di strati permeabili è molto alta, mentre, più a sud essi tendono ad assottigliarsi, fino a formare lenti di limitato spessore senza continuità laterale.

Alla luce del quadro idrostratigrafico illustrato, si evince che sottosuolo dell'area in esame è costituito, per varie decine di metri, da depositi prevalentemente fini, a litologia limosa e/o argillosa, caratterizzati da bassi valori di permeabilità. Qui le falde hanno sede nei piccoli corpi acquiferi lentiformi, mentre nei terreni che li circondano, l'acqua si infila con tempi estremamente lunghi.

La soggiacenza è variabile, generalmente prossima al piano campagna e risente fortemente di fenomeni locali, quali la presenza di corsi d'acqua superficiali (vedi, in particolare, il fiume Secchia), di emungimenti e delle caratteristiche di permeabilità dei terreni sovrastanti.

Le escursioni stagionali del livello idrico possono essere molto ampie: in particolare, durante le stagioni caratterizzate da intensi fenomeni piovosi la quota della falda può salire, in brevissimo tempo, fino a sfiorare il piano campagna. Per i serbatoi in prossimità di corsi d'acqua (vedi, sempre, fiume Secchia), si osservano fenomeni analoghi in corrispondenza di innalzamenti del livello idrico all'interno dell'alveo.

4 Sismicità

4.1 Storia sismica

La storia sismica del territorio in esame è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15, che fornisce un set di dati di intensità macrosismica nella finestra temporale 1000-2014, relativo a circa 20'000 località di cui 15'213 in territorio italiano.

Tra queste, quella più rappresentativa, tenendo conto sia del numero di osservazioni che della vicinanza all'area d'intervento, è sicuramente Modena, in corrispondenza della quale sono stati rilevati 169 terremoti.

Secondo quanto indicato in DBMI15, la storia sismica a Modena è riassunta graficamente nel diagramma riportato in Fig. 4, mentre in Tab. 1 sono elencati gli eventi di maggiore intensità, indicando per ciascuno di essi, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come I(MCS), quando si è verificato, il numero di località coinvolte (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (I_0), e la magnitudo momento (M_w).

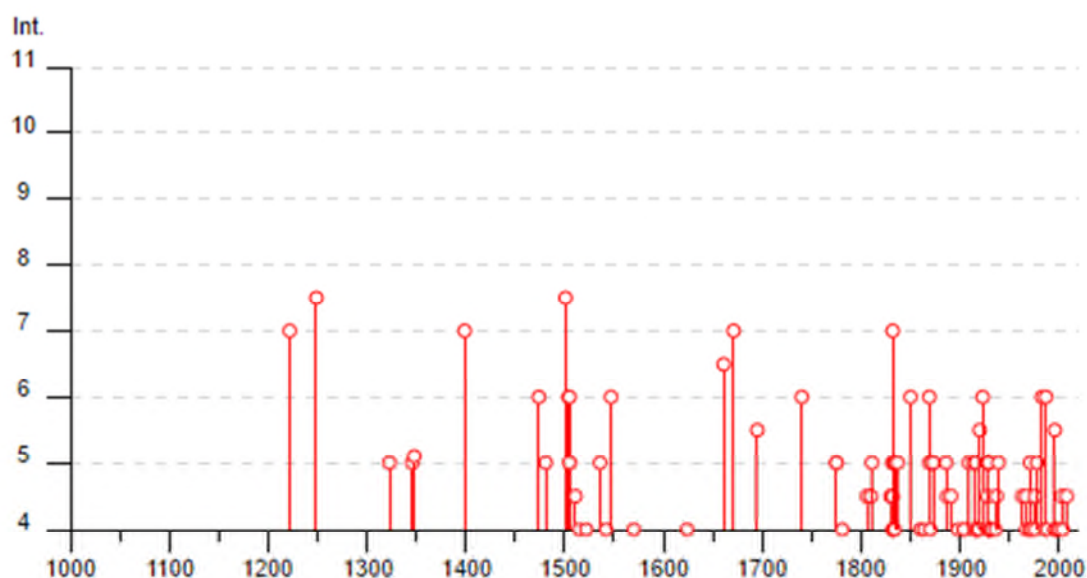


Fig. 4 Grafico rappresentante gli eventi sismici di Modena

Tab. 1 Massimi eventi sismici i cui effetti si sono fatti risentire a Modena

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7-8	1249	09					Modena	2	6-7	4.86
7-8	1501	06	05	10			Modenese	17	9	6.05
7	1222	12	25	12	30		Bresciano-Veronese	18	7-8	5.68
7	1399	07	20	23			Appennino modenese	6	7	5.10
7	1671	06	20	10			Modenese-Reggiano	8	7	5.27
7	1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51
6-7	1661	03	21	23			Modenese	4	6-7	4.86
6	1474	03	11	20	30		Modena	3	5	4.16
6	1504	12	31	04			Bolognese	15	6	5.02
6	1505	01	03	02			Bolognese	31	8	5.62
6	1547	02	10	13	20		Reggiano	7	7	5.10
6	1740	03	06	05	40		Garfagnana	32	8	5.64
6	1850	09	18	06	20		Modenese	7	5	4.16
6	1869	06	25	13	58		Appennino bolognese	18	7-8	5.43
6	1923	06	28	15	12		Modenese	22	6	5.04
6	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
6	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
5-6	1695	02	25	05	30		Asolano	107	10	6.40
5-6	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
5-6	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38

Va però segnalato che, nel DBMI15, non è indicato tra i sismi che hanno fatto risentire i propri effetti nella città di Modena, quello che ha recentemente interessato il territorio in esame, verificatosi il 20 maggio 2012 alle ore 4.03, con epicentro Mirandola (MO), in occasione del quale è stata registrata una magnitudo pari a 5.9 della scala Richter.

