

Agostino Pasquali Coluzzi  
geologo

Marco Venturini  
geologo

Mauro Valcarengi  
geologo

**STUDIO TRESIS**  
*Geologia, Geotecnica, Ingegneria*

3171 Frosio Budriesse

## COMUNI DI MACCASTORNA E CASTELNUOVO BOCCA D'ADDA (LO)

Coordinamento / Mandante:

STRATEGIES FOR WATER  
**FROSIO**  
next 

Progettista: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

Progettazione / Mandataria

**STUDIO TRESIS**  
*Geologia, Geotecnica, Ingegneria*

Dr. A. P. Coluzzi



Progetto:

## IMPIANTO IDROELETTRICO BUDRIESSE

# RELAZIONE GEOLOGICA - GEOTECNICA

La presente Relazione è di esclusiva proprietà intellettuale dello Scrivente. Non è consentito trasmettere con qualsiasi mezzo, senza autorizzazione, la Relazione o parte di essa, salva la facoltà di utilizzarla in tutto o in parte per scopi non commerciali e non professionali, purché venga citato l'autore. La presente Relazione sarà conservata in forma originale e riservata negli archivi dello Studio a disposizione del Committente.

Data	Revisione	Gestore della commessa	Responsabilità professionale
12.12.2023	00	Dr. A. P. Coluzzi	Dr. A. P. Coluzzi

## INDICE

1 - PREMESSA.....	3
2 - MODELLO GEOLOGICO .....	5
2.1 - Litologia .....	5
2.2 - Morfologia .....	13
2.3 - Idrogeologia .....	17
2.4 - Componente sismica .....	19
3 - MODELLO GEOTECNICO .....	31
3.1 - Componente sismica .....	31
3.2 - indagini eseguite .....	33
3.3 - Modello geotecnico .....	46

### RIFERIMENTI NORMATIVI

Norme tecniche per le Costruzioni  
Decreto Ministeriale 17 Gennaio 2018

Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni"  
CSLLPP 2 febbraio 2009, n. 617

D.g.r. 30 novembre 2011 - n. IX/2616: Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio,

D.g.r. 11 luglio 2014 - n. X/2129: Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia,  
Legge Regionale 12 ottobre 2015, n. 33: Disposizioni in materia di opere o di costruzioni e relativa vigilanza in zone sismiche,

D.g.r. 30 marzo 2016 - n. X/5001: Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l'esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica.



Nella seguente Figura 2 si riporta l'immagine satellitare del sito in esame.



Figura 2 - vista aerea della zona dell'impianto (Fonte: GoogleEarth©)

## 2 - MODELLO GEOLOGICO

### 2.1 - Litologia

La Figura 3 è tratta dal "Foglio 60 - "Piacenza" della Carta Geologica d'Italia; l'area di progetto è indicata dal cerchio rosso.

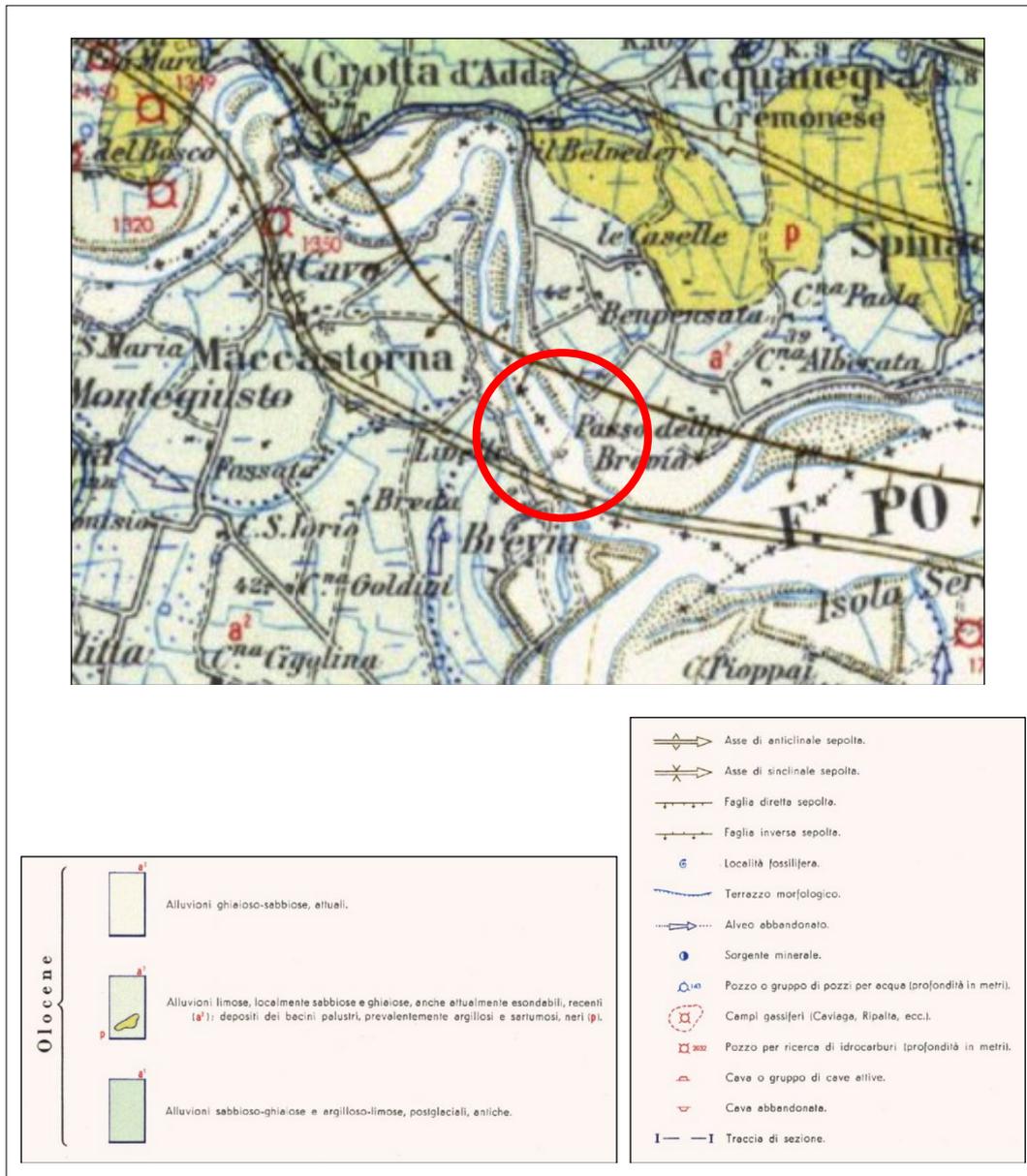


Figura 3 - Carta Geologica d'Italia (scala 1:100.000)

«I depositi affioranti nell'area in esame sono caratterizzati da una serie di terrazzi fluviali la cui successione altimetrica è proporzionale all'età dei sedimenti: la quota è tanto maggiore, quanto più antica è l'età del terrazzo; inoltre, tanto più antica è l'età del terrazzo, tanto più ridotta sarà la sua estensione, in quanto sottoposto all'azione erosiva negli stadi interglaciali successivi» (dalla relazione dello Studio geologico comunale).

La successione dei terrazzi nella medio-bassa pianura è la seguente:

- Fluviale Mindel: superfici più antiche poste a quote maggiori;
- Fluviale Riss: superfici intermedie per quota ed età;
- Fluviale Wurm: superfici più recenti poste a quote inferiori.

Questi ultimi (depositi terrazzati Wurmiani) costituiscono quello che viene definito il Livello (o Piano) fondamentale della Pianura Padana o piano generale terrazzato, risultato dall'ultima fase di esteso colmamento della pianura. Successivamente a tale colmamento alluvionale, nel corso cataglagiale wurmiano (periodo di ripresa termica successivo alla glaciazione stessa), ha avuto inizio un ciclo prevalentemente erosivo protrattosi nell'Olocene, che ha determinato la formazione dell'alta scarpata morfologica che, incidendo il Piano fondamentale, delimita le valli dei principali fiumi occupate dai successivi depositi alluvionali medio recenti.

Nel territorio di Castelnuovo Bocca d'Adda affiorano le unità litostratigrafiche elencate in Figura 4:

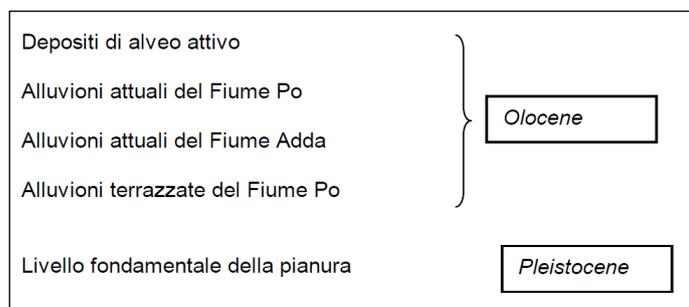


Figura 4 – Unità litostratigrafiche affioranti nel territorio di Castelnuovo Bocca d'Adda

### Depositi di alveo attivo

I depositi di alveo attivo sono rinvenibili nell'asta fluviale del fiume Po e del fiume Adda a Nord. La morfologia è costituita da un ampio canale, quasi completamente fissato dalle opere spondali, dove si assiste alla presenza di ambienti deposizionali di elevata energia. La successione stratigrafica è caratterizzata da sabbie grossolane e ghiaietto con stratificazione piano parallela o a festoni.

### Alluvioni attuali del fiume Po

Affiorano parallelamente all'asse del corso d'acqua medesimo, fiancheggiando l'alveo inciso. Essi presentano generalmente una forma allungata secondo l'asse del corso d'acqua. La successione stratigrafica è costituita in prevalenza da sabbie, argille sabbiose e limi, ai quali si intercalano livelli di argille, con spessore generalmente di qualche decimetro, riferibili a processi di sedimentazione in ambienti privi di correnti trattive.

### Alluvioni attuali del fiume Adda

Compaiono nella porzione più settentrionale del territorio comunale. Litologicamente non differiscono in modo significativo dai sedimenti attuali del Fiume Po, prima descritti. Per questa ragione il limite riportato in tavola 1 è da considerarsi semplicemente indicativo e supposto.

### Alluvioni terrazzate del Fiume Po

Trattasi di depositi intercalati medio-recenti, di natura sabbiosa, argillo-limosa e limosa, di poco sospesi sugli alvei attuali. Essi comprendono le aree delle piane alluvionali affrancate dalle attività di deposizione fluviale, aree golenali esondabili più o meno saltuariamente e i paleomeandri corrispondenti ad antichi percorsi fluviali.

### Alluvioni Pleistoceniche

Depositi fluviali da sabbiosi ad argilloso-sabbiosi e argilloso-limosi, con granulometria decrescente da ovest verso est. Costituiscono il livello (o piano) fondamentale della pianura. Il suolo presenta una colorazione brunastra, talora rossastra per rimaneggiamento e dilavamento di paleosuoli più antichi preesistenti nelle aree a monte. Il passaggio dal fluviale wurmiano alle alluvioni medio-recenti oloceniche è nettamente distinguibile in corrispondenza dell'alta scarpata che si sviluppa tutt'intorno al capoluogo comunale, al centro del territorio indagato.

### Depositi di paleoalveo

Nell'area in esame sono presenti diversi paleoalvei afferenti sia al fiume Po, che al fiume Adda. L'assetto del rilievo è caratterizzato da lievi depressioni nel piano campagna che conservano le caratteristiche forme subcircolari e a festoni tipiche dei meandri estinti. Lungo tali drenaggi naturali sono in genere impostate lanche

fluviali (spesso interrite) oppure canali artificiali di bonifica agricola. In questi ultimi casi la conformazione del rilievo è caratterizzata da superfici piane, parcellizzate in appezzamenti di terreno regolari con andamento nastriforme, adattati perfettamente all'andamento del precedente assetto del canale. La successione stratigrafica dei depositi di paleoalveo del fiume Po è tipicamente caratterizzata da sabbie con ghiaietto in facies di canale attivo, chiuse verso l'alto da una successione *fining-upward* di riempimento canale (in sequenza, dal basso verso l'alto, sabbie, limi ed argille, talora torbe).

La presenza di depositi alluvionali recenti è confermata dalla tavola "Carta Geologica" tav. 02 del sopra citato PGT, dalla quale è tratta la Figura 5.

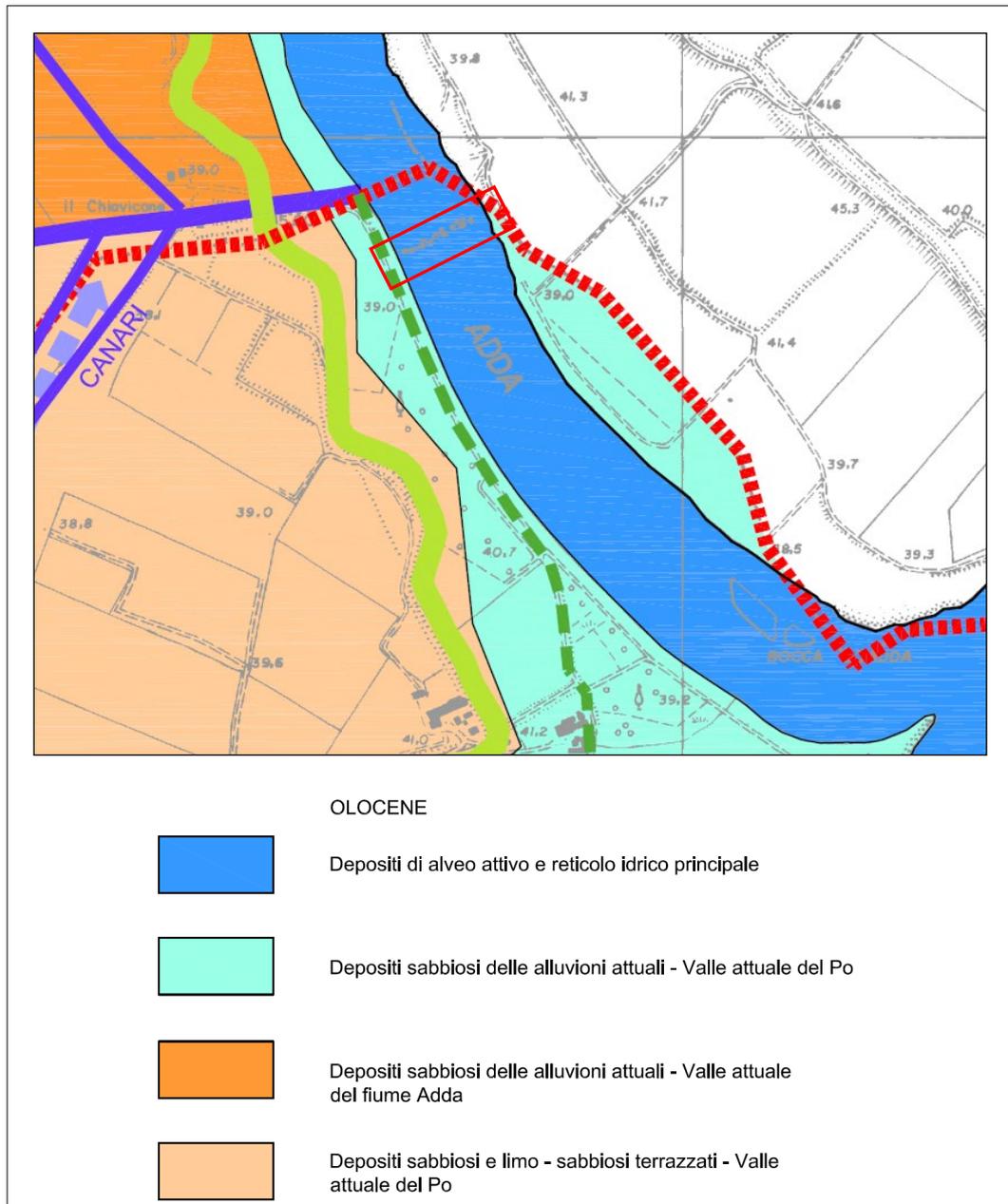


Figura 5 - Carta Geologica geomorfologica del PGT comunale di Castelnuovo Bocca d'Adda

Si riportano di seguito le stratigrafie dei n.6 sondaggi eseguiti nell'area (Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12), forniti dalla committenza, con la relativa ubicazione (Figura 6).



