



Comune di
Curno



Comune di
Ponte San Pietro



Comune di
Presezzo



**DUE PONTI PER LA
CICLABILITÀ TRA IL
MONTE CANTO E IL
BREMBO**

Ponte sulla Quisa

Progetto definitivo

Relazione geologia e geotecnica

Geol. Michela Pecchio

RUP: Arch. Oliviero Rota

Progettisti: Arch. Massimo Bernardelli

Responsabile di progetto

Arch. Angela Ceresoli - progettazione

Geol. Michela Pecchio - geologia e geotecnica

Ing. Pier Giuseppe Fenaroli - idraulica

Ing. Fabrizio Vergani - progettazione strutturale e antisismica

Geom. Moreno Tasca - elaborazioni grafiche

aBC studio Progetti sostenibili

architettura sostenibile
progettazione del paesaggio

pianificazione territoriale e urbanistica

progettazione urbana

piani per la mobilità e moderazione del traffico

www.abc-studio.it info@abc-studio.it

INDICE

1. PREMESSA	3
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA NEL CONTESTO DELLE INDICAZIONI DELLA COMPONENTE GEOLOGICA DEL P.G.T. COMUNALE.....	5
2.1 Studio geologico comune di Ponte S. Pietro (sponda destra T. Quisa)	5
2.2 Studio geologico comune di Curno (sponda sinistra T. Quisa)	11
2.3 Sintesi delle risultanze degli studi geologici comunali relativamente all'area interessata dall'intervento in progetto	14
3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO.....	16
3.1 Rilievo geologico-geomorfologico di dettaglio dell'area in esame	20
4. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO: METODOLOGIE E RISULTATI	23
4.1 Metodologie per l'esecuzione delle indagini in sito	24
4.1.1 <i>Sondaggio a carotaggio continuo</i>	24
4.1.2 <i>Prove SPT in foro</i>	24
4.1.3 <i>Indagine sismica MASW</i>	24
4.2 Risultati delle indagini geognostiche	25
4.3 Risultati delle indagini geofisiche MASW	26
4.4 Individuazione della categoria di sottosuolo (NTC 2018).....	28
4.5 Verifica del potenziale di liquefazione	29
4.6 Ricostruzione del modello geologico del terreno	30
5. STIMA DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE ATTRAVERSO L'UTILIZZO DELLA PROCEDURA PREVISTA DALL'ALLEGATO 5 - D.G.R. 9/2616/2011	32
6. VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO.....	36
6.1 Caratterizzazione e modellazione geotecnica secondo le nuove NTC 2018	36
6.2 Determinazione dei parametri geotecnici caratteristici per il caso in esame	36
7. CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA	38
7.1 Stima della pericolosità sismica di base.....	38
7.1.1 <i>Parametri caratteristici dell'opera in progetto</i>	38
7.1.2 <i>Fattori di amplificazione sismica locale</i>	39
7.2 Stima dell'effetto sismico per l'opera in progetto	41
7.2.1 <i>Forme spettrali di sito</i>	41
7.2.2 <i>Coefficienti sismici/Condizioni stratigrafiche</i>	42
7.2.3 <i>Determinazione dei parametri per la progettazione sismica</i>	43
8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PRESCRIZIONE DI CARATTERE GEOLOGICO-TECNICO.....	44

ALLEGATO A: STRATIGRAFIA SONDAGGIO E DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

ALLEGATO B: PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI DI FONDAZIONE

1. PREMESSA

Su incarico dei Comuni di Ponte San Pietro e Curno è stata effettuata un'indagine geologico-geotecnica finalizzata alla realizzazione di una nuova passerella ciclopedonale sul torrente Quisa, in corrispondenza del settore meridionale dell' "Isolotto" tra Ponte San Pietro e Curno (Fig. 1).