Tale sisma è stato seguito da numerosissime altre scosse, (1437 fino al 4 giugno - Fonte INGV) di cui 6 di magnitudo superiore a 5. In Fig. 5 è riportata la distribuzione temporale delle scosse sismiche nel periodo compreso tra il 20 maggio ed il 4 giugno 2012 e la relativa intensità.

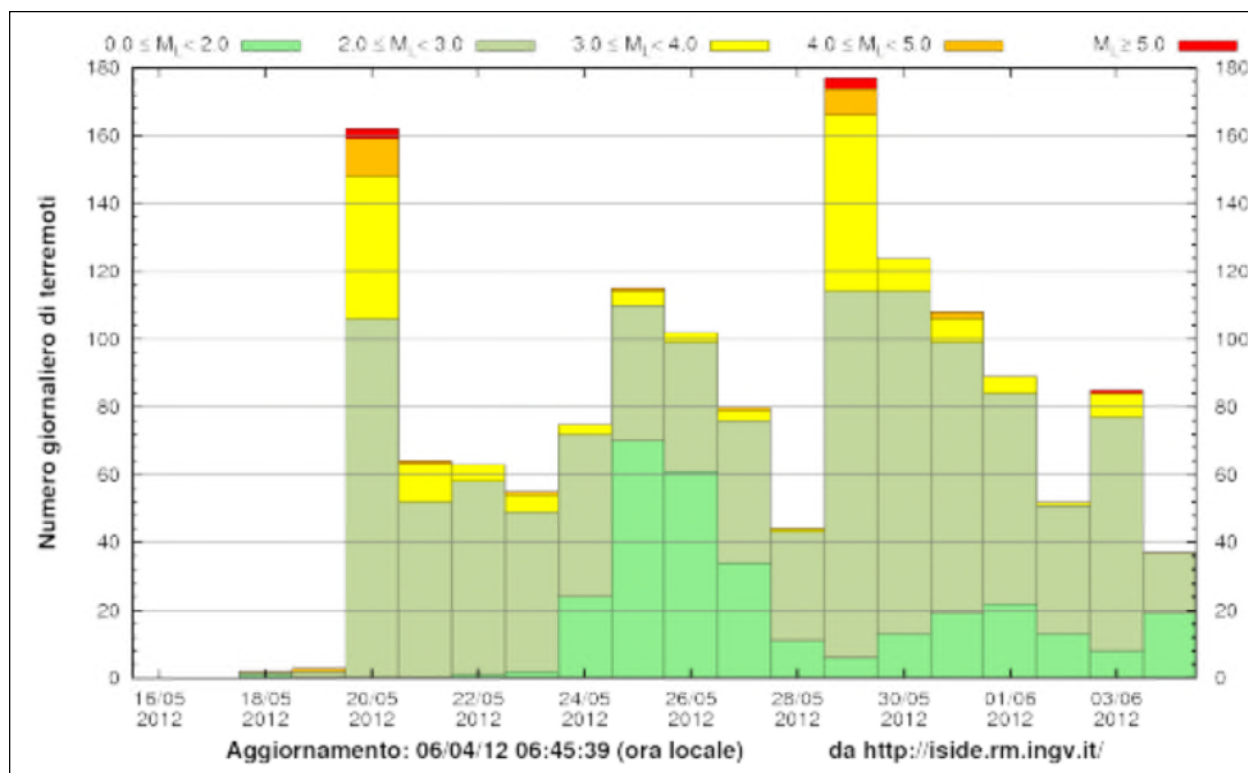


Fig. 5 Sequenza sismica dal 20 maggio al 4 giugno 2012

In Fig. 6 è riportata la distribuzione spaziale dei sismi con magnitudo maggiore di 4. Come si può notare dalla figura la profondità degli ipocentri è quasi sempre superficiale (5-10 Km).