Figura 6 - ubicazione sondaggi eseguiti nell'area di progetto

I terreni investigati tramite i sondaggi evidenziati in Figura 6 sono costituiti prevalentemente da sabbie fini, localmente limose, con inter-livelli prevalentemente limosi, passanti gradualmente a sabbie ghiaiose e a ghiaie. Il modello geologico desunto dai sondaggi è il seguente:

Sponda destra

Unità	Spessore (da m a m)	Peso unità di volume
(1) limo sabbioso-argilloso	da piano campagna a 2,50 – 3,50 m	18 kN/m <sup>3</sup>
(2) sabbia localmente limosa	da 2,50 – 3,50 m a 6,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(3) sabbia con orizzonti limosi-argillosi	da 6,00 m a 11,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(4) sabbia	Da 11,00 m a 23,00-25,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(5) sabbia con ghiaia	Da 23,00-25,00 m a 30,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>

Sponda sinistra

Unità	Spessore (da m a m)	Peso unità di volume
(1) limo argilloso	da piano campagna a 2,20 m	18 kN/m <sup>3</sup>
(2) sabbia localmente limosa	da 2,20 m a 7,50 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(3) sabbia con orizzonti limosi-argillosi	da 7,50 m a 16,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(4) sabbia	Da 16,00 m a 20,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>
(5) sabbia con ghiaia	Da 20,00 m a 24,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>



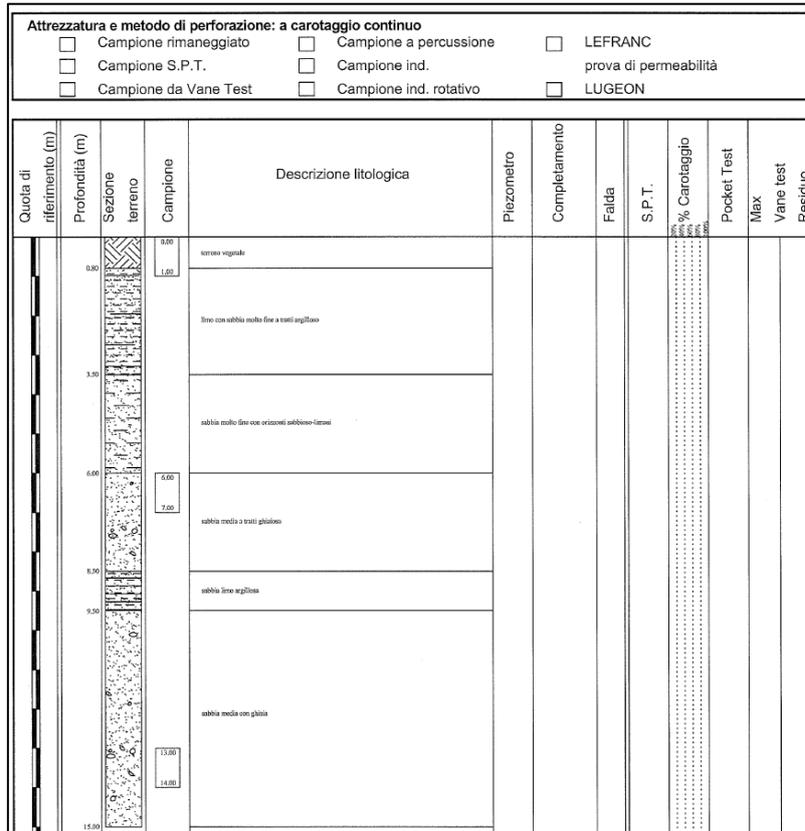


Figura 9 - stratigrafia sondaggio S3

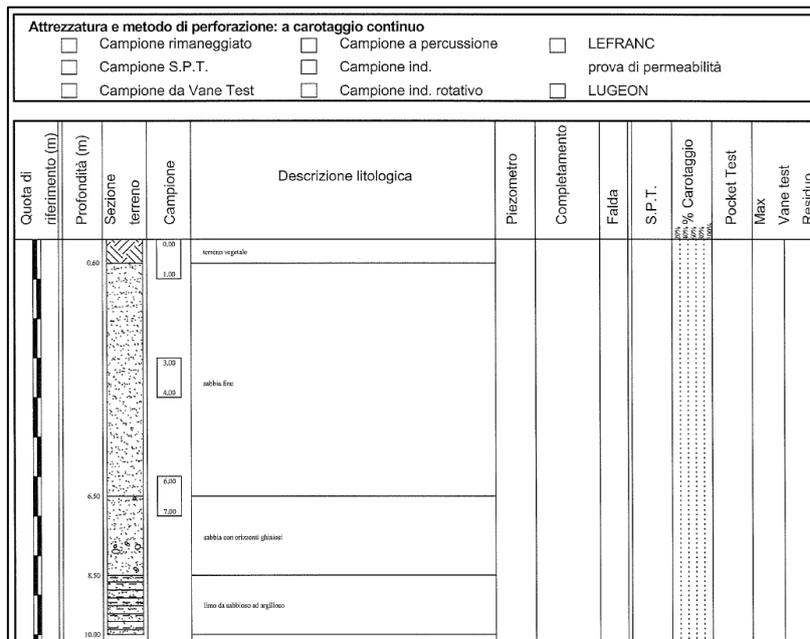


Figura 10 - stratigrafia sondaggio S4

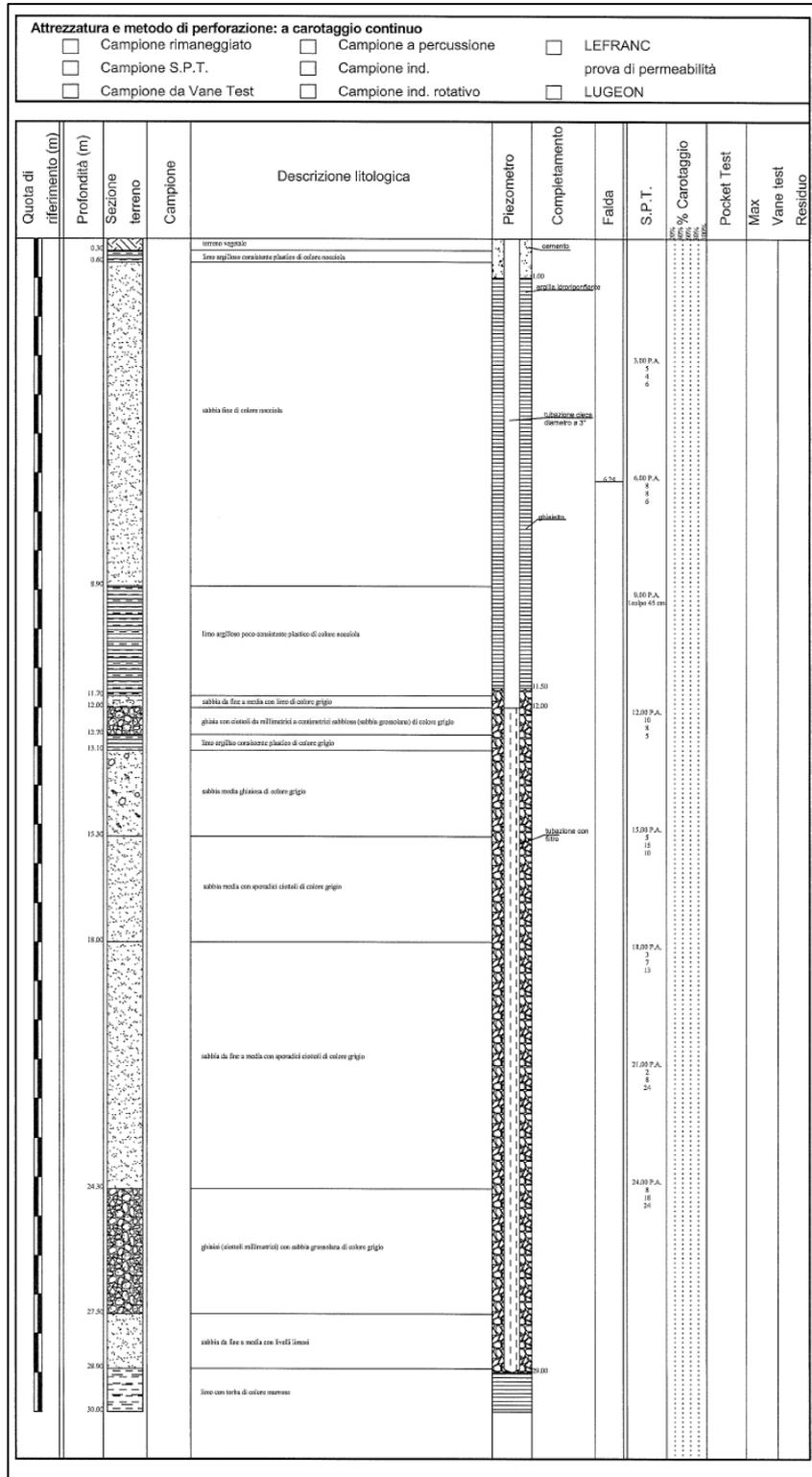


Figura 11 - stratigrafia sondaggio S6



## 2.2 - Morfologia

Morfologicamente si distinguono le seguenti unità morfologiche caratteristiche del paesaggio (vedi Figura 13):

1. alveo attivo dei corsi d'acqua e le forme ad esso associate (e.g., barre, isole, sponde in erosione ecc.);
2. sistema dei terrazzi sospesi sull'alveo attivo, modellato nelle alluvioni medio-recenti dei principali corsi d'acqua;
3. ripiani antichi sviluppati in modo discontinuo ai margini della valle olocenica dell'Adda;
4. "Livello Fondamentale della Pianura" (o "Piano Generale Terrazzato"), modellato nei depositi terrazzati tardo-pleistocenici costituenti un piano debolmente immergente verso sud.

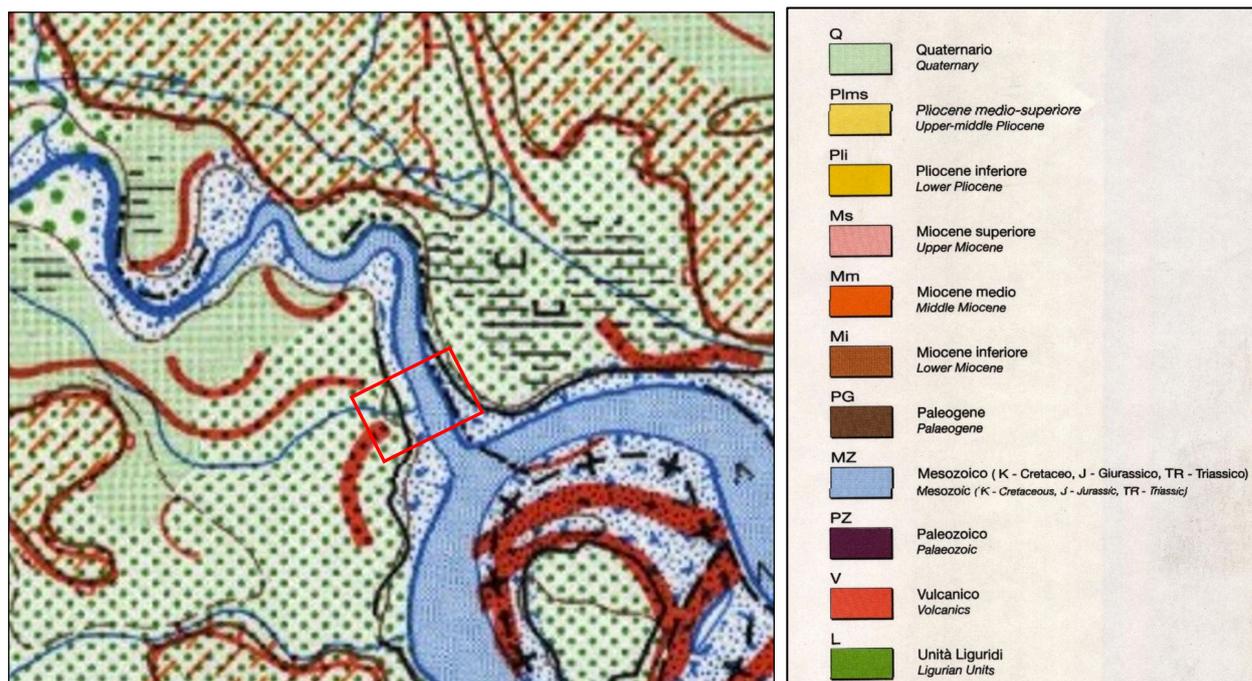
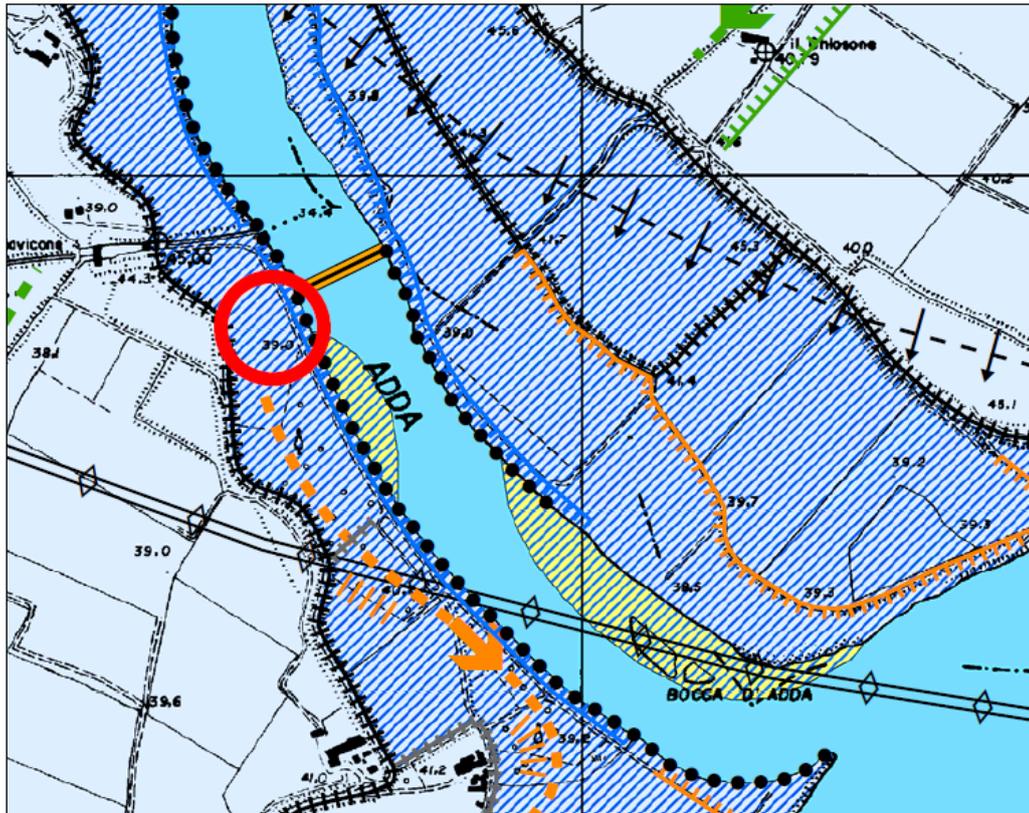


Figura 13 - Carta geomorfologica della Pianura Padana (Castiglioni et. Al., 1997). Rettangolo rosso: area di progetto.

La quota topografica della pianura nell'intorno del sito è circa 40 m s.l.m. la quota dell'alveo è circa 31 m s.l.m.