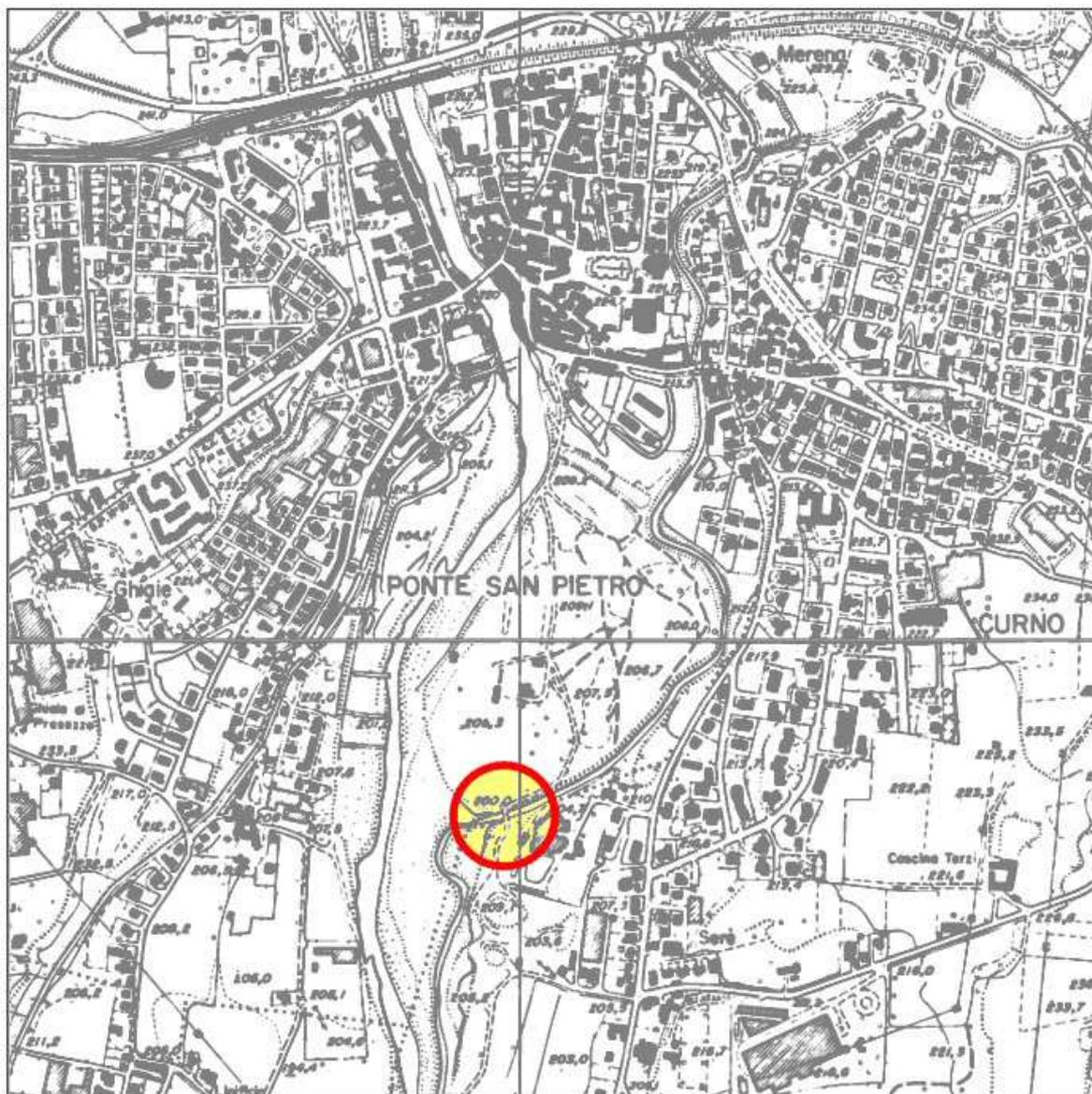


Fig. 1: Corografia area di indagine (Estratto della C.T. R. Lombardia)

Nel presente documento verranno in particolare analizzati gli aspetti di carattere geologico, geomorfologico ed idrogeologici dell'area in esame (basati sostanzialmente sull'analisi bibliografica esistente e su specifici sopralluoghi in sito) e quelli più specificamente geotecnici e sismici, connessi alla realizzazione della passerella in progetto.