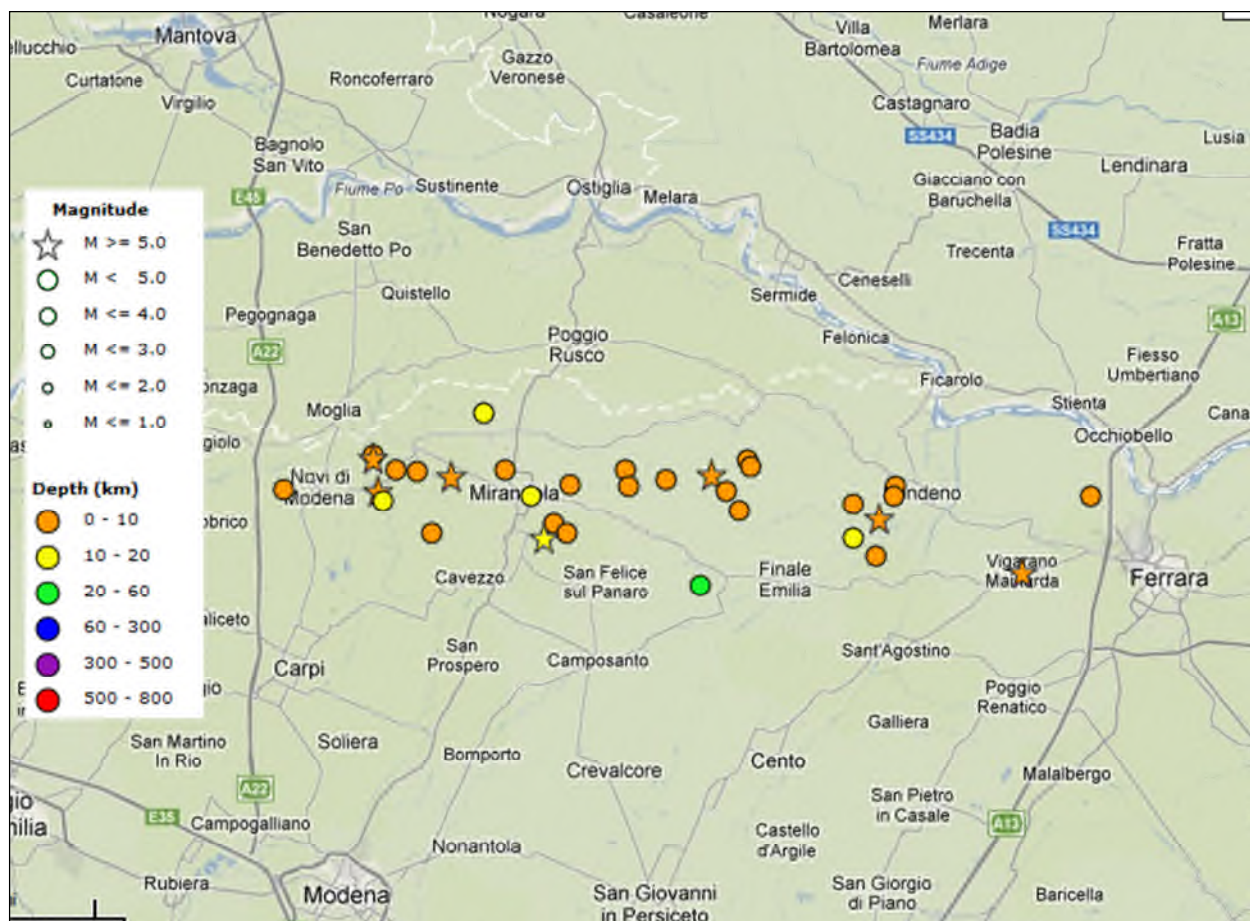


Fig. 6 Distribuzione degli epicentri dei sismi con magnitudo > 4 (da <http://iside.rm.ingv.it>)

L'elaborazione dei dati della rete sismica nazionale ha consentito ad INGV di verificare che il sisma è legato ad un meccanismo di tipo compressivo, con direzione di massima compressione nord-sud. Tale meccanismo è compatibile con la "struttura di Mirandola", faglia già valutata come potenziale sorgente sismogenetica, con magnitudo massima attesa pari a 5.9 della scala Richter.

In effetti il sisma, secondo le interpretazioni di INGV, è imputabile proprio al movimento della faglia di Mirandola, associata al sistema delle Pieghe Ferraresi.

In Fig. 7 è rappresentata una sezione schematica delle strutture sismogenetiche che hanno generato il terremoto.

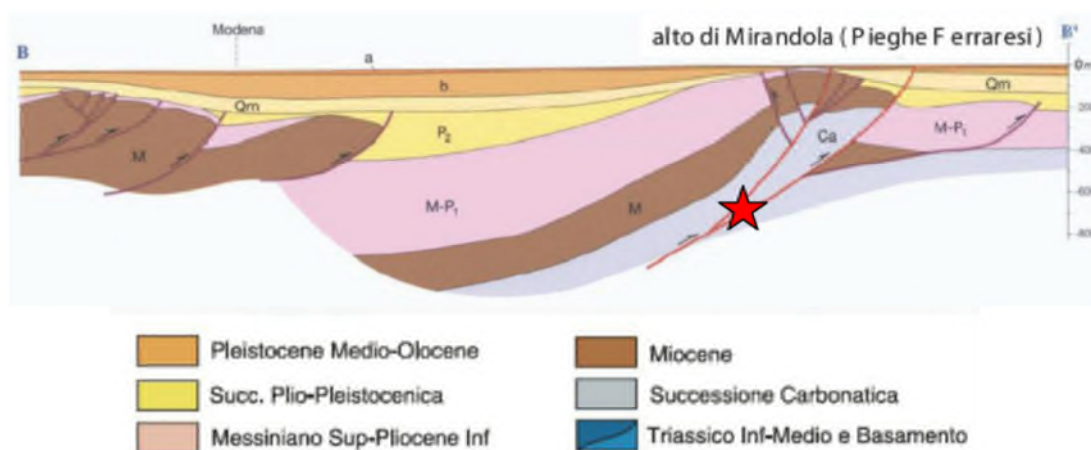


Fig. 7 Schema delle strutture sismogenetiche (la stella indica la probabile ubicazione dell'ipocentro) – da INGV – Relazione sul terremoto del 20 maggio 2012