L'area su cui insistono le opere presenta una debole pendenza, la categoria topografica definita in base al D.M. 14/01/08 è la T1, alla quale corrisponde un valore di coefficiente di amplificazione topografica ST pari a 1.

In Figura 14 sono mostrati i caratteri principali dell'assetto geomorfologico dell'area dell'impianto. L'area è caratterizzata dalla presenza di terrazzi alluvionali soggetti a riattivazione in caso di piene straordinarie di scarpate fluviali esposte a fenomeni erosivi, parzialmente protette da opere di difesa (massicciate).



UNITA' STRATIGRAFICHE (fonte: Carta Geologica d'Italia, F.60 "Piacenza")	SIMBOLO	UNITA' GEOMORFOLOGICHE
	<b>OLOCENE</b>	<b>FASCIA DI MEANDREGGIAMENTO POST-GLACIALE DEL PO E DELL'ADDA</b>
<b>ALLUVIONI ATTUALI</b> Depositi prevalentemente ghiaiosi e sabbiosi del greto dei fiumi Adda e Po.		Ripiani maggiormente depressi, sommersi durante le piene ordinarie, posti all'interno degli alvei incisi dei fiumi Adda e Po (isole fluviali, barre, etc.)
<b>DEPOSITI ALLUVIONALI MEDI (b) E RECENTI (a)</b>  Depositi sabbiosi, talora ghiaiosi, terrazzi, di poco sospesi sugli alvei attuali, anche attualmente esondabili (Olocene medio-superiore).  a) Terreni alluvionali dei fiumi Adda e Po, soggetti ad una riattivazione dei fenomeni sedimentari in occasione di piene straordinarie.  b) Terreni di origine fluviale, non più esposti a fenomeni alluvionali in quanto isolati dai corsi d'acqua responsabili della loro deposizione.	 a) b)	Sistema di terrazzi fluviali, sospeso di pochi metri sull'alveo attivo, formato da:  a) Una superficie modellata nei depositi più recenti, interessata dall'insieme delle forme fluviali che vengono riattivate in occasione delle piene principali;  b) Una superficie esterna all'area golenale, da tempo indisturbata dai fenomeni morfologici e sedimentari dei corsi d'acqua.

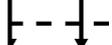
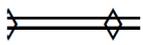
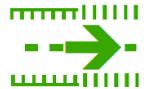
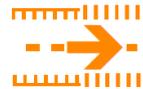
ELEMENTI GEOLOGICI STRUTTURALI MODELLATI NEL SUBSTRATO PRE-QUATERNARIO	
Faglia inversa sepolta.	
Asse di anticlinale sepolta.	
PRINCIPALI ELEMENTI MORFOLOGICI	
Scarpate fluviali.	
Traccia di percorso fluviale e forme ad esso associate (scarpate, depressioni morfologiche ecc.): a) abbandonato (paleoalveo); b) riattivabile in occasione di piene straordinarie.	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>a) </p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>b) </p> </div> </div>
Depressioni morfologiche, con acqua di falda affiorante o sub-affiorante.	
Corsi d'acqua principali (Po e Adda).	
ELEMENTI ANTROPICI	
Rilevati arginali: principale o maestro (a), secondario o golenale (b).	<p>a) </p> <p>b) </p>
Scarpate fluviali esposte a fenomeni erosivi, parzialmente protette da opere di difesa (massicciate).	
Traversa fluviale.	
Area oggetto d'intervento.	

Figura 14 - Carta geomorfologica dell'area

Il Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) è lo strumento operativo previsto dal d.lgs. n. 49 del 2010, che dà attuazione alla Direttiva Europea 2007/60/CE, per individuare e programmare le azioni necessarie a ridurre le conseguenze negative delle alluvioni per la salute umana, per il territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali.

La cartografia del PGRA (Figura 15) indica che l'area in esame si trova all'interno di zone identificate "a rischio significativo" per alluvioni frequenti.

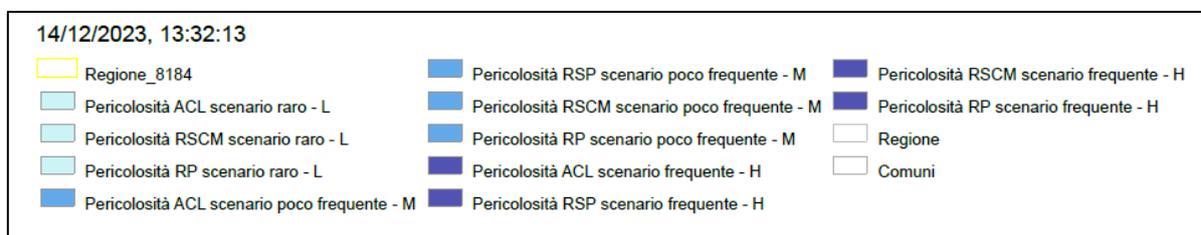


Figura 15 - estratto carta PGRA

## 2.3 - Idrogeologia

Lo studio geologico comunale di Castelnuovo Bocca d'Adda (2014) così descrive i caratteri idrogeologici generali del territorio:

[...]

L'intero ambito di territorio comunale appartiene all'unità idrogeologica del sistema fluvio-deltizio del Fiume Po. Tale unità appoggia sopra un substrato plio-pleistocenico marino e/o transizionale costituito al tetto da sabbie fini limose, sabbie e ghiaie, mentre nella parte inferiore da terreni fini, sempre di origine marina, virtualmente impermeabili (Pliocene).

L'unità idrogeologica del sistema fluvio-deltizio del Fiume Po è rappresentata da spesse bancate di sabbie e ghiaie con locali intercalazioni lentiformi di argille e limi. Esse si estendono parallelamente all'asse fluviale del Fiume Po per una fascia di qualche chilometro configurando un acquifero multistrato (vd. figg. 3a e 3b).

Il serbatoio idrico è infatti rappresentato da estese bancate sabbiose, caratterizzate peraltro da alti valori di conducibilità idraulica e di coefficiente di immagazzinamento, separate dai terreni praticamente impermeabili.

Il regime idrico sotterraneo è tipicamente caratterizzato da falde freatiche e semi-confinato negli acquiferi superficiali e falde confinate in quelli profondi. In particolare nell'orizzonte acquifero superficiale le falde presenti sono di tipo "freatico" o "a pelo libero" nelle aree attigue e contigue al Fiume Po, in cui risultano affioranti e/o subaffioranti i depositi sabbiosi, ma diventano di tipo "semiconfinato" nelle aree più distali, ove si ritrovano in superficie suoli a bassa permeabilità e cospicuo spessore.

[...]

Si riporta di seguito (Figura 16) stralcio della carta idrogeologica del sopra citato PGT comunale.

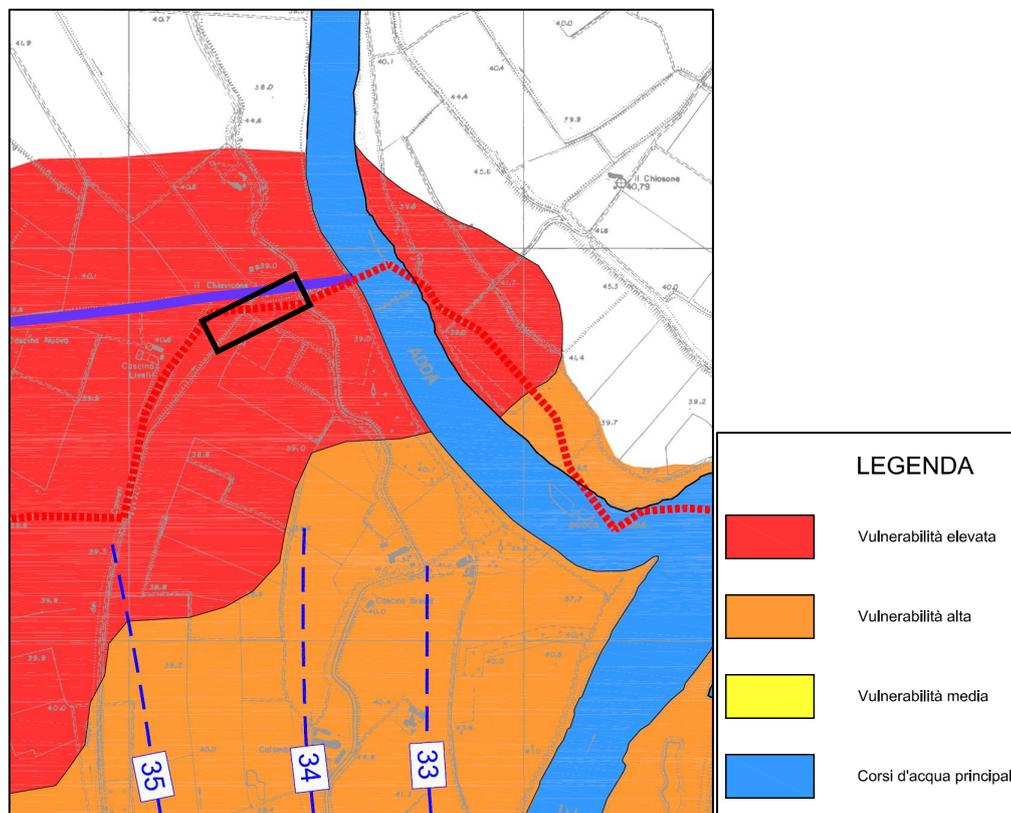


Figura 16 - Carta Idrogeologica del PGT comunale

La carta idrogeologica di Figura 16 non riporta le isopieze dell'area in esame, ma si possono prendere in considerazione i valori di soggiacenza della falda misurati nel corso dell'esecuzione dei sondaggi. In particolare, i sondaggi S6 (sponda destra) e S7 (sponda sinistra) hanno rilevato la falda alle quote rispettivamente di metri 6,25 e 6,75.

Essendo la quota del piano campagna pari a circa 40 m s.l.m., i valori rilevati sono compatibili con quelli indicati in Figura 16.

In considerazione della natura dei terreni presenti e della quota della falda rispetto al piano campagna, la classificazione del grado di vulnerabilità della stessa pone l'area in esame in Classe di Vulnerabilità Elevata.

Un precedente studio relativo alla fattibilità dell'impianto oggetto del presente studio (frutto di collaborazione fra Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura Università degli Studi di Pavia, Università degli Studi di Milano, Studio Frosio, Geolambda) ha ricostruito la carta idrogeologica dell'area. Si riporta uno stralcio del suddetto documento in Figura 17.

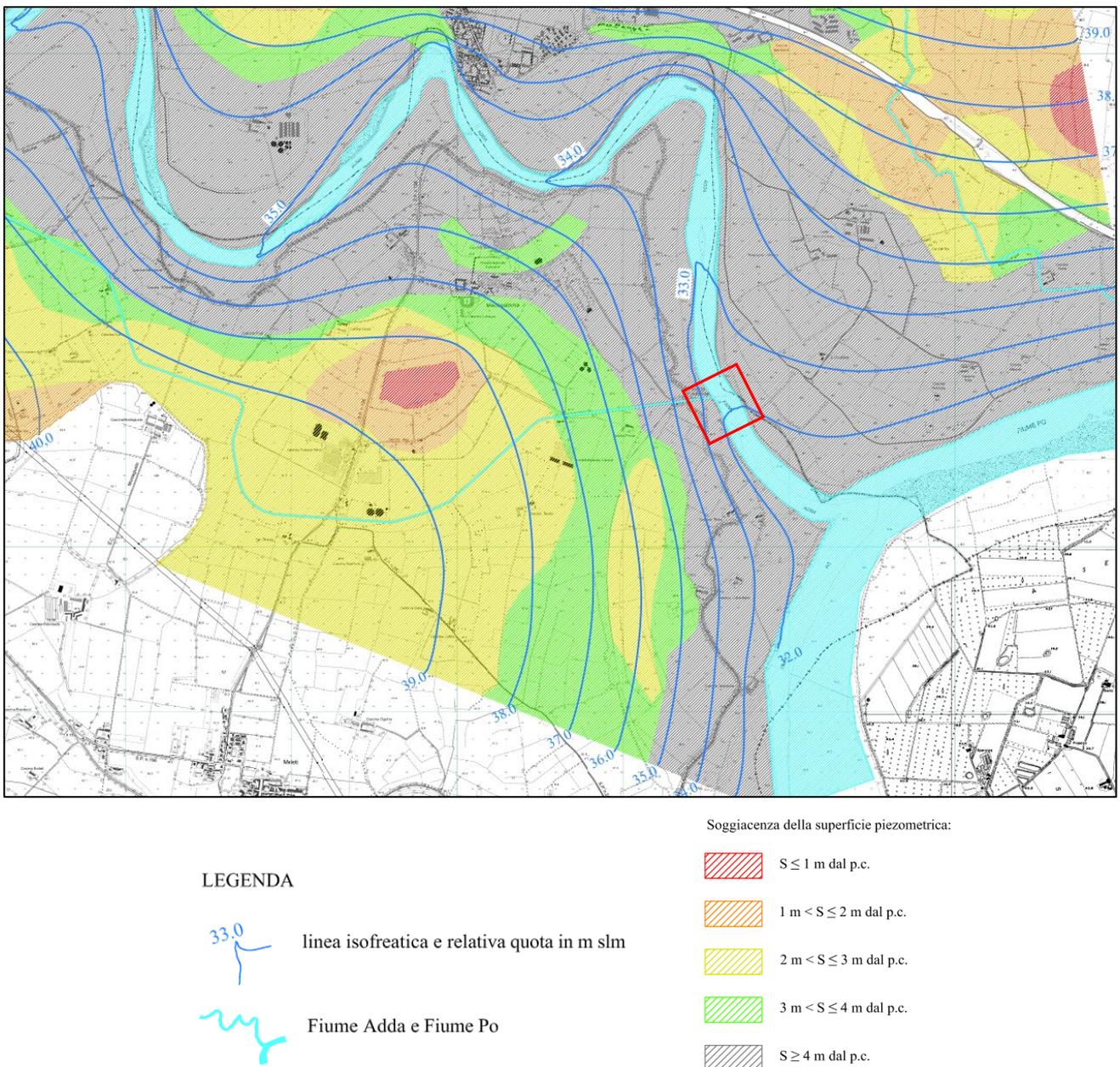


Figura 17 - Carta Idrogeologica studio 2015 (Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura Università degli Studi di Pavia, Università degli Studi di Milano, Studio Frosio, Geolambda)

Per gli approfondimenti relativi agli aspetti emersi si rimanda allo studio specifico redatto nel 2015.

## 2.4 - Componente sismica

### Classificazione

Con la D.G.R. 11 luglio 2014 - n. X/2129 "Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia", la Regione Lombardia ha proposto una nuova classificazione dei propri comuni; tuttavia, il Comune Castelnuovo Bocca d'Adda è rimasto in zona sismica 3 (Figura 18).

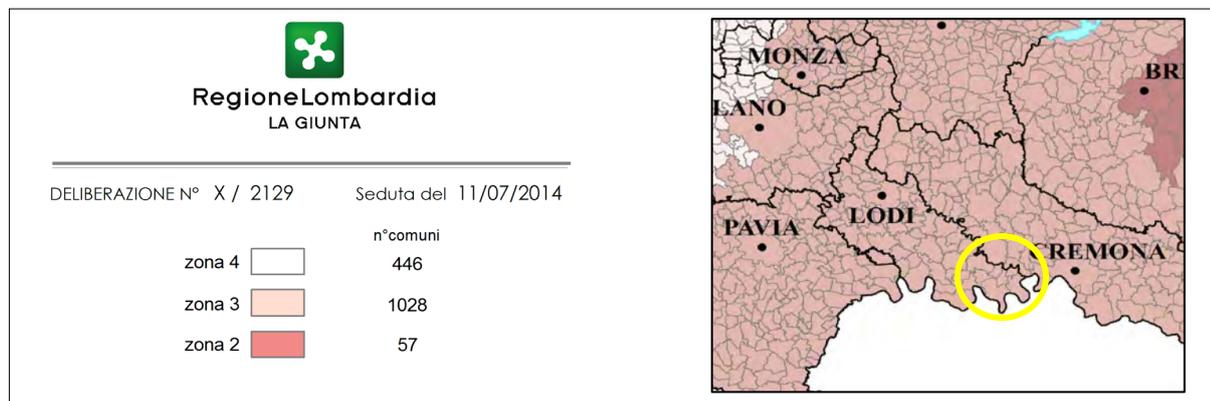


Figura 18 - classificazione sismica del territorio

### Pericolosità sismica di base del territorio comunale

Con l'emanazione del DM 14-01-2008 sono state approvate le "Norme tecniche per le costruzioni" (NTC) che forniscono, nella Tabella 1 dell'allegato B alle norme, i valori di accelerazione massima orizzontale attesa su suolo rigido e pianeggiante per n.9 tempi di ritorno diversi e per 10.751 punti di riferimento estratti della griglia di analisi utilizzata per la redazione della mappa di pericolosità (Allegato 1b all'OPCM n. 3519 del 28 aprile 2006). A ciascun punto della griglia di riferimento sono assegnati i valori dei parametri necessari per la definizione dell'azione sismica da utilizzare come riferimento nelle analisi progettuali.