Quindi, per il raggiungimento di tale obiettivo si è dato corso alle seguenti attività:

1. **inquadramento generale di tipo geologico-geomorfologico ed idrogeologico** dell'area interessata dall'intervento derivante da sopralluoghi in sito e dall'esame delle informazioni bibliografiche disponibili. Tale analisi è stata effettuata anche attraverso il confronto con le informazioni contenute nel vigente Studio Geologico Comunale (Cap.2 e 3);
 - **esecuzione delle indagini in sito** finalizzate alla ricostruzione del “modello geologico del terreno” e alla caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dall'opera in progetto (Cap. 4), attraverso l'esecuzione di:
 - 1 sondaggio a carotaggio continuo comprensivo di prove SPT in foro;
 - Indagine geofisica MASW finalizzata alla determinazione della categoria di sottosuolo e di eventuali variazioni litostratigrafiche presenti nella zona di indagine.
2. **valutazione dei parametri geotecnici caratteristici del terreno** attraverso l'elaborazione delle risultanze delle indagini in sito (Cap. 5). Tali parametri costituiscono il punto di partenza per le successive verifiche di sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) e di esercizio (SLE), una volta noti gli elementi strutturali dell'opera da realizzare.
3. **classificazione sismica dell'area** finalizzata alla stima dell'effetto sismico per l'opera in progetto (Cap. 6).

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA NEL CONTESTO DELLE INDICAZIONI DELLA COMPONENTE GEOLOGICA DEL P.G.T. COMUNALE

Analizzando i vari documenti che regolamentano l'area in questione dal punto di vista "pianificatorio", si rileva che lo strumento di maggior dettaglio per il progetto in esame è sicuramente rappresentato dalla componente geologica del P.G.T. comunale.

Nel caso specifico si evidenzia inoltre che, essendo la passerella in progetto realizzata al confine tra i comuni di Ponte S.Pietro ad ovest e di Curno ad est, per l'inquadramento dell'opera in esame si dovrà fare necessariamente riferimento alle indicazioni contenute in entrambe gli studi geologici comunali, ed in particolare:

per il comune di Ponte S. Pietro (sponda destra T. Quisa):

"AGGIORNAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO effettuata ai sensi della D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 dal dr.geol. E. Granata, settembre 2016".

per il comune di Curno (sponda sinistra T. Quisa):

"NUOVO AGGIORNAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO effettuata ai sensi della D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 dallo STUDIO CASTALIA, febbraio 2017"

Nel seguito verranno quindi analizzate nel dettaglio le carte tematiche prodotte nell'ambito di tali studi e che risultano di interesse per il presente progetto.

2.1 Studio geologico comune di Ponte S. Pietro (sponda destra T. Quisa)

Carta del quadro del dissesto con legenda uniformata P.A.I. in cui sono riportate le aree in dissesto classificate conformemente alle tavole di delimitazione delle aree in dissesto PAI.

In Fig. 2, dove si riporta uno stralcio relativo all'area in esame, sono identificate aree a diverso grado di pericolosità idraulica: elevata "Ee" e media e moderata "Em".

Tali aree sono state definite, secondo quanto dichiarato nello studio geologico comunale, sulla base di studi di dettaglio.

Nel medesimo studio viene inoltre specificato che *"...la carta non riporta le fasce PAI del Brembo in quanto non sono state oggetto di proposta di modifica"*.