L'evento di magnitudo $M_w=5.9$ del 20/5/2012 è stato risentito in tutto il nord-Italia e le shakemap calcolate subito dopo l'evento confermano queste osservazioni. In particolare, nella zona epicentrale le accelerazioni massime (PGA) sono state stimate fino a 0.3g, ossia il 30% dell'accelerazione di gravità. Analoga accelerazione è stata calcolata per il sisma del 29/5/2012, che ha presentato una magnitudo pari a 5.8 della scala Richter.

Questi valori sono tuttavia stimati in quanto non vi sono dati da stazioni sismiche poste all'epicentro stesso o negli immediati paraggi per cui sono da ritenersi solo indicativi.

La stazione di registrazione più vicina (appartenente alla Rete Accelerometrica Nazionale), ubicata a Mirandola (MRN), si trova ad una distanza di 13.3 km dall'epicentro dell'evento più significativo (20 maggio).

Il picco massimo d'accelerazione registrato, in occasione dell'evento più forte (IA) è di 0.309 g, e, come mostrato in Fig. 8, corrisponde alla componente verticale (UP-DOWN). Inferiori risultano i picchi corrispondenti alle due componenti orizzontali (0.264 in direzione SUD-NORD e 0.261 in direzione OVEST-EST).

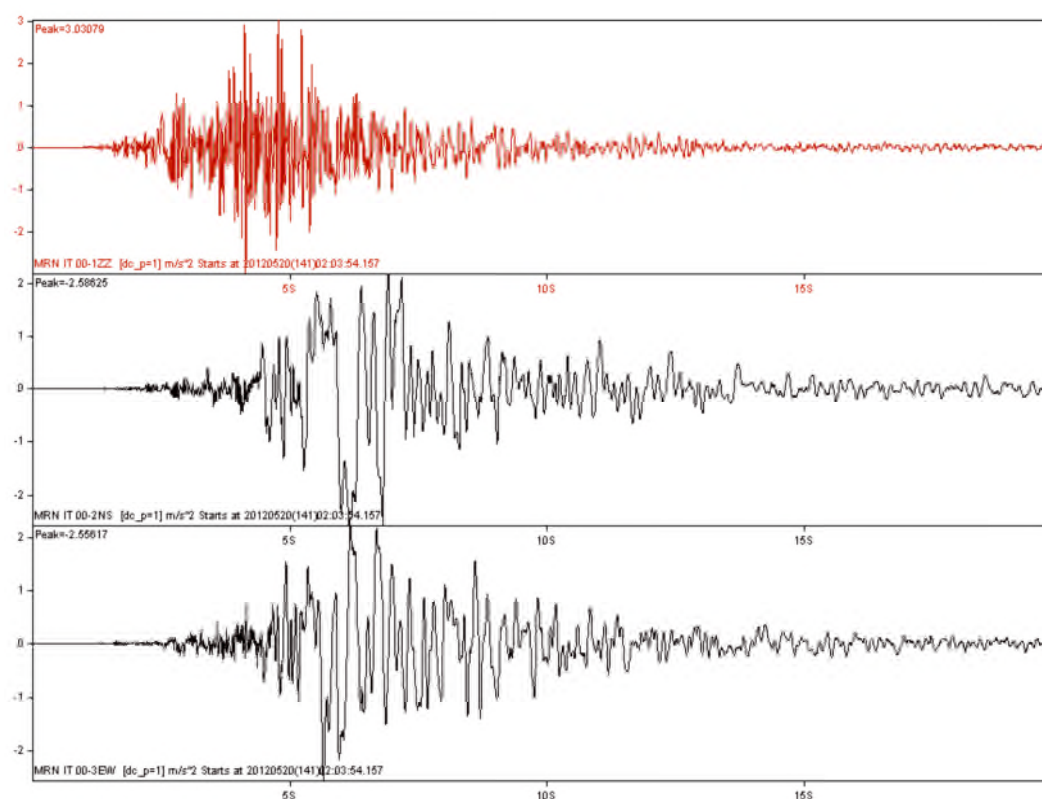


Fig. 8 Sisma del 20/5/2012. Accelerogramma delle componenti (dall'alto in basso) Verticale, Nord-Sud ed Est-Ovest (acc. m/s/s, tempo s) registrate dalla stazione di Mirandola della Rete Accelerometrica Nazionale (www.protezionecivile.gov.it)

La sequenza sismica ha prodotto gravi danni in una vasta area delle province di Modena, Ferrara, Mantova e Bologna. In particolare sono state gravemente danneggiate, in prossimità delle aree epicentrali, le strutture storiche in mattoni ed i capannoni industriali prefabbricati in cemento armato.