La pericolosità sismica di base del sito, che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche, dev'essere definita secondo i principi contenuti nell'ALLEGATO A "Pericolosità Sismica" alle NTC 2008. Secondo questi principi l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di categoria A.

Il database dell'INGV consente di eseguire un'analisi probabilistica di pericolosità sismica secondo una griglia regolare di nodi al fine di ricavare le curve di pericolosità per le accelerazioni spettrali elastiche. La pericolosità del sito è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa su suolo A. Per accelerazione massima attesa si intende il picco del segnale che ha una probabilità del 10% di essere superata in un periodo di 50 anni. La figura sottostante mostra che il valore massimo dell'accelerazione orizzontale attesa è compreso tra 0,075-0,100 g.

Il sito-web dell'INGV consente di effettuare una disaggregazione della pericolosità sismica, operazione che consente di valutare i contributi di diverse sorgenti sismiche alla pericolosità di un sito (Figura 19).

La forma più comune di disaggregazione è quella bidimensionale in magnitudo e distanza (M-D) che permette di definire il contributo di sorgenti sismogenetiche a distanza D capaci di generare terremoti di magnitudo M. Espresso in altri termini il processo di disaggregazione in M-D fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario) inteso come l'evento di magnitudo M a distanza D dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso.

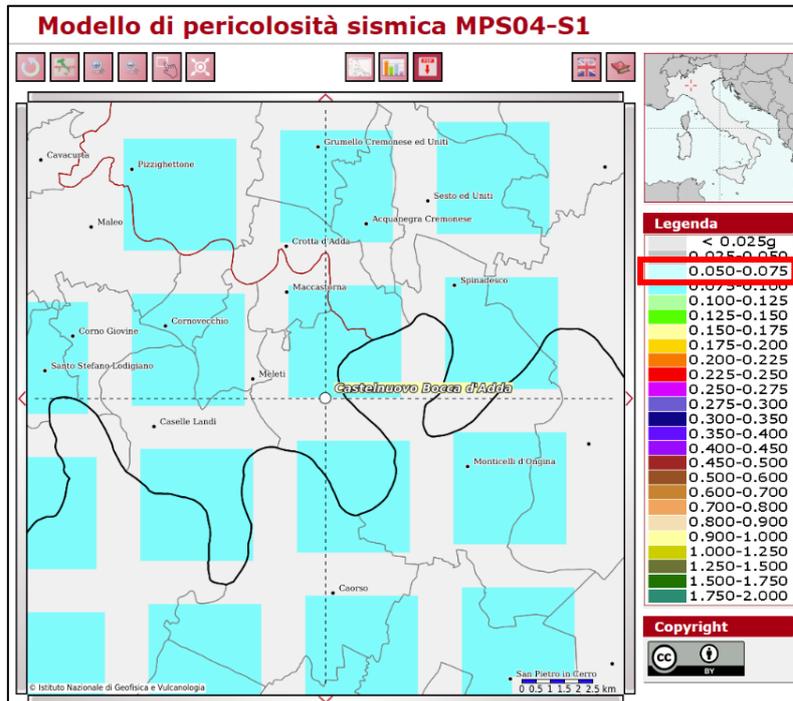


Figura 19 - mappa della pericolosità sismica dell'area (INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia)

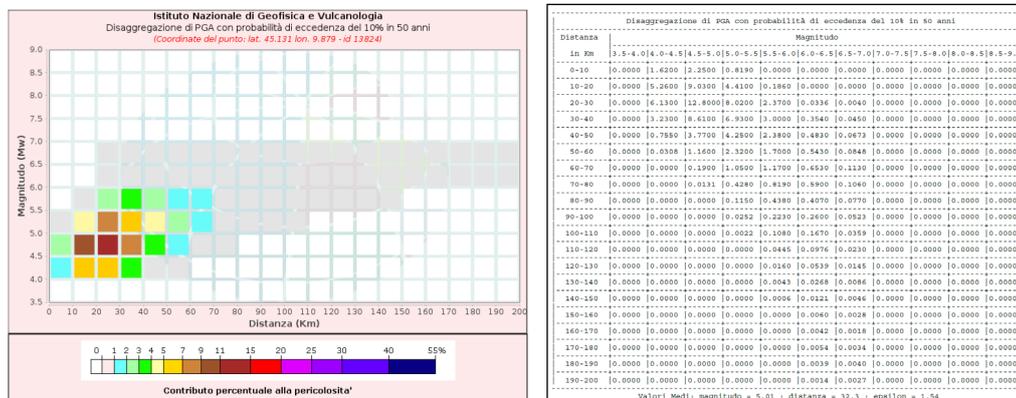
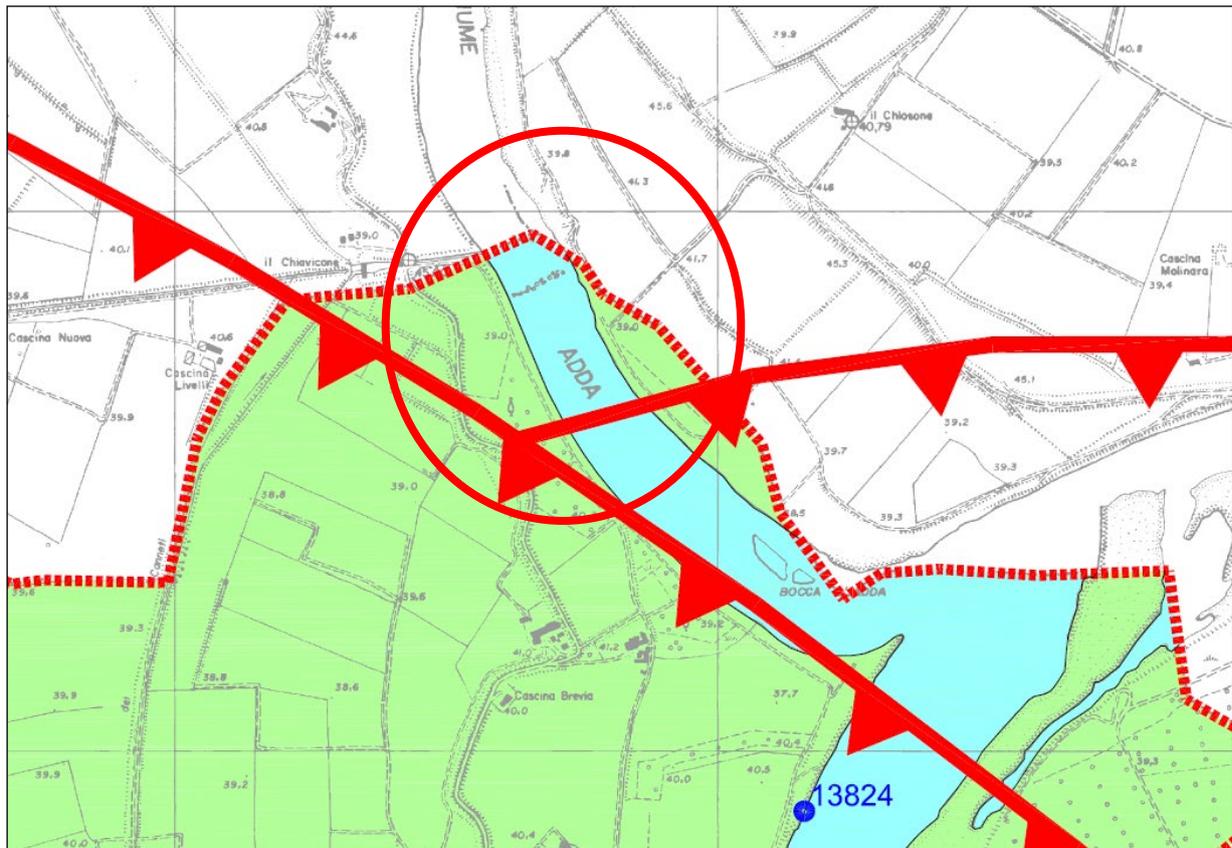


Figura 20 - grafici di disaggregazione (elaborazione INGV - Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia)

Nel caso in esame il valore di magnitudo è risultato di 5.01, con una distanza epicentrale di 32,3 km (Figura 20).

Lo studio geologico del PGT tiene conto della componente sismica ai sensi dei "Criteri attuativi per lo studio della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio in attuazione dell'art. 57 della L.R. 11 marzo 2005 n. 12" (DGR 22/12/2005 n. 8/1566): l'analisi è stata condotta secondo la metodologia riportata nell'allegato 5 ai suddetti criteri "Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei Piani di Governo del Territorio". La Figura 21, tratta dalla "Carta della Pericolosità Sismica Locale - Il livello" dello Studio Geologico del PGT, riassume i risultati dell'analisi di I e II livello.



Z2	Depositi prevalentemente limo sabbiosi e sabbiosi (Pleistocene superiore); copertura fine prevalentemente limosa con falda superficiale	Effetti attesi: Amplificazioni per caratteristiche litologiche e possibili cedimenti
Z2	Depositi prevalentemente limo sabbiosi e sabbiosi (olocene); copertura fine prevalentemente limosa con falda alla profondità di oltre 8 metri	
▼	Proiezione sulla superficie topografica dei sovrascorrimenti sepolti attivi (il triangolo indica il blocco sovrascorso)	Effetti attesi: Amplificazioni per caratteristiche litologiche ed eventuali cedimenti differenziali

Figura 21 - carta "Pericolosità sismica" del PGT

Nello studio sismico di primo livello, l'area in esame è classificata come Z2, con amplificazioni per caratteristiche litologiche ed eventuali cedimenti differenziali.

Ai fini della definizione della categoria di sottosuolo si riporta quanto ricavato dalla *Relazione geologica, geotecnica e sismica* (dott. geol. Marco Daguati) del maggio 2020, fornita dalla committenza. È utile sottolineare che nel seguente estratto i riferimenti alle figure e le figure stesse, ovviamente, seguono la numerazione del documento originario.

[...]

La valutazione della risposta sismica locale (RSL o effetto di sito) rappresenta l'analisi sismica più dettagliata in grado di determinare l'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, relativo ad una formazione di base (bedrock sismico), subisce attraversando gli strati di terreno sovrastanti fino alla superficie (o ad una quota definita).

Le simulazioni numeriche sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo *SHAKE91* (Schnabel et al. 1972; Idriss e Sun, 1992), che definisce un modello monodimensionale

adottando un comportamento del mezzo di tipo “lineare equivalente” (schematizzazione compatibile con i livelli di deformazione/accelerazione attesi per l’area in esame - valore di PGA atteso pari a 0.081g per  $T_R=475$  anni e pari a 0.101g per  $T_R=975$  anni).

Per l’esecuzione dell’analisi numerica s’è proceduto attraverso le seguenti fasi di lavoro

1. **Definizione delle caratteristiche geologiche:** è stata ricostruita la successione stratigrafica propria dell’area utilizzando i dati delle indagini geognostiche effettuate per il progetto (sondaggi a carotaggio continuo e prove penetrometriche statiche);
2. **Definizione dei parametri fisico-meccanici:** i parametri necessari nell’analisi numerica sono, per ogni strato in cui è suddiviso il profilo stratigrafico, il peso di volume, la velocità delle onde S e l’andamento del modulo di taglio e del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione; i valori delle  $V_s$  sono quelli ricavati dalle prove MASW effettuate mentre le curve  $G-\gamma$  e  $D-\gamma$  sono quelle mediamente rappresentative di ciascuna litologia di riferimento (Seed et al., 1986; Vucetic e Dobry, 1991) e fornite dalla Regione Lombardia;
3. **Definizione del moto di input:** le azioni sismiche di ingresso sono rappresentate da una combinazione di accelerogrammi reali scalati il cui spettro di risposta combinato è compatibile con lo spettro di risposta del moto atteso per un periodo di ritorno di 1898 e 2475 anni (tabella 5, Spettro Target - suolo A; v. Figura 3 e 4); tali accelerogrammi sono stati selezionati utilizzando il software REXEL. La selezione degli accelerogrammi è stata effettuata utilizzando il database internazionale *European Strong-motion Database* (ESD), basandosi sugli studi di disaggregazione dell’INGV per la definizione della coppia M-R di ricerca degli accelerogrammi (v. Figura 5).

Gli accelerogrammi di input vengono fatti propagare a partire dal bedrock sismico (strato con  $V_s > 800$  m/s) fino alla quota di imposta fondazionale supposta a 31 m s.l.m. (la quota di esecuzione delle prove geofisiche è pari a circa 39 m s.l.m.).

Non essendo stato rilevato direttamente, la profondità del bedrock sismico è stata ipotizzata assegnando un gradiente delle velocità delle onde S con la profondità di tipo logaritmico, desunto dai dati misurati nelle prove MASW.

Poiché i profili  $V_s$ -profondità ricostruiti (quello in sponda destra e quello in sponda sinistra) presentano a partire da circa 8 m di profondità (quota di imposta fondazionale assunta), andamenti simili, nelle simulazioni numeriche si è deciso di adottare un unico modello sismico monodimensionale di riferimento ottenuto come media dei due profili.

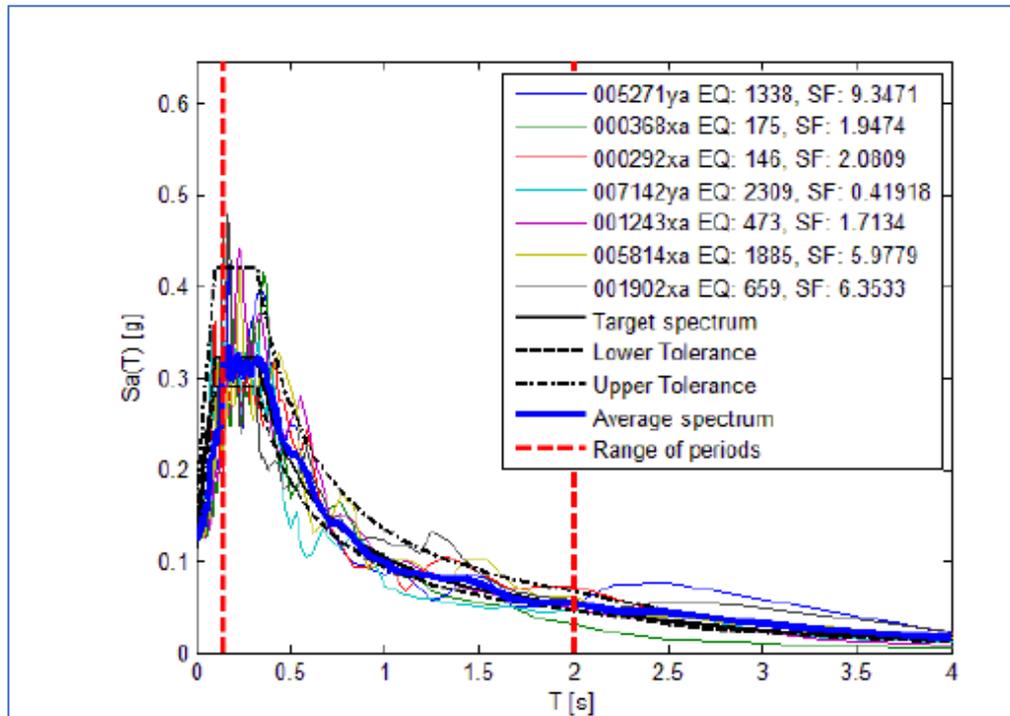


Figura 3 - Spettro target e spettri degli accelerogrammi selezionati -  $T_R=1898$  anni.