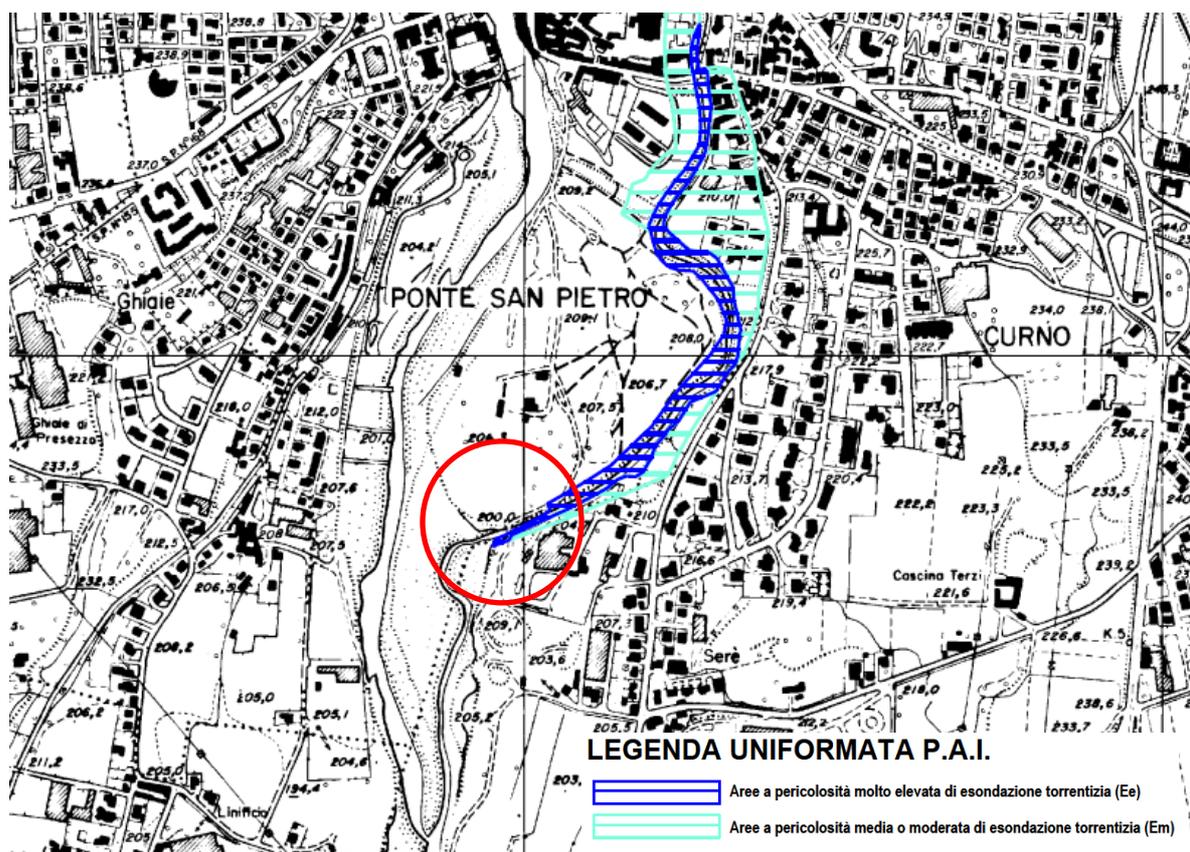
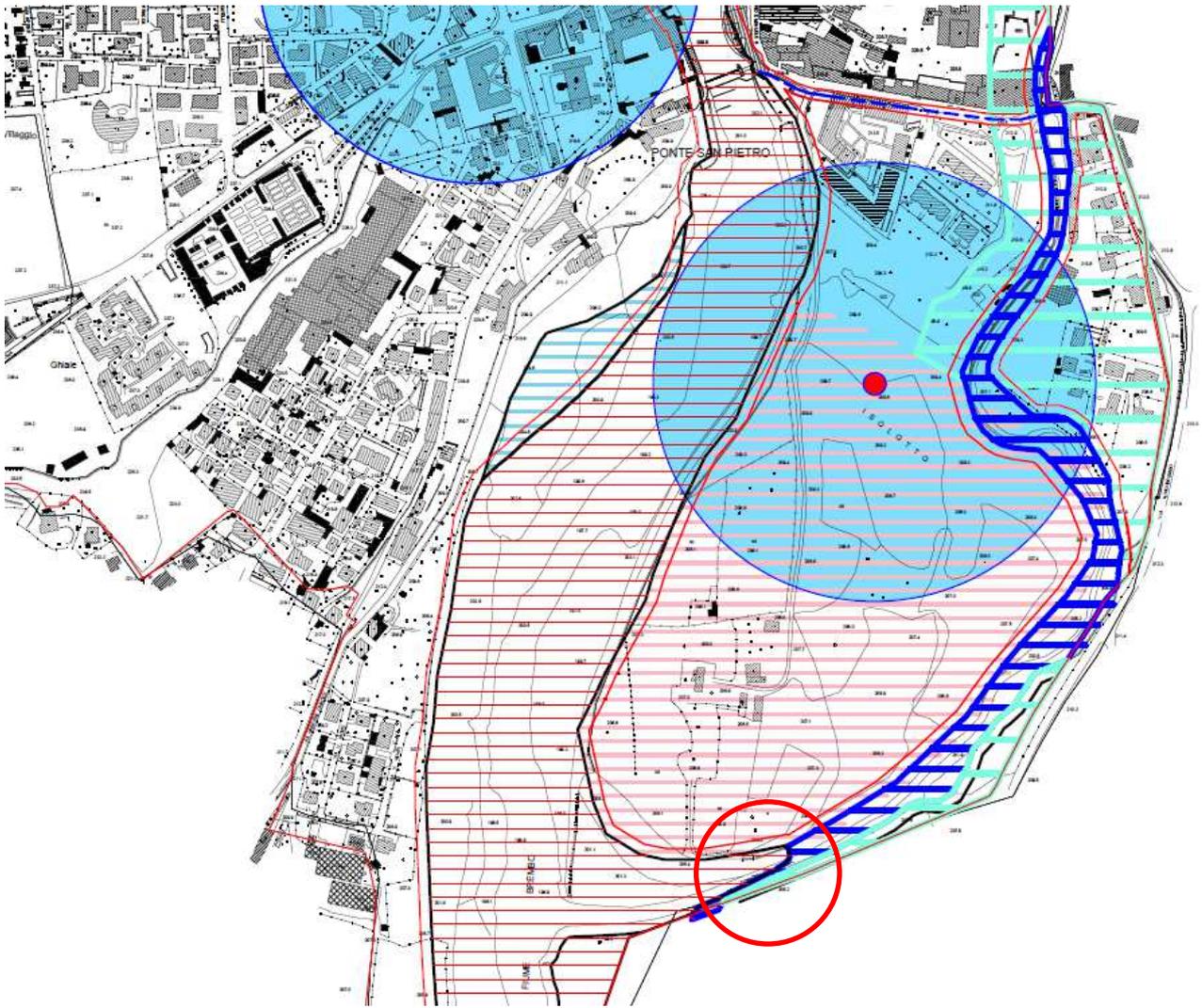