Relativamente agli effetti sui rilevati arginali di competenza dell'AIPo, come indicato nella comunicazione del 24/09/2012, prot. 33635/2012, a firma del Direttore, Dott. Ing. Luigi Fortunato, dalle verifiche, effettuate sia dal personale dell'Ufficio di Modena che da tecnici incaricati dalla Regione Emilia-Romagna, *"...non sono emerse situazioni degne di nota. In particolare non si sono riscontrati fenomeni di liquefazione a ridosso delle arginature stesse né presenza di fessurazioni dei terreni di sedime, sia lato golena che lato campagna. Ancora dall'esito dei sopralluoghi effettuati è risultato che alcune tratte di arginatura in frodo già interessate da fenomeni di instabilità delle sponde, hanno subito*

un peggioramento dello stato erosivo presumibilmente proprio a motivo delle sollecitazioni indotte dal sisma....”.

4.2 Classificazione sismica del territorio

L’Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, suddivide il territorio italiano in 4 zone sismiche con diversi livelli di accelerazione sismica di progetto. Secondo tale ordinanza, come indicato in Fig. 9, i comuni interessati dalle arginture in esame, sono stati identificati in zona 3 (a sismicità bassa), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, compresi tra $0,05 \cdot g$ e $0,15 \cdot g$ (dove g è l’accelerazione di gravità).

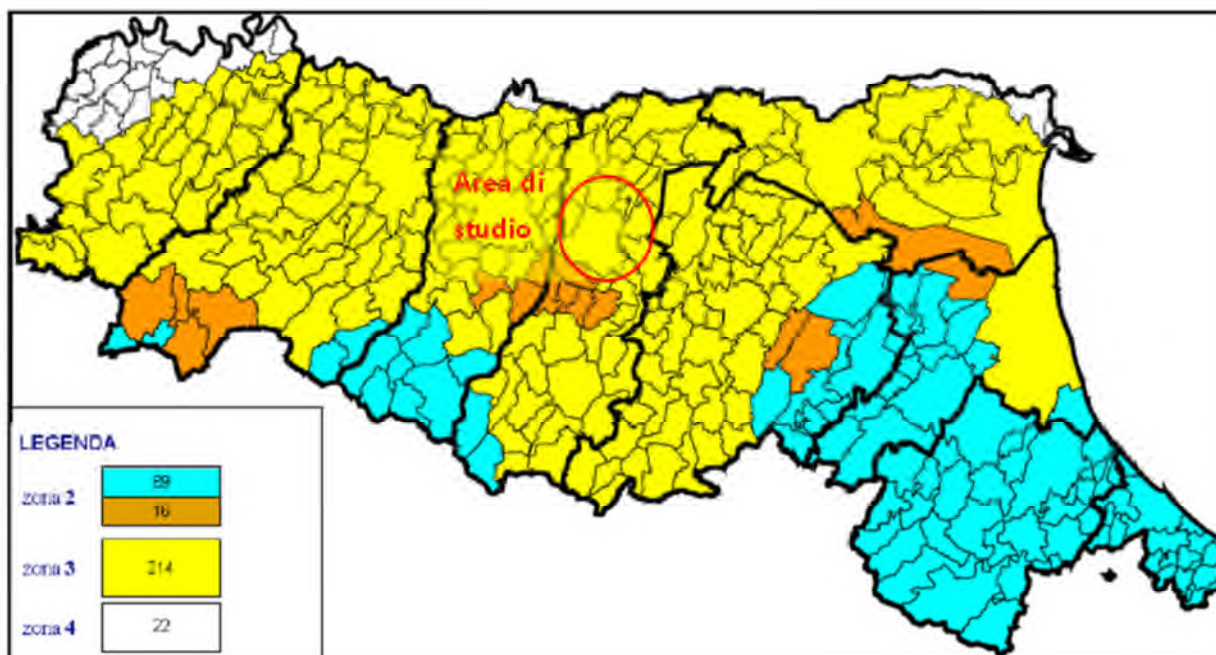


Fig. 9 Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna

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 (TR) 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.

Quanto alle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} , sono stati assunti i valori indicati nelle N.T.C. 01/2008 (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).

Se il sito in esame non ricade nei nodi del reticolo di riferimento, 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.

5 Indagini geognostiche

Come indicato nelle premesse, per ricostruire le caratteristiche litostratigrafiche, geotecniche e sismiche dei terreni interessati dagli interventi in progetto, sono stati, innanzitutto, presi in esame gli studi pregressi che avrebbero potuto fornire tale genere di dati; quindi, è stata pianificata e realizzata una specifica campagna d'indagini.