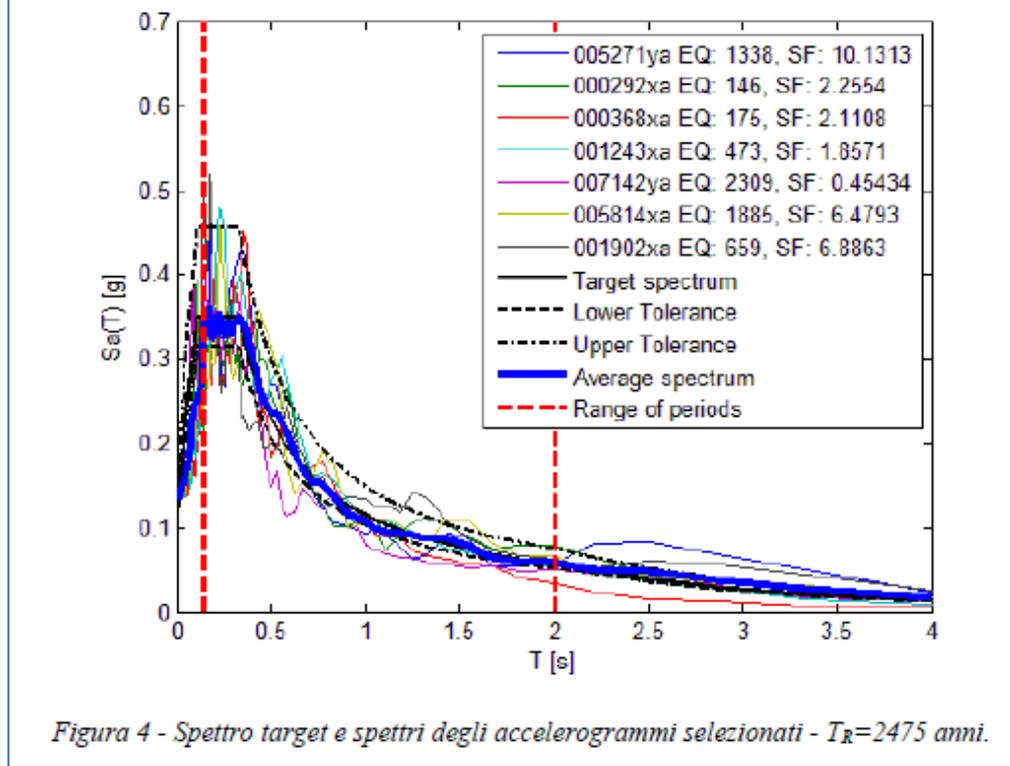


Figura 4 - Spettro target e spettri degli accelerogrammi selezionati -  $T_R=2475$  anni.

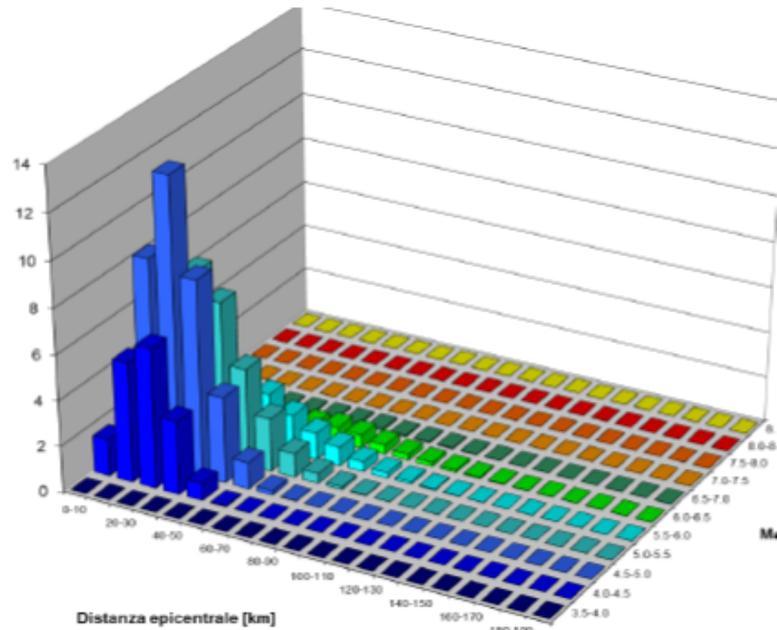


Figura 5 - Analisi della disaggregazione per l'area in esame - INGV

In Figura 6 e Figura 7 si riportano i risultati delle simulazioni numeriche effettuate in termini di spettro di risposta in accelerazione (valori espressi come frazione di  $g$ ; con la linea tratteggiata nera si riporta la media degli spettri ottenuti utilizzando gli accelerogrammi di input).

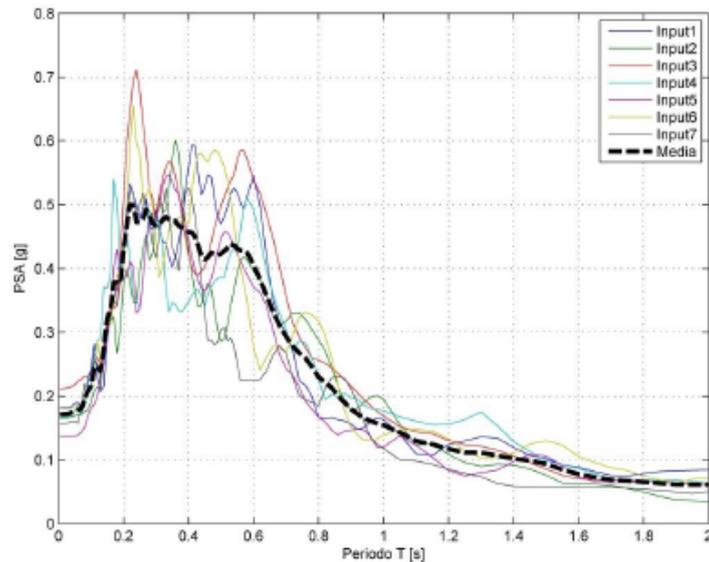


Figura 6 - Spettri di risposta ottenuti dalle simulazioni numeriche --  $T_R=1898$  anni

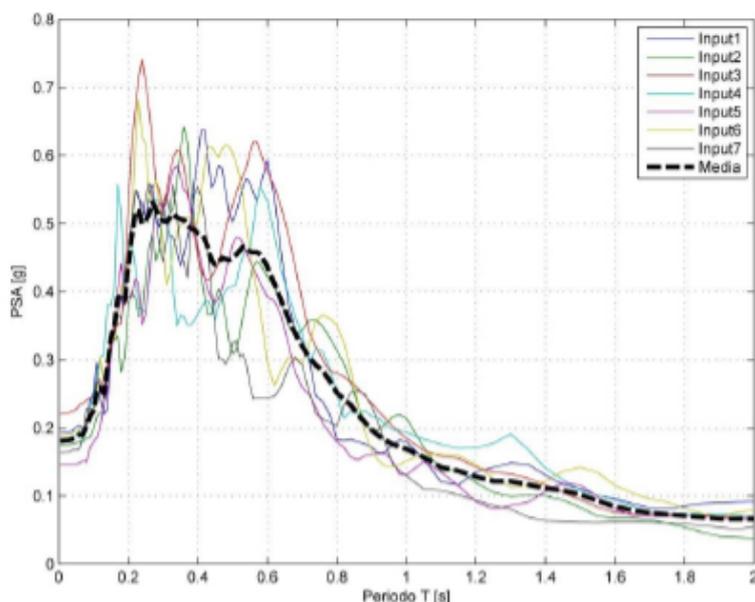


Figura 7 - Spettri di risposta ottenuti dalle simulazioni numeriche --  $T_R=2475$  anni

Nella seguente tabella si riportano i valori di  $a_{max}$  (da utilizzare nelle verifiche del potenziale di liquefazione e nelle analisi di stabilità) ottenuti dallo studio della RSL:

ID	$a_{max}$ [g]
SLV ( $P_{VR}=10\%$ )	0,171
SLC ( $P_{VR}=5\%$ )	0,181

Tabella 6 – Valori di  $a_{max}$  ottenuti dallo studio di RSL.

#### 4.2 DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA SECONDO LA NORMATIVA

Nel presente capitolo gli spettri di risposta previsti dalla normativa antisismica vengono confrontati con quelli ottenuti dallo studio di risposta sismica locale riportato nel capitolo precedente; tale confronto consente di verificare se l'approccio semplificato previsto dalla normativa è adeguato nel considerare gli effetti di amplificazione sismica propri del sito. La quantificazione della risposta sismica locale mediante l'utilizzo di categorie di sottosuolo nella valutazione dell'amplificazione stratigrafica, infatti, comporta una semplificazione del problema senza cogliere le specificità proprie del sito nella modificazione del moto sismico atteso, rischiando di sottostimare (o sovrastimare) i livelli di accelerazione attesi.

Nel calcolo dell'azione sismica si è fatto riferimento a quanto contenuto nel D.M. 17/01/2018, in particolare ai capitoli 2 e 3.

Le ipotesi assunte nella definizione degli spettri di risposta elastici in accelerazione risultano:

- Valori di accelerazione massima orizzontale e dei parametri spettrali per i diversi stati limite (valori interpolati ottenuti dalla media pesata con i 4 punti della griglia di accelerazioni che comprendono il sito in esame [ED50 – Lat=45.140704; Long=9.874138])

	P <sub>VR</sub>	T <sub>R</sub>	a <sub>g</sub>	F <sub>0</sub>	T <sub>C</sub> *
		[anni]	[g/10]		[s]
<b>SLO</b>	81%	120	0,518	2,579	0,2647
<b>SLD</b>	63%	201	0,609	2,600	0,2800
<b>SLV</b>	10%	1898	1,233	2,595	0,3226
<b>SLC</b>	5%	2475	1,337	2,595	0,3277

- **Categoria di sottosuolo** = C ( $V_{s,30} = 314,8$  (M1) – 298,6 m/s (M2) a partire da -8,0 m da p.c. attuale) e **categoria topografica** = T1 e coefficiente di smorzamento viscoso  $\zeta = 5\%$  a cui corrispondono i seguenti valori:

	S <sub>s</sub>	C <sub>c</sub>	S	T <sub>B</sub>	T <sub>C</sub>	T <sub>D</sub>
				[s]	[s]	[s]
<b>SLO</b>	1,50	1,63	1,50	0,14	0,43	1,81
<b>SLD</b>	1,50	1,60	1,50	0,15	0,45	1,84
<b>SLV</b>	1,50	1,53	1,50	0,16	0,49	2,09
<b>SLC</b>	1,49	1,52	1,49	0,17	0,50	2,13

In figura 8 e 9 si confronta lo spettro di risposta elastico previsto dalla normativa per lo stato limite di salvaguardia della vita SLV e per lo stato limite di collasso SLC (formule riportate nel paragrafo 3.2.3.2.1) e quello ottenuto dalle simulazioni numeriche effettuate (PSAmedia\_RSL\_SLV e PSAmedia\_RSL\_SLC).

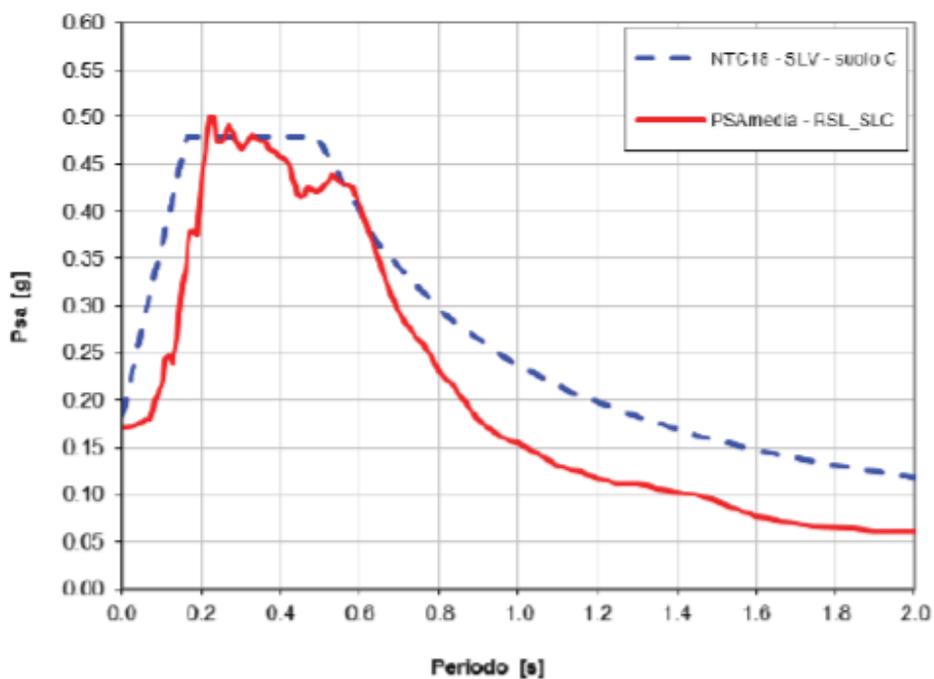


Figura 8 - Confronto tra lo spettro di risposta previsto dalle NTC18 (SLV e sottosuolo C - curva blu) e lo spettro medio ottenuto dalle simulazioni numeriche (curva rossa)

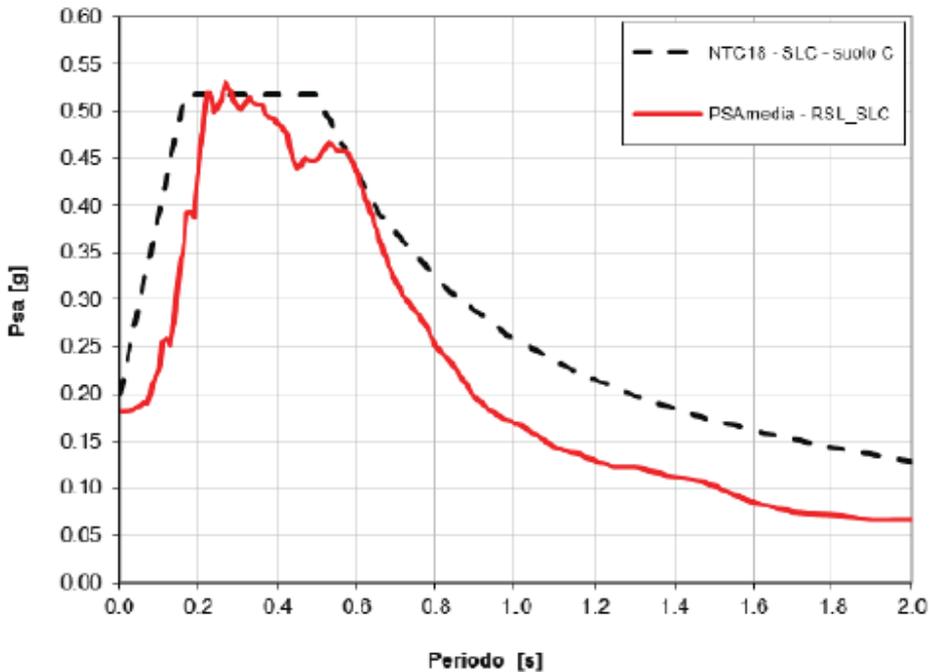


Figura 9 - Confronto tra lo spettro di risposta previsto dalle NTC18 (SLC sottosuolo C - curva nera) e lo spettro medio ottenuto dalle simulazioni numeriche (curva rossa)

#### 4.2.1 Risultati e considerazioni

Sulla base dello studio di risposta sismica locale effettuato confrontato con l'approccio semplificato previsto dalle NTC18 (Cap. 3.2.2 *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*) risulta che è possibile utilizzare lo spettro di risposta elastico previsto dalle NTC18 utilizzando una categoria di sottosuolo di tipo C (figura 8 e 9) in quanto tale spettro risulta mediamente sufficiente a tenere in considerazione gli effetti di amplificazione sismica propri del sito (studio RSL), ad eccezione per periodi delle strutture compresi tra 0,2 e 0,3 s.