Fig. 2: Comune di Ponte S.Pietro - stralcio della Carta del quadro del dissesto con legenda uniformata P.A.I. (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Carta dei vincoli. In questo elaborato vengono rappresentate le limitazioni d'uso del territorio derivanti da normative e piani sovraordinati in vigore e di contenuto prettamente geologico.

Relativamente al tratto di torrente Quisa oggetto di studio si evidenziano i seguenti vincoli (Fig. 3):

- -aree in dissesto classificate conformemente alle tavole di delimitazione delle aree in dissesto PAI e riferite alla pericolosità di fenomeni torrentizi (vedi anche Fig. 2);
- fasce fluviali PAI in corrispondenza delle sponde del F.Brembo
- Vincoli di Polizia idraulica



LEGENDA

VINCOLI DERIVANTI DAGLI STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE SOVRAORDINATA

Area P.A.I. elaborato 2 (dissesti)

-  Aree a pericolosità molto elevata di esondazione torrentizia (Ee)
-  Aree a pericolosità media o moderata di esondazione torrentizia (Em)

Area P.A.I. elaborato 8 (fasce fluviali)

-  Fascia fluviale A
-  Fascia fluviale B
-  Fascia fluviale C

VINCOLI DI POLIZIA IDRAULICA DEI CORSI D'ACQUA

-  Vincolo di polizia idraulica (R.D. 25/07/1904 - DGR 25/01/2002 n. 7/7868)
-  Fascia di rispetto del reticolo idrico principale (10 m) e rogge (5 m) (da verificare puntualmente)

VINCOLI DI CARATTERE IDROGEOLOGICO

-  Salvaguardia delle captazioni idropotabili
Zona di tutela assoluta: raggio 10 m dalla captazione
Zona di rispetto: raggio 200 m dalla captazione (D.Lgs. 152/2006 art. 94)
-  Salvaguardia delle captazioni idropotabili
Zona di tutela assoluta: raggio 10 m dalla captazione
Zona di rispetto delimitata con criterio cronologico (D.Lgs. 152/2006 art. 94)

Fig. 3: Comune di Ponte S.Pietro - stralcio della Carta dei vincoli (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Carta di Sintesi: rappresenta le aree omogenee dal punto di vista della pericolosità/vulnerabilità riferita allo specifico fenomeno che le genera. Come si può vedere dall'analisi della Fig. 4, la sponda destra del T. Quisa ricade in Fascia fluviale A del PAI.