5.1 Indagini pregresse

Al fine di verificare l'eventuale presenza di dati geologici, geotecnici e sismici relativi alla porzione di territorio in esame, oltre alla Banca Dati disponibile sul sito del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna e al database di AIPO, sono stati presi in esame i seguenti lavori:

1. "indagini geognostiche, lungo le arginature del fiume Secchia, da Campogalliano a Concordia nella provincia di Modena, relative alla progettazione esecutiva sulla cassa di espansione prevista nel PS 45 (MO – 00009)", effettuate da TEA Territorio e Ambiente S.r.l., nel 1999, su incarico del Magistrato per il Po
2. "indagini geognostiche lungo le arginature del Fiume Secchia da S. Lorenzo della Pioppa a Concordia in provincia di Modena", effettuate da Vincenzetto S.r.l., nel 2002, su incarico del Magistrato per il Po
3. "studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Secchia nel tratto da Lugo alla confluenza in Po", realizzato da VAMS Ingegneria S.r.l., nel 2003, su incarico dell'Autorità di Bacino del Fiume Po
4. "indagini geognostiche in comune di Bastiglia, località via Nazionale – argine destro Secchia", effettuate da Montanari Perforazioni S.r.l., nel 2013, su incarico di AIPO.
5. "indagini geognostiche per la caratterizzazione dei terreni di fondazione e delle arginature in frodo del fiume Secchia in tratti vari propedeutiche all'esecuzione dei lavori della 1° fase dell'Ordinanza della Regione Emilia Romagna n. 3 del 5 giugno 2014 (MO-E-175/P.I.)

Tale ricerca ha evidenziato la presenza, nella zona oggetto d'intervento e nel suo stretto intorno, di oltre 400 indagini pregresse, tra cui principalmente troviamo:

- Prove CPT;
- Prove CPTU;
- Sondaggi a rotazione;
- Prove geoelettriche.

5.2 Campagna geognostica 2016

La campagna geognostica eseguita nel periodo marzo - novembre 2016 ha previsto l'effettuazione di 240 indagini. In Tab. 3 viene riportata la sintesi delle indagini effettuate suddivise per tipologia e numero.

Tab. 2 Riepilogo delle indagini geognostiche eseguite lungo il tratto fluviale interessato

TIPO PROVA	TOTALE
------------	--------

TIPO PROVA	TOTALE
Sondaggio a carotaggio continuo (S)	26
Trincea o pozzetto esplorativo (Saggio con escavatore) (E)	27
Prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono (CPTU)	156
Prova penetrometrica statica con punta elettrica, piezocono e cono sismico (SCPTU)	12
Tomografia elettrica (Te)	19

L'ubicazione di tutte le nuove indagini è stata rappresentata, in scala 1:10.000, nella tavola dell'ubicazione indagini geognostiche 2016, ove si osserva che esse sono state eseguite, quasi sempre, in corrispondenza delle arginature: sia in sommità che ai 2 piedi, lato fiume e lato campagna. Solo i pozzetti esplorativi son serviti per esaminare il sottosuolo in corrispondenza di alcune porzioni di golena.

Le indagini sono state eseguite dallo "Studio Tecnico Geom. Ugo Celotti s.r.l." di Milano con la seguente strumentazione:

- Sonda Massenza MI6, per i sondaggi a carotaggio continuo;
- Penetrometro PAGANI TG-73-200 6x6 semovente statico-dinamico, dotato di punta elettrica, piezocono (CPTU) e cono sismico (SCPTU);
- Terna idraulica Fiat – Kobelco, FB 110/2 per i pozzetti esplorativi;
- Resistivimetro Syscal PRO, della IRIS Instruments, per le tomografie elettriche.

Le profondità investigate sono state le seguenti:

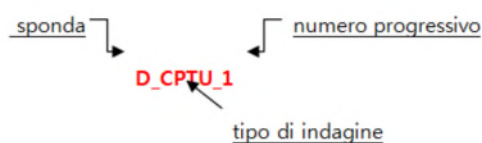
- 4 m per i saggi con escavatore
- 15 m per i sondaggi a rotazione e le prove CPTU realizzate al piede degli argini
- 20÷25 m per i sondaggi a rotazione e le prove CPTU realizzate in sommità arginale
- 30 m per le prove SCPTU

Inoltre è stato eseguito un sondaggio, per l'installazione di un piezometro Casagrande, fino a una profondità di 8 m dalla sommità arginale.

Per l'identificazione delle varie indagini, si è creato un sistema di denominazione univoco, suddiviso in campi dal segno underscore («_»), così strutturato:

sponda _ tipologia di indagine _ numero progressivo relativo.

Tale catalogazione risulta comprensibile dallo schema seguente:



dove:

- la sponda può essere:
- D = destra
- S = sinistra);

la tipologia di indagine può essere

- S = sondaggio
- E = saggio con escavatore
- CPTU = prova CPTU
- SCPTU = prova SCPTU

la numerazione delle indagini è progressiva per tipologia e per sponda.

Per i report delle indagini sopraelencate si è fatto riferimento alla documentazione prodotta dallo Studio Tecnico Geom. Ugo Celotti s.r.l. .

6 Caratteri litostratimetrici

Le indagini eseguite hanno consentito di ricostruire l'assetto litostratimetrico dell'area oggetto di studio.