#### 4.3 ANALISI DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE

La liquefazione di un deposito è dunque il risultato dell'effetto combinato di due principali categorie di fattori: le condizioni del terreno (fattore predisponente) e la sismicità (fattore scatenante). Ai sensi delle NTC18 (Cap. 7.11.3.4.2) la verifica delle liquefazione può essere omessa qualora si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizione di campo libero)  $< 0,10g$ ;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{cin} > 180$ ;

Non essendo soddisfatte le condizioni di esclusione previste dalle NTC18, si è proceduto a valutare il potenziale di liquefazione dei terreni che costituiscono l'area in esame. Di seguito si riassumono i parametri di input utilizzati nel calcolo del potenziale di liquefazione:

- ✓ Accelerazione massima orizzontale  $a_{max} = 0,171g$  ( $a_{max} = a_g \cdot S$  – categoria sottosuolo di tipo C e condizione SLV);
- ✓ Magnitudo di riferimento  $M_w = 6,14$  (zona sismogenetica più vicina è la 911 denominata "Tortona-Bobbio");
- ✓ CRR calcolato utilizzando l'analisi semplificata basata sulle correlazioni proposte da Robertson e Wride (1998) fondate sulla resistenza penetrometrica misurata nelle prove CPT eseguite presso l'area in esame; in figura 10 sono riportati i valori di CRR relativamente ai soli livelli granulari (CRR\_x\_gran) caratterizzati da un valore del fattore IC  $< 2,6$  (terreni liquefacibili);
- ✓ CSR calcolato dalla formula  $CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0,65(a_{max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) \cdot r_d$  (NCEER 1998);
- ✓ Falda di calcolo = 6,0 m di profondità da piano campagna.

La liquefazione di un terreno avviene quanto  $CSR \geq CRR$ . I risultati sono diagrammati in figura 10 da cui emerge l'assenza di rischio in relazione a potenziali fenomeni di liquefazione per i terreni di fondazione investigati.

### 4.3.1 Risultati

I risultati dell'analisi del potenziale di liquefazione sono diagrammati in Figura 10, da cui emerge l'assenza di rischio in relazione a potenziali fenomeni di liquefazione per i terreni che costituiscono il sottosuolo dell'area in esame.

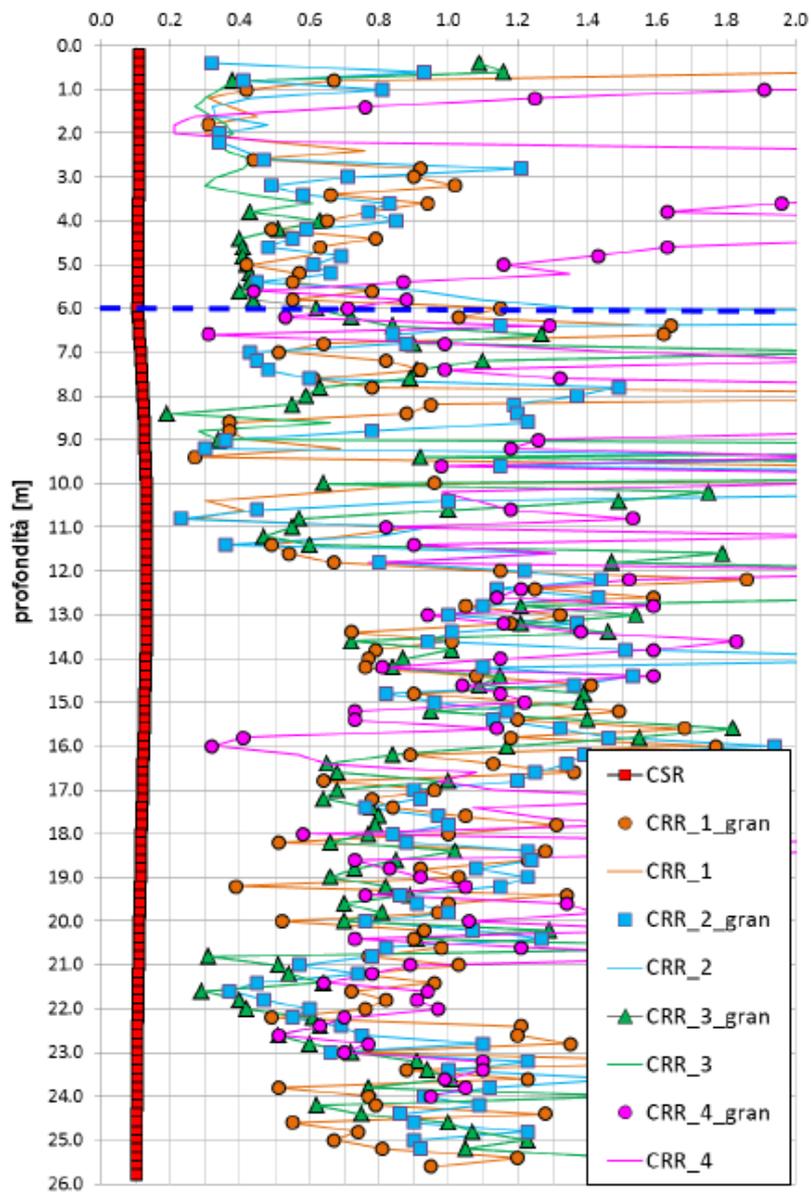


Figura 10 - Analisi del potenziale di liquefazione dei terreni di fondazione

[...]

Come mostrato in Figura 22 (tratta dalla "Carta della fattibilità per le azioni di piano" dello Studio Geologico Comunale) l'area interessata dal progetto ricade nella Classe 4 di fattibilità geologica, per la quale sono previste limitazioni alla modifica delle destinazioni d'uso dei terreni.

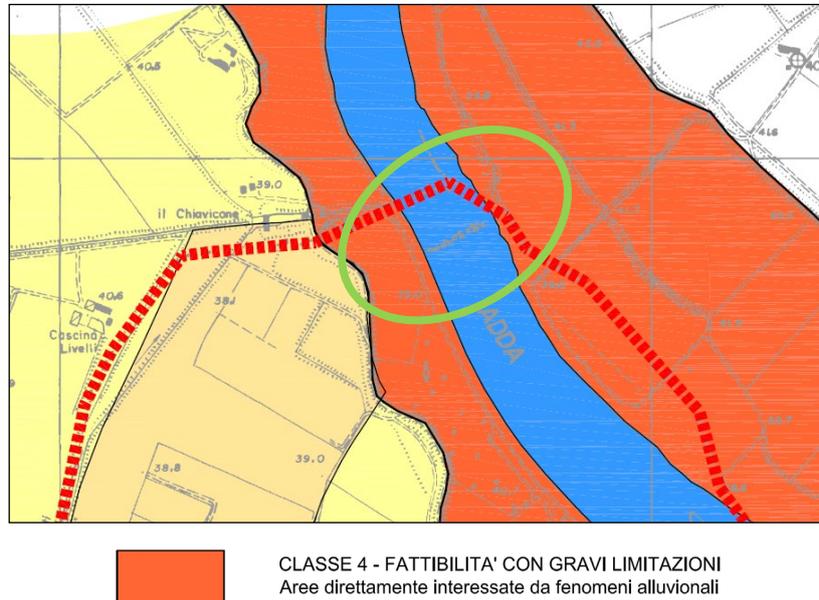


Figura 22 - carta della fattibilità per le azioni di piano

[...]

#### CLASSE 4: Fattibilità con gravi limitazioni

In tale classe rientrano le aree comprese nell'alveo di piena ordinaria del Po e del Fiume Adda ed interne al limite della fascia A del P.A.I.

L'alta pericolosità/vulnerabilità di tali aree comporta gravi limitazioni per la modifica delle loro destinazioni d'uso.

Deve essere esclusa qualsiasi nuova edificazione, se non di opere tese al consolidamento o alla sistemazione idrogeologica per la messa in sicurezza dei siti.

Per gli edifici esistenti saranno consentiti esclusivamente le opere relative ad interventi di demolizione senza ricostruzione, manutenzione ordinaria e straordinaria, restauro, risanamento conservativo, come definiti dall'art. 31, lettere a), b), e) della L.457/1978.

Dovranno essere predisposti idonei piani di protezione civile ed inoltre dovrà essere valutata la necessità di predisporre sistemi di monitoraggio che permettano di tenere sotto controllo l'evoluzione dei fenomeni in atto.

Eventuali infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico potranno essere realizzate solo se non altrimenti localizzabili e dovranno comunque essere puntualmente valutate in funzione della tipologia di dissesto e del grado di rischio che determinano l'ambito di pericolosità/vulnerabilità omogenea.

A tal fine, alle istanze per l'approvazione da parte dell'autorità comunale, dovrà essere allegata apposita relazione geologica e geotecnica che dimostri la compatibilità degli interventi previsti con la situazione di grave rischio idrogeologico.

[...]

## 3 - MODELLO GEOTECNICO

L'area in esame è caratterizzata dalla presenza di depositi alluvionali prevalentemente sabbiosi, con subordinata presenza di limo e ghiaia. È presente un livello superficiale più fine, prevalentemente limoso-sabbioso, di spessore non superiore a 2,50 m, che comprende lo strato superficiale di coltivo.

### 3.1 - Componente sismica

La pericolosità sismica di base del sito (che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche) è stata dettagliata secondo i principi contenuti nell'allegato A "Pericolosità Sismica" delle NTC; secondo questi principi l'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale di categoria A.

Si è fatto riferimento alle tabelle riportate nell'allegato B delle NTC: "parametri che definiscono l'azione sismica" in funzione della latitudine e longitudine del sito di progetto. L'azione sismica di base così individuata è stata successivamente variata per definire la risposta sismica locale nei modi precisati dalle NTC, tenendo conto delle condizioni locali stratigrafiche del sito di costruzione e dalla morfologia della superficie.

La categoria topografica è T1 trattandosi di superficie piana con inclinazione media  $i < 15^\circ$  (D.M. 17/01/18).

Come indicato nei paragrafi precedenti, la categoria di sottosuolo da considerare ai fini progettuali è la "C".

Sono stati considerati i seguenti altri dati di ingresso (Figura 24):

- vita nominale  $V_N$  (Tab.2.4.I delle NTC) della struttura: 50 anni
- classe d'uso della struttura: **IV**, funzioni pubbliche o strategiche importanti
- coefficiente d'uso,  $C_U$  (Tab. 2.4.II delle NTC): 1,0
- periodo di riferimento,  $V_R$  ( $V_R = V_N \cdot C_U$ ): 50 anni

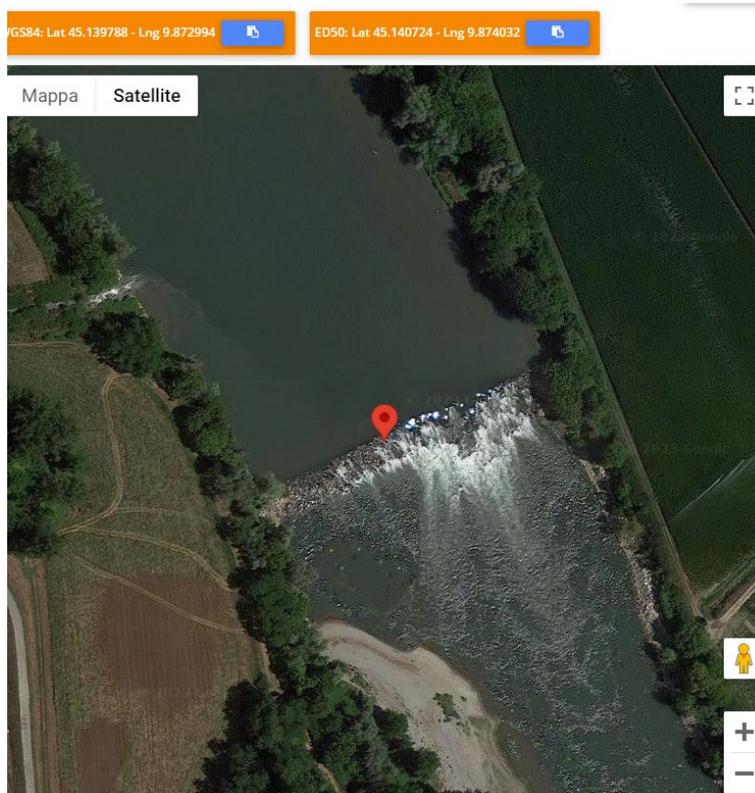


Figura 23 - localizzazione dell'area di progetto sul sito dell'INGV per il calcolo .....

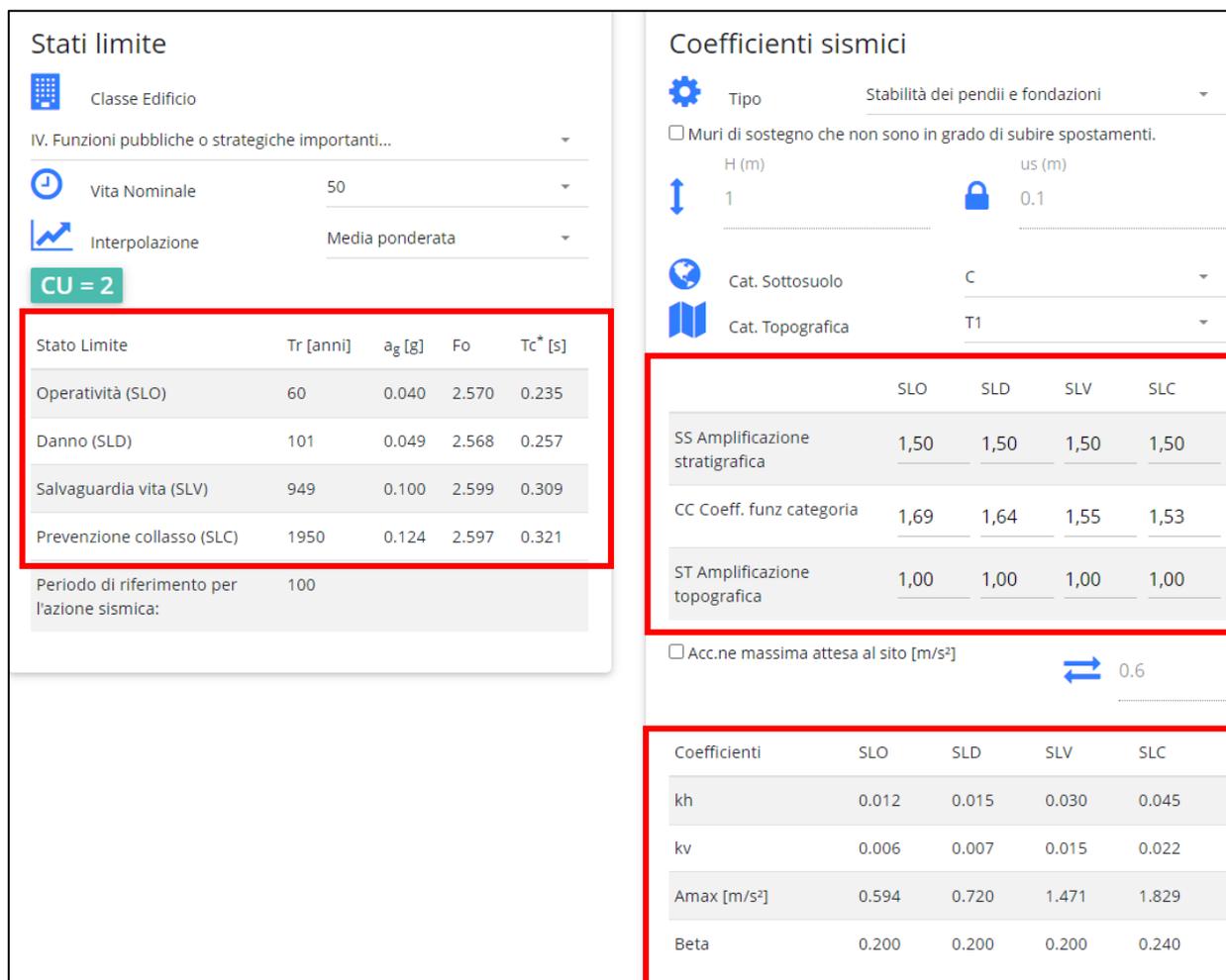


Figura 24 - parametri dell'azione sismica

Tra i parametri ottenuti (Figura 24) si sottolineano i seguenti:

- accelerazione orizzontale massima attesa sul bedrock (SLV):  $a_g = 0.100 \text{ g}$
- accelerazione orizzontale massima attesa nel sito (SLV):  $A_{max} = a_g \cdot S_s \cdot S_t = 0,100 \text{ g} \cdot 1,50 \cdot 1,0 = 1,50 \text{ m/s}^2$

## 3.2 - indagini eseguite

Per il modello geotecnico generale si fa riferimento a dati forniti dal committente (sondaggi e prove penetrometriche statiche).