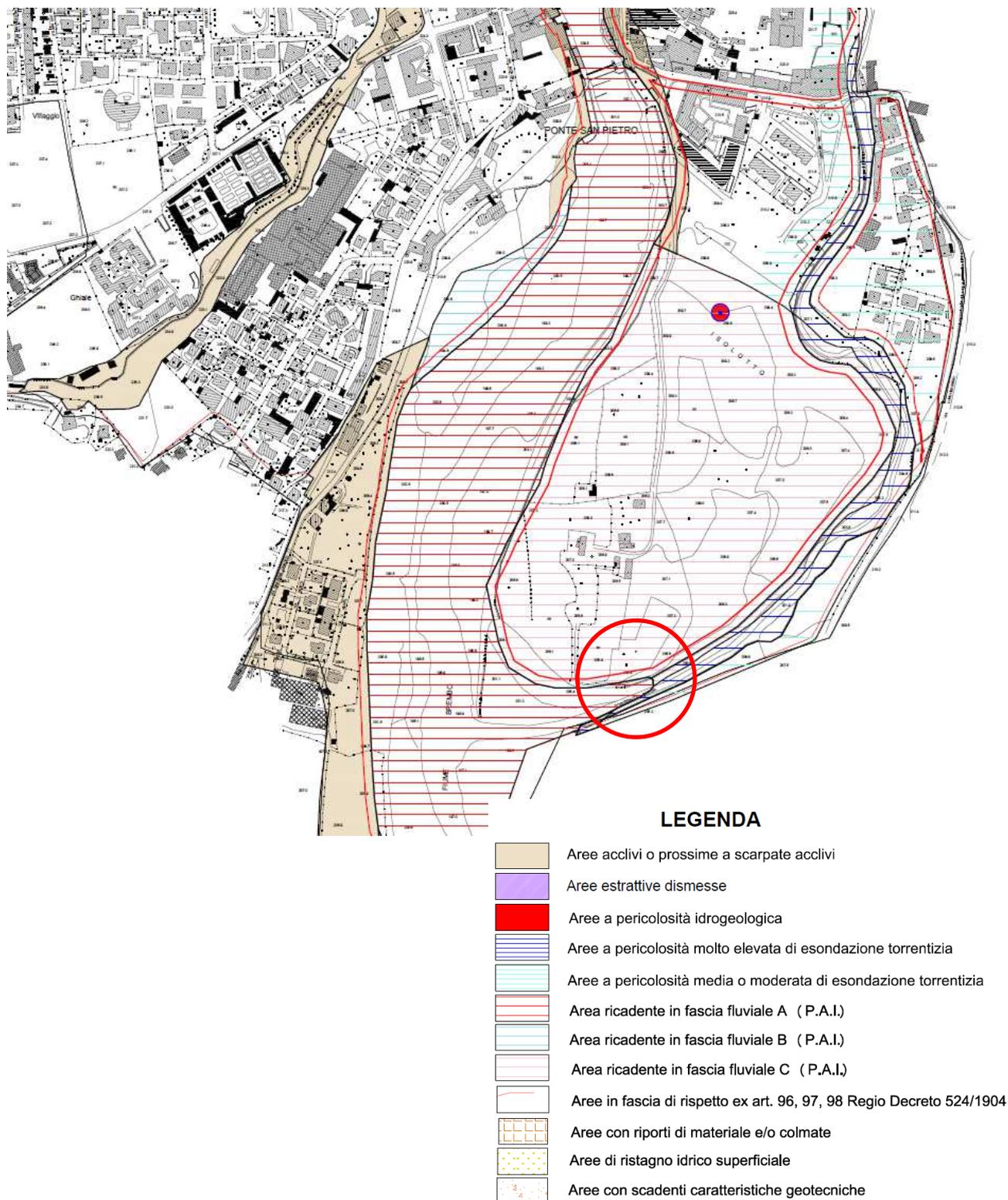


Fig. 4: Comune di Ponte S.Pietro - stralcio della Carta di sintesi
(nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Carta della Pericolosità Sismica Locale: suddivide il territorio comunale in funzione degli effetti sismici di sito. Come si può osservare dalla Fig. 5, l'area di interesse rientra nello scenario sismico Z4a "Zone di pianura con depositi alluvionali/fluvioglaciali granulari e/o coesivi" con amplificazione sismica F_a inferiore al valore di soglia tabulato da Regione Lombardia.