In particolare, alla luce di quanto emerso nel corso della campagna geognostica, e dei dati pregressi disponibili, e il loro particolare interesse ai fini della progettazione degli interventi in progetto, si sono potute redigere 2 sezioni:

- la Sezione litostratimetrica – Profilo Sinistro, realizzata alla scala $V=1:250$ $H=1:6.250$, in asse al rilevato arginale, in sponda sinistra;
- la Sezione litostratimetrica – Profilo Destro, realizzata alla scala $V=1:250$ $H=1:6.250$, in asse al rilevato arginale, in sponda destra.

Si segnala che in sinistra idrografica dallo stante ST133 allo stante ST147 non è stato possibile ricostruire la sezione litostratimetrica (e di conseguenza il relativo modello geotecnico) per mancanza di indagini geognostiche nel tratto in esame.

Dall'esame di quanto rappresentato in tali elaborati cartografici, si osserva, innanzitutto, il notevole aumento dell'altezza dei rilevati arginali che si registra, spostandosi da monte verso valle; in particolare, di quello in sponda sinistra, che passa da un'elevazione di meno di 1 m a quasi 10 m rispetto al piano campagna extragolenale; mentre, quello in sponda destra si alza all'incirca dai 4 m iniziali ai 7 finali.

Nel medesimo verso, si nota che entrambi gli argini presentano una certa variabilità stratigrafica: infatti, nella parte più a monte, risultano costituiti prevalentemente da terreni granulari fini, quali sabbie-limose e limi-sabbiosi; mentre, procedendo verso valle, le tessiture si riducono e dominano i depositi argilloso-limosi. A ciò consegue un differente comportamento idrogeologico, in quanto, i terreni prevalentemente sabbioso-limosi possono essere considerati a permeabilità medio-alta, mentre, i terreni prevalentemente argillosi e/o limosi risultano a bassa permeabilità.

Tra i terreni di fondazione dominano i depositi coesivi, poco permeabili. Al loro interno, tuttavia, si riscontrano lenti e veri e propri banchi sabbiosi, con spessori estremamente variabili, da qualche decina di centimetri a oltre 15 m. La distribuzione delle sabbie è molto disomogenea, caratteristica della particolare situazione deposizionale, in cui le sabbie costituiscono i sedimenti di canale e di argine prossimale del corso d'acqua che ha subito molte divagazioni nel corso del tempo.

Situazione analoga si ha per i depositi argillosi a forte componente organica, pur trattandosi di lenti di minor spessore e continuità. Esse, infatti, presentano altezze massime di circa 3 metri, anche se in alcuni casi, si riscontrano più lenti all'interno della stessa verticale, per uno spessore complessivo fino a circa 10 m.

Le prove tomografiche (cfr. l'esempio di Fig. 10) coerentemente con quanto sopraindicato, indicano la presenza di terreni per lo più a bassa resistività, associabili a litotipi argillosi e limosi, con eccezione di alcune zone, in cui si raggiungono valori superiori a 70 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, e che rappresentano le zone con abbondante percentuale sabbiosa.

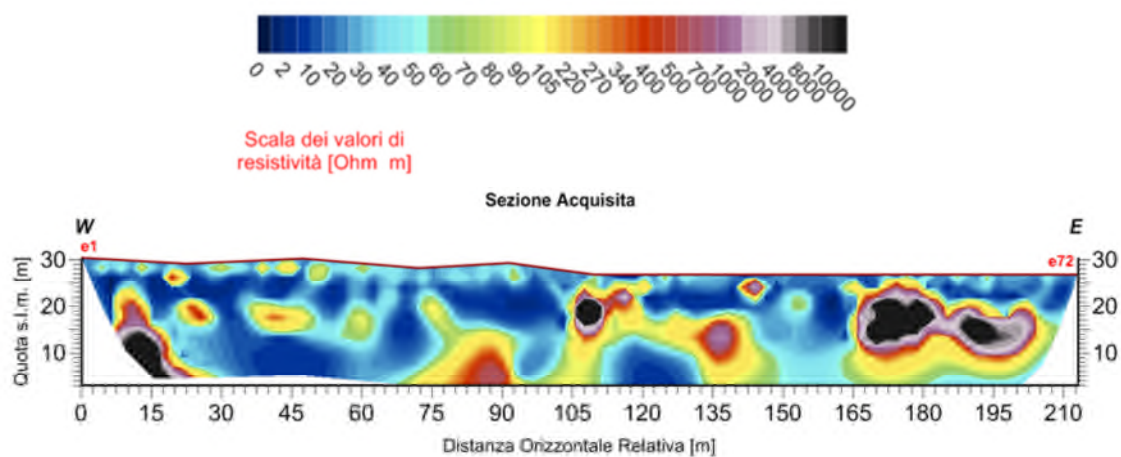


Fig. 10 Esempio di tomografia geoelettrica eseguita al piede di un argine nel tratto oggetto di studio

7 Geotecnica

7.1 Elaborazione dei risultati delle indagini in situ

Le indagini effettuate, oltre a consentire di determinare la successione litostratimetrica dei terreni costituenti il corpo arginale e di fondazione, hanno permesso di dedurre i parametri geotecnici.

A riguardo si sono utilizzate principalmente le prove CPTU (prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono).

Di seguito vengono descritte le correlazioni semi-empiriche utilizzate, che gli scriventi hanno individuato come più affidabili nel contesto geologico in esame.