Le prove penetrometriche statiche CPT sono state eseguite nei punti indicati in Figura 25.

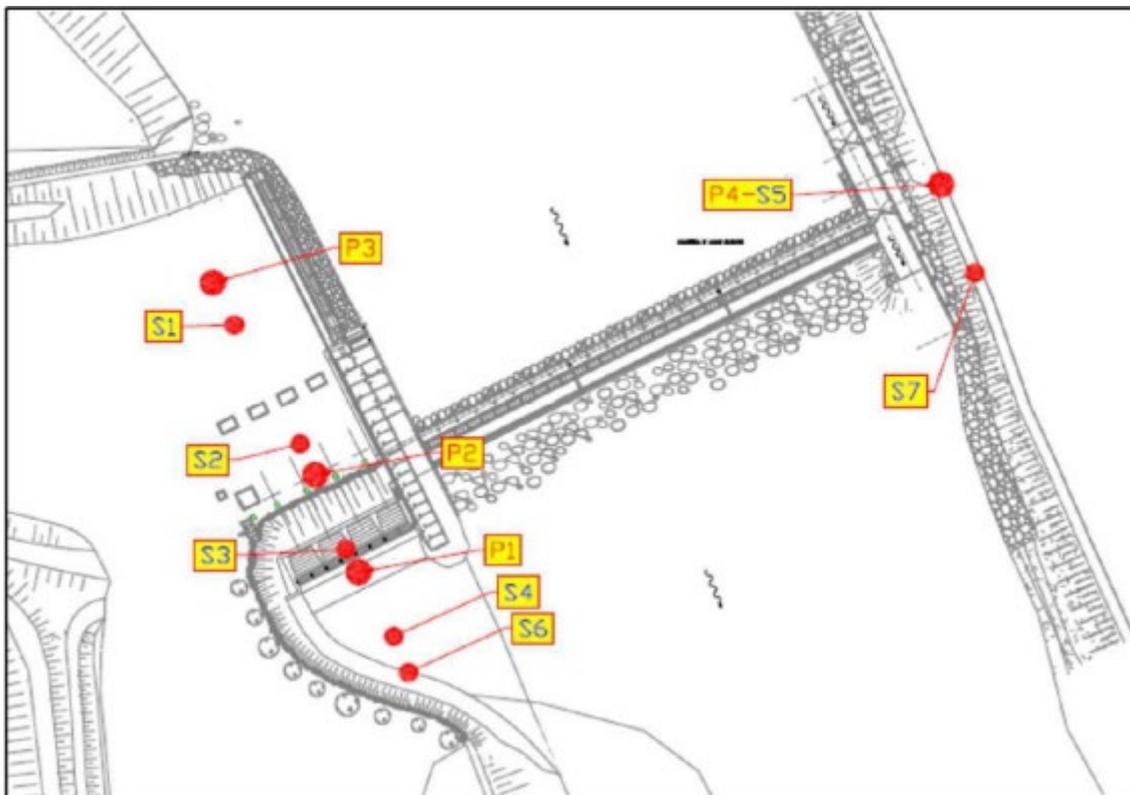


Figura 25 - ubicazione prove penetrometriche (P) e sondaggi (S)

La prova penetrometrica statica consiste nell'infingere a pressione nel terreno la punta conica strumentata elettricamente, misurando sia lo sforzo  $R_p$  necessario per la penetrazione della punta sia l'adesione  $R_l$  terreno-acciaio del manicotto posto al di sopra di essa. La resistenza del terreno è direttamente proporzionale a  $R_p$ .

Le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata sono le seguenti:

- tipo di penetrometro: PAGANI TG 63-200kN
- tipo di punta: meccanica
- velocità di penetrazione:  $20 \pm 5$  mm/sec
- lunghezza delle aste: 1.2 m
- diametro della punta: 35.7 mm
- area della punta:  $1.000 \text{ mm}^2$
- angolo di apertura della punta:  $60^\circ$
- diametro del manicotto: 35.7 mm
- area del manicotto:  $1.5 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$

L'interpretazione delle prove eseguite è consistita nelle seguenti attività:

- discretizzazione del terreno indagato in livelli con valori di  $R_p$  e  $R_l$  relativamente costanti per tutto lo spessore dello strato,
- stima della litologia del livello attraverso il metodo di Schmertmann,
- stima dei parametri geotecnici del terreno.

Il metodo di Schmertmann considera indicativo della litologia lungo la verticale indagata il rapporto delle resistenze  $Fr$  (con  $Fr\%=100 R_l/R_p$ ), secondo il grafico di Figura 26.

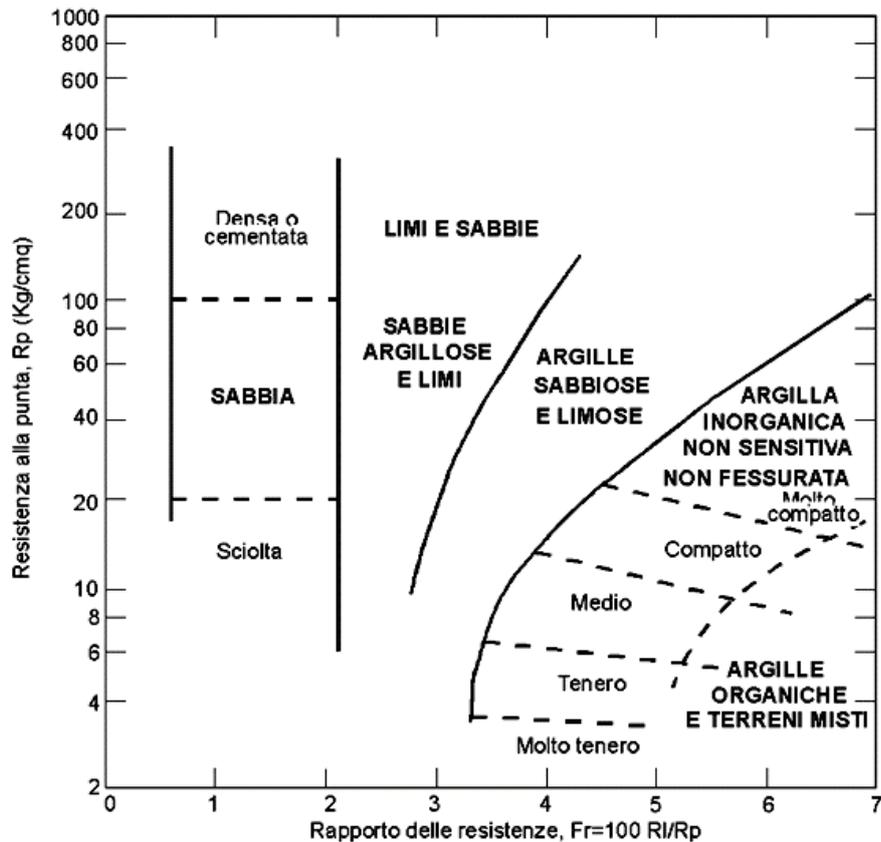


Figura 26 - Carta di interpretazione di Schmertmann (1978)

Si riportano qui di seguito i valori tabulati ed i grafici (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34) delle prove eseguite.

# Studio Tresis

Agostino Pasquali Coluzzi geologo, Marco Venturini geologo, Mauro Valcarenghi geologo

SPONDA DESTRA									SPONDA SINISTRA		
Prova n. 1			Prova n. 2			Prova n. 3			Prova n. 4		
Prof.	Rp	Rp + Rl	Prof.	Rp	Rp + Rl	Prof.	Rp	Rp + Rl	Prof.	Rp	Rp+Rl
m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	m	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0,2	1	2	0,2	1	2	0,2	1	2	0,2	1	2
0,4	22	30	0,4	12	20	0,4	17	20	0,4	133	165
0,6	27	47	0,6	19	27	0,6	19	31	0,6	162	186
0,8	21	44	0,8	22	35	0,8	15	30	0,8	57	132
1,0	18	36	1,0	23	31	1,0	13	24	1,0	44	93
1,2	13	26	1,2	15	30	1,2	11	21	1,2	32	61
1,4	13	26	1,4	16	29	1,4	12	24	1,4	27	50
1,6	14	29	1,6	15	29	1,6	13	24	1,6	12	35
1,8	21	39	1,8	18	32	1,8	7	20	1,8	13	24
2,0	18	26	2,0	20	40	2,0	16	30	2,0	11	19
2,2	20	33	2,2	25	37	2,2	13	29	2,2	20	27
2,4	13	33	2,4	22	32	2,4	12	25	2,4	52	74
2,6	38	65	2,6	28	46	2,6	15	29	2,6	52	101
2,8	43	58	2,8	54	69	2,8	14	31	2,8	100	159
3,0	92	120	3,0	55	90	3,0	15	31	3,0	81	146
3,2	69	96	3,2	37	62	3,2	16	29	3,2	84	147
3,4	56	90	3,4	46	64	3,4	18	30	3,4	75	129
3,6	42	67	3,6	45	67	3,6	18	35	3,6	68	128
3,8	68	99	3,8	51	80	3,8	47	70	3,8	88	142
4,0	70	100	4,0	55	84	4,0	94	112	4,0	109	160
4,2	48	75	4,2	55	87	4,2	85	108	4,2	78	151
4,4	72	93	4,4	55	80	4,4	57	77	4,4	64	137
4,6	65	98	4,6	62	86	4,6	56	74	4,6	91	158
4,8	40	68	4,8	57	79	4,8	52	71	4,8	114	170
5,0	58	84	5,0	58	88	5,0	51	70	5,0	63	115
5,2	51	71	5,2	58	86	5,2	63	83	5,2	49	93
5,4	53	79	5,4	54	84	5,4	55	76	5,4	98	145
5,6	68	94	5,6	43	65	5,6	56	77	5,6	76	115
5,8	75	111	5,8	56	91	5,8	42	62	5,8	99	121
6,0	70	98	6,0	60	102	6,0	49	70	6,0	75	116
6,2	95	143	6,2	75	124	6,2	74	103	6,2	86	121
6,4	199	247	6,4	182	287	6,4	122	158	6,4	72	100
6,6	134	181	6,6	99	132	6,6	159	199	6,6	53	107
6,8	60	128	6,8	81	124	6,8	162	213	6,8	84	101
7,0	83	117	7,0	85	130	7,0	246	279	7,0	53	102
7,2	108	138	7,2	72	97	7,2	182	238	7,2	52	106
7,4	104	149	7,4	63	90	7,4	168	207	7,4	87	155
7,6	84	134	7,6	65	94	7,6	160	196	7,6	103	155
7,8	182	219	7,8	86	121	7,8	111	151	7,8	182	247

# Studio Tresis

Agostino Pasquali Coluzzi geologo, Marco Venturini geologo, Mauro Valcarenghi geologo

8,0	277	301	8,0	144	213	8,0	135	173	8,0	255	363
8,2	149	235	8,2	173	242	8,2	90	121	8,2	214	304
8,4	108	159	8,4	132	189	8,4	60	96	8,4	209	325
8,6	96	149	8,6	112	178	8,6	32	40	8,6	141	236
8,8	90	114	8,8	135	203	8,8	26	55	8,8	136	245
9,0	40	65	9,0	90	138	9,0	55	67	9,0	142	245
9,2	39	60	9,2	64	89	9,2	68	91	9,2	101	172
9,4	90	122	9,4	75	96	9,4	199	325	9,4	75	143
9,6	297	313	9,6	152	235	9,6	372	411	9,6	148	227
9,8	370	427	9,8	287	356	9,8	396	467	9,8	95	156
10,0	205	296	10,0	312	426	10,0	131	191	10,0	62	158
10,2	38	82	10,2	228	337	10,2	296	341	10,2	68	143
10,4	16	47	10,4	162	284	10,4	267	310	10,4	70	119
10,6	26	38	10,6	95	159	10,6	206	255	10,6	91	144
10,8	23	42	10,8	58	94	10,8	153	204	10,8	123	195
11,0	15	26	11,0	24	40	11,0	122	160	11,0	130	220
11,2	35	78	11,2	46	87	11,2	103	146	11,2	78	138
11,4	146	179	11,4	59	98	11,4	189	228	11,4	123	210
11,6	150	185	11,6	72	100	11,6	271	300	11,6	72	138
11,8	161	200	11,8	135	197	11,8	287	365	11,8	64	126
12,0	213	262	12,0	182	244	12,0	378	429	12,0	52	94
12,2	294	363	12,2	200	282	12,2	374	428	12,2	194	287
12,4	250	325	12,4	205	296	12,4	399	436	12,4	186	282
12,6	298	360	12,6	227	301	12,6	274	383	12,6	155	238
12,8	177	237	12,8	189	275	12,8	229	352	12,8	203	286
13,0	226	303	13,0	204	282	13,0	265	338	13,0	173	275
13,2	213	296	13,2	226	294	13,2	230	310	13,2	182	254
13,4	180	259	13,4	201	288	13,4	282	357	13,4	135	220
13,6	172	227	13,6	182	254	13,6	224	292	13,6	140	237
13,8	154	233	13,8	173	246	13,8	225	263	13,8	122	238
14,0	151	218	14,0	155	261	14,0	231	297	14,0	191	296
14,2	133	200	14,2	167	311	14,2	183	235	14,2	213	300
14,4	155	222	14,4	292	379	14,4	160	228	14,4	140	196
14,6	191	278	14,6	225	302	14,6	172	263	14,6	156	266
14,8	189	293	14,8	193	289	14,8	194	282	14,8	181	267
15,0	188	262	15,0	190	257	15,0	247	351	15,0	213	305
15,2	237	333	15,2	216	295	15,2	234	327	15,2	181	273
15,4	228	332	15,4	223	312	15,4	230	296	15,4	193	257
15,6	336	425	15,6	261	347	15,6	282	384	15,6	169	230
15,8	282	354	15,8	275	362	15,8	313	425	15,8	113	208
16,0	269	335	16,0	296	389	16,0	307	386	16,0	95	138
16,2	274	391	16,2	302	419	16,2	192	245	16,2	44	77
16,4	300	345	16,4	285	361	16,4	203	278	16,4	24	55
16,6	283	339	16,6	290	373	16,6	210	264	16,6	76	108
16,8	213	300	16,8	254	328	16,8	238	294	16,8	75	134
17,0	173	224	17,0	222	311	17,0	224	302	17,0	80	135