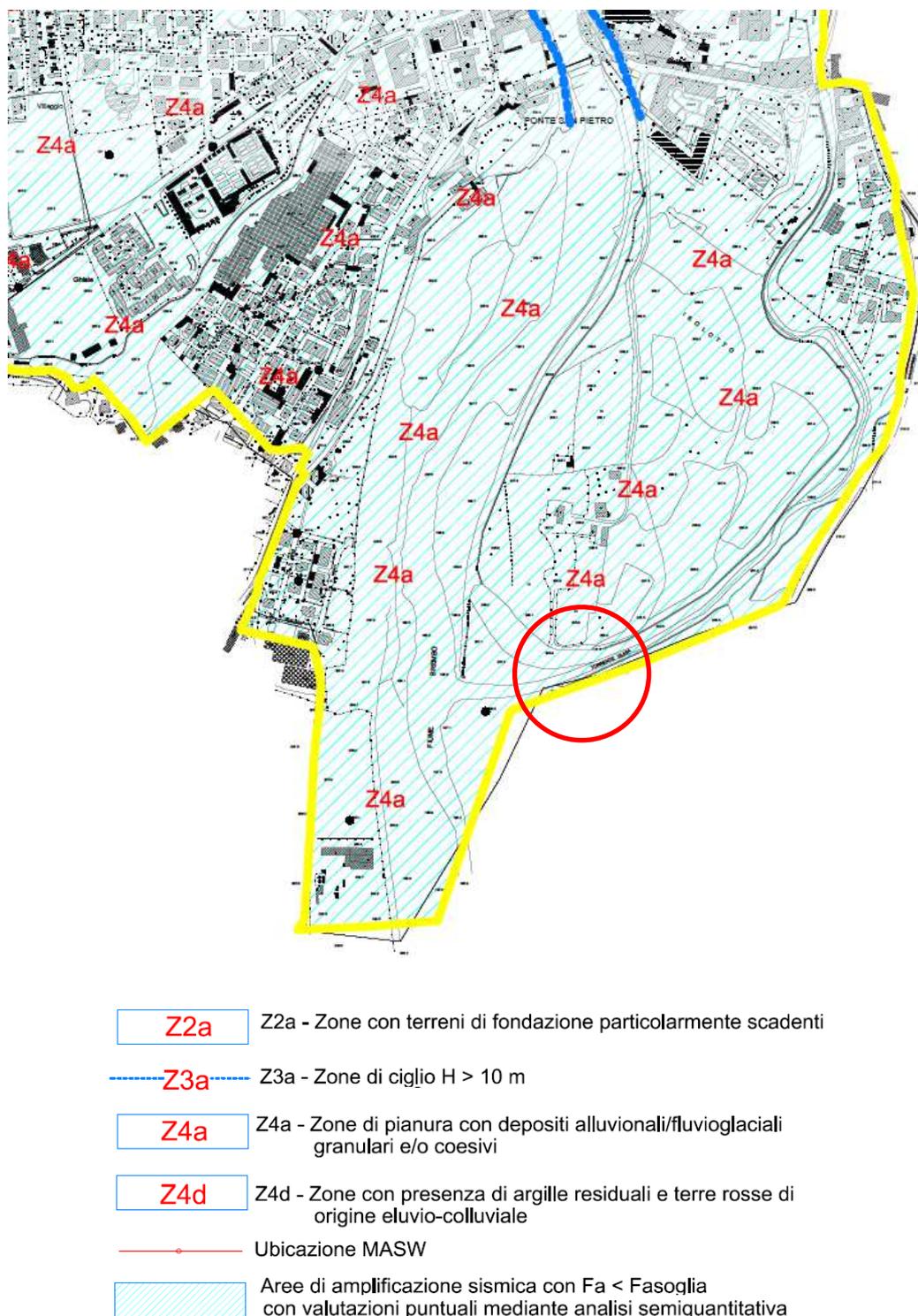