7.1.1 Depositi coesivi

7.1.1.1 Coesione in condizioni non drenate

La resistenza al taglio non drenata (c_u) è stata determinata dall'interpretazione delle prove penetrometriche statiche CPTU mediante la seguente equazione (Baligh e Campanella, 1975):

$$c_u = \frac{q_c}{N_k}$$

assumendo $N_k=18$, valore comunemente accettato in bibliografia per terreni simili.

7.1.1.2 Coesione in condizioni drenate e grado di sovraconsolidazione (OCR)

La coesione drenata è stata considerata nulla nei terreni normalconsolidati (indice di consistenza $I_c < 0,5$), mentre per i terreni sovraconsolidati si è fatto riferimento alla resistenza al taglio in condizioni drenate, o coesione efficace c' , secondo 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:

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

La stima della pressione di consolidazione e del grado di sovraconsolidazione (OCR) è stata effettuata secondo le relazioni proposte da Mayne e Kemper (1988):

$$\sigma'_c = 0.243 \cdot (q_c)^{0.96}$$

$$OCR = 0.37 \cdot \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right)^{1.01}$$

7.1.1.3 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio (ϕ') è stato stimato a partire dai valori dei colpi NSPT, mediante la formula 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 (R_p) del penetrometro statico:

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

7.1.1.4 Modulo edometrico

Applicando la correlazione di Mitchell e Gardner (1975) il modulo edometrico si è ottenuto, partendo dai valori di resistenza alla punta R_p , utilizzando la seguente espressione:

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

dove i valori di α sono riportati nella Tab. 3 (w_n = umidità naturale espressa in percentuale).

Tab. 3 Correlazione di Mitchell e Gardner (1975)

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

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 formula proposta da Shioi e Fukuni in Road Bridge Specification (1982):

$$\varphi' = 27 + 0.3 * N_{SPT}$$

dove il valore di NSPT, anche in questo caso, viene ricavato utilizzando la correlazione di Robertson (1983) già riportata nel paragrafo 6.1.1.3.

7.1.2.2 Modulo edometrico

Il valore del modulo elastico E è stato ricavato mediante la relazione proposta da Schmertmann (1978), partendo dalla resistenza alla punta Rp delle prove CPTU:

$$E = 2.5 \cdot R_p$$

con il modulo elastico espresso in Kg/cm².

7.2 Modello geotecnico

L'individuazione del modello geotecnico dei corpi arginali e dei terreni di fondazione, rappresentato graficamente nelle tavole allegate alla presente relazione, è stato basato sull'interpretazione della stratigrafia dei terreni effettuata mediante la ricostruzione delle sezioni litologiche.

Le diverse unità litologiche sono state poi correlate alle caratteristiche geotecniche dei terreni determinate con i metodi descritti nel paragrafo precedente.

Di seguito viene proposta una caratterizzazione di massima mediante range di valori attribuiti ai singoli orizzonti:

7.2.1. Corpo arginale

ORIZZONTE 1: TERRENI PREVALEMENTEMENTE SABBIOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 28 \div 32^\circ$
- modulo elastico: $E = 5 \div 18 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 2: TERRENI PREVALEMENTEMENTE SABBIOSO-LIMOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 29 \div 31^\circ$
- modulo elastico: $E = 7 \div 19 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 3: TERRENI PREVALEMENTEMENTE ARGILLOSO-LIMOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 68 \div 129 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 10.9 \div 11.4 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 22 \div 25^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 4 \div 7 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 4: TERRENI PREVALENTEMENTE ARGILLOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 48 \div 108 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 11.0 \div 11.5 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 21 \div 23^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 3 \div 6 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 5: TERRENI PREVALENTEMENTE ORGANICI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 29 \div 42 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 10.8 \div 11.0 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 19 \div 20^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 2 \div 3 \text{ MPa}$

7.2.2. Terreni di fondazione

ORIZZONTE 6: DEPOSITI PREVALENTEMENTE ORGANICI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 31 \div 44 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 11.6 \div 11.7 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 19 \div 20^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 3 \div 4 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 7: DEPOSITI PREVALENTEMENTE ARGILLOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 18.5 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 50 \div 93 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 11.2 \div 11.5 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 21 \div 23^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 3 \div 6 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 8: DEPOSITI PREVALENTEMENTE ARGILLOSO-LIMOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$
- coesione non drenata: $C_u = 58 \div 122 \text{ KPa}$
- coesione efficace: $c' = 11.0 \div 11.5 \text{ KPa}$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 21 \div 24^\circ$
- modulo edometrico: $E_{ed} = 4 \div 6 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 9: DEPOSITI PREVALENTEMENTE SABBIOSO-LIMOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 28 \div 30^\circ$
- modulo elastico: $E = 6 \div 12 \text{ MPa}$

ORIZZONTE 10: DEPOSITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI

Comportamento: granulare

Parametri geotecnici:

- peso specifico $\gamma = 21.0 \text{ kN/m}^3$
- angolo di attrito interno: $\phi' = 29 \div 33^\circ$
- modulo elastico: $E = 9 \div 20 \text{ MPa}$