# Studio Tresis

Agostino Pasquali Coluzzi geologo, Marco Venturini geologo, Mauro Valcarenghi geologo

17,2	152	241	17,2	189	265	17,2	185	237	17,2	74	136
17,4	157	234	17,4	163	248	17,4	180	241	17,4	89	171
17,6	199	281	17,6	151	227	17,6	200	276	17,6	73	135
17,8	221	316	17,8	165	256	17,8	232	307	17,8	79	144
18,0	196	306	18,0	204	298	18,0	228	293	18,0	125	200
18,2	208	301	18,2	223	302	18,2	213	278	18,2	75	138
18,4	296	337	18,4	241	320	18,4	265	324	18,4	113	207
18,6	181	268	18,6	250	354	18,6	205	283	18,6	136	241
18,8	184	295	18,8	199	302	18,8	196	278	18,8	158	235
19,0	195	286	19,0	205	307	19,0	213	287	19,0	141	226
19,2	211	310	19,2	200	312	19,2	222	285	19,2	154	245
19,4	277	300	19,4	226	334	19,4	234	312	19,4	165	266
19,6	196	303	19,6	217	298	19,6	220	302	19,6	178	259
19,8	184	283	19,8	207	296	19,8	198	265	19,8	149	270
20,0	199	297	20,0	189	288	20,0	210	294	20,0	179	302
20,2	270	322	20,2	243	324	20,2	311	383	20,2	224	329
20,4	213	289	20,4	221	320	20,4	265	357	20,4	205	346
20,6	186	278	20,6	223	342	20,6	209	286	20,6	336	413
20,8	188	289	20,8	202	285	20,8	138	294	20,8	355	427
21,0	194	279	21,0	200	284	21,0	152	187	21,0	235	363
21,2	170	276	21,2	196	258	21,2	192	254	21,2	196	284
21,4	188	272	21,4	162	244	21,4	221	282	21,4	213	299
21,6	146	248	21,6	150	204	21,6	169	235	21,6	238	307
21,8	171	254	21,8	168	213	21,8	174	199	21,8	301	396
22,0	170	262	22,0	182	239	22,0	182	227	22,0	282	348
22,2	205	293	22,2	183	254	22,2	196	243	22,2	220	305
22,4	272	324	22,4	213	279	22,4	170	241	22,4	242	318
22,6	215	328	22,6	224	302	22,6	209	286	22,6	196	257
22,8	235	357	22,8	263	345	22,8	257	313	22,8	238	297
23,0	244	376	23,0	256	364	23,0	273	324	23,0	222	304
23,2	386	458	23,2	338	400	23,2	285	347	23,2	267	346
23,4	324	439	23,4	321	412	23,4	288	370	23,4	304	413
23,6	362	421	23,6	383	458	23,6	304	389	23,6	282	378
23,8	260	339	23,8	324	421	23,8	275	362	23,8	300	395
24,0	288	325	24,0	296	387	24,0	302	374	24,0	324	419
24,2	302	368	24,2	325	408	24,2	238	376	24,2	542	613
24,4	295	358	24,4	300	389	24,4	227	295	24,4	Rifiuto	
24,6	207	329	24,6	282	356	24,6	264	352	24,6		
24,8	286	354	24,8	338	427	24,8	275	381	24,8		
25,0	254	321	25,0	309	410	25,0	312	422	25,0		
25,2	292	363	25,2	276	354	25,2	344	458	25,2		
25,4	313	388	25,4	323	419	25,4	350	429	25,4		
25,6	305	418	25,6	Rifiuto		25,6	352	478	25,6		
25,8	319	409	25,8			25,8	Rifiuto		25,8		

Località: Castelnuovo Bocca d'Adda (LO)

Data:

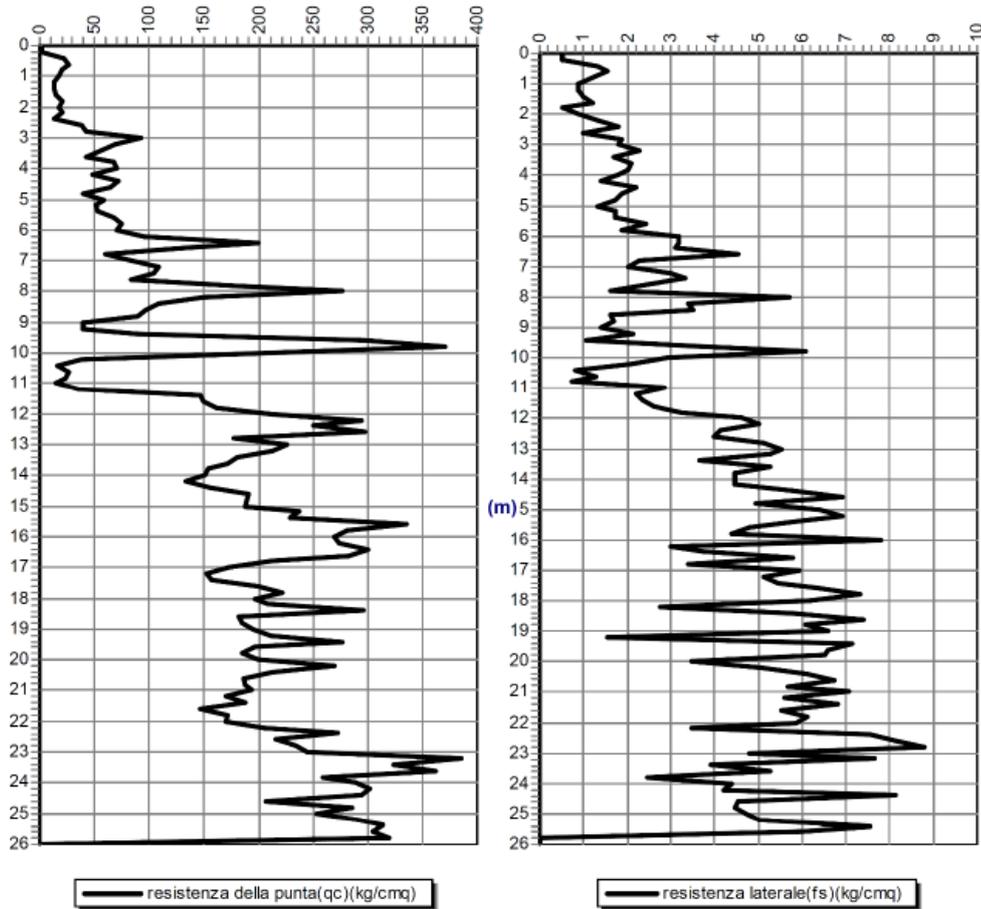
Attrezzatura: Penetrometro Statico a punta meccanica

Note:

Quota(m): p.c.

Sigla: \Prova n.1

## Grafico della prova



Profondità della falda dal p.c.(m): Non rilevata

Figura 27 - grafico prova penetrometrica P1



Località: Castelnuovo Bocca d'Adda (LO)

Data:

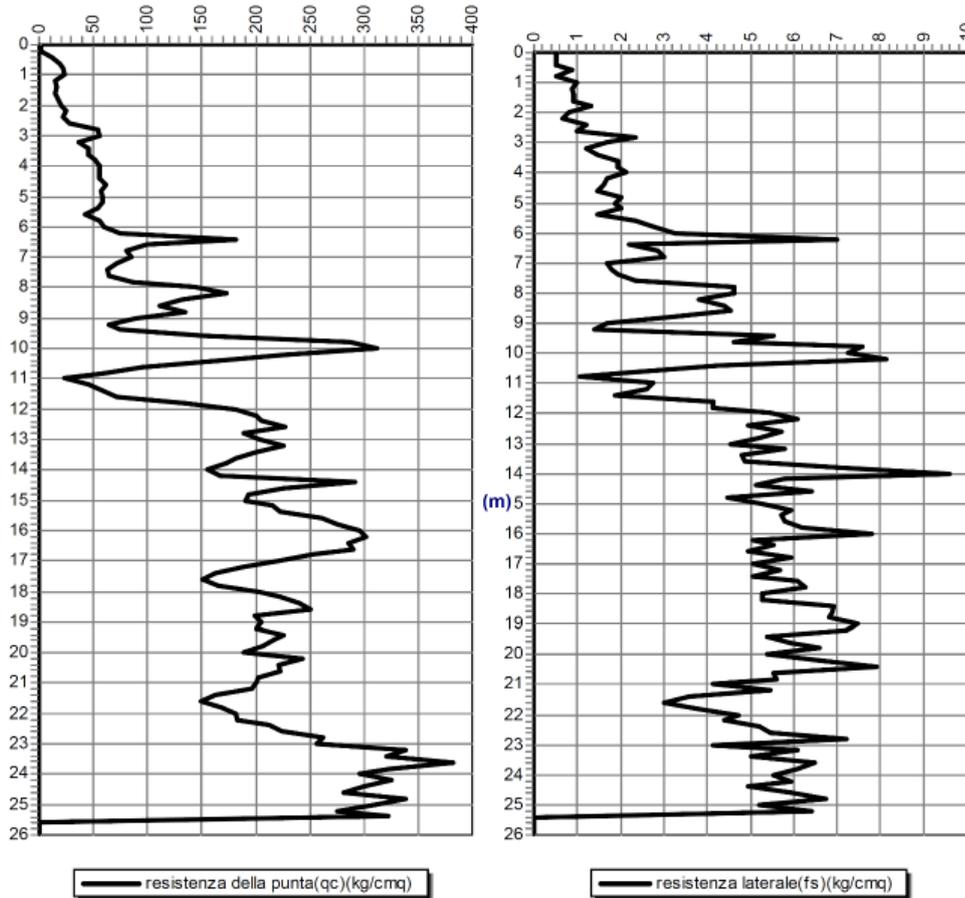
Attrezzatura: Penetrometro Statico a punta meccanica

Note:

Quota(m): p.c.

Sigla: \Prova n. 2

## Grafico della prova



Profondità della falda dal p.c.(m): Non rilevata

Figura 29 - grafico prova penetrometrica P2







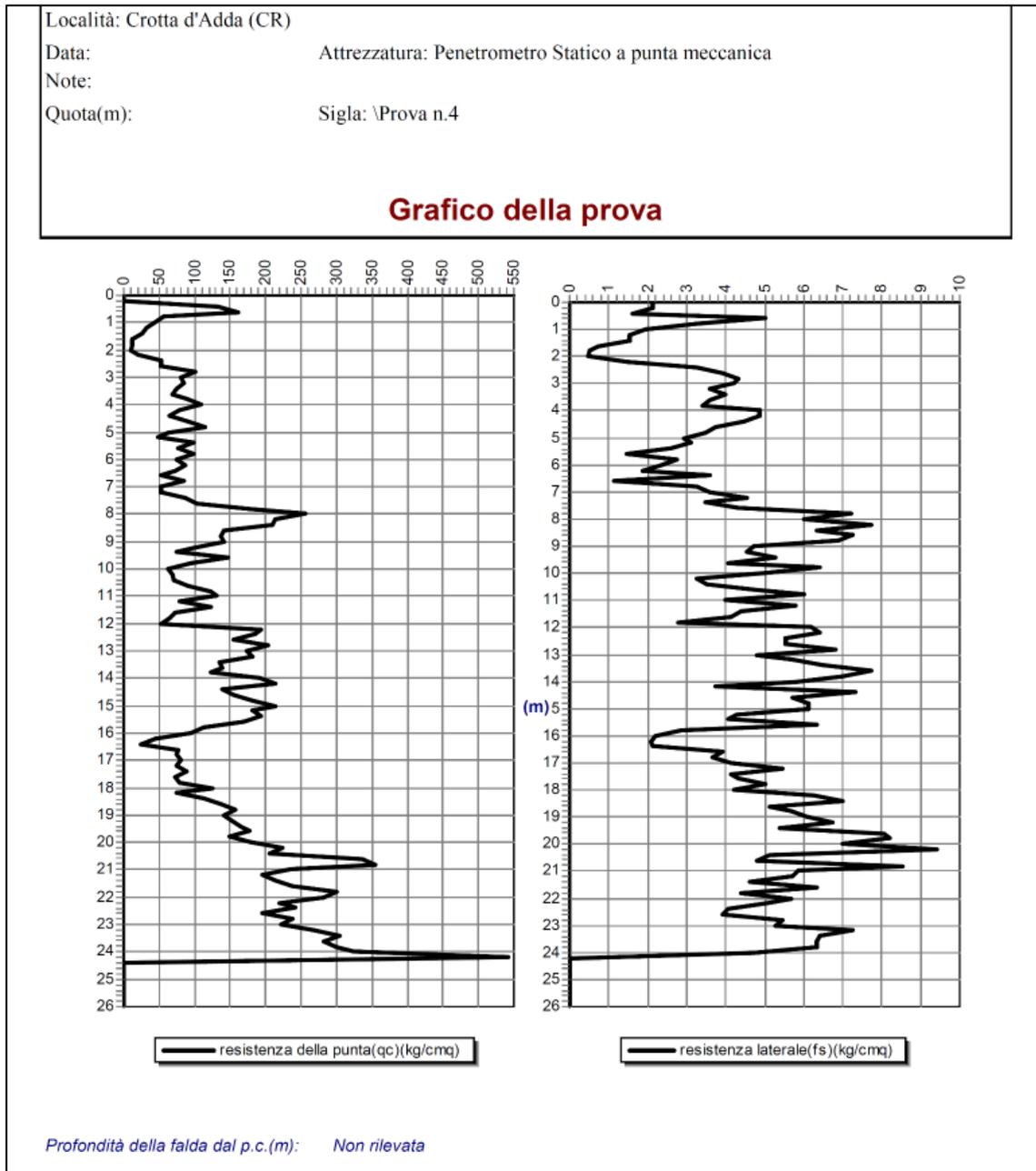


Figura 33 - grafico prova penetrometrica P4



### 3.3 - Modello geotecnico

Secondo l'Eurocodice 7 e le NTC, i valori caratteristici  $X_k$  consistono in una stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite. Il § C6.2.2.4 della Circolare illustra come tali valori debbano essere scelti: "Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità".

Nel caso in esame, come valori caratteristici sono stati considerati i valori medi dei parametri geotecnici elaborati statisticamente.

#### Sponda destra

Unità	Spessore (da m a m)	peso unità di volume	Angolo di attrito interno $\phi'$	Coesione $c'$	Modulo di Young $E'$
(1) limo sabbioso-argilloso	da piano campagna a 2,50 – 3,50 m	18 kN/m <sup>3</sup>	24°	5 kPa	4 MPa
(2) sabbia localmente limosa	da 2,50 – 3,50 m a 6,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	27°	-	12 MPa
(3) sabbia con orizzonti limosi-argillosi	da 6,00 m a 11,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	29°	-	25 MPa
(4) sabbia	Da 11,00 m a 23,00-25,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	30°	-	45 MPa
(5) sabbia con ghiaia	Da 23,00-25,00 m a 30,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	32°	-	60 MPa

## Sponda sinistra

Unità	Spessore (da m a m)	peso unità di volume	Angolo di attrito interno $\phi'$	Coesione $c'$	Modulo di Young $E'$
(1) limo argilloso	da piano campagna a 2,20 m	18 kN/m <sup>3</sup>	22°	5 kPa	3 MPa
(2) sabbia localmente limosa	da 2,20 m a 7,50 m	19 kN/m <sup>3</sup>	28°	-	15 MPa
(3) sabbia con orizzonti limosi-argillosi	da 7,50 m a 16,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	27°	-	20 MPa
(4) sabbia	Da 16,00 m a 20,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	24°	-	18 MPa
(5) sabbia	Da 16,00 m a 20,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	27°	-	35 MPa
(6) sabbia con ghiaia	Da 20,00 m a 24,00 m	19 kN/m <sup>3</sup>	29°	-	45 MPa

Dott. Agostino Pasquali Coluzzi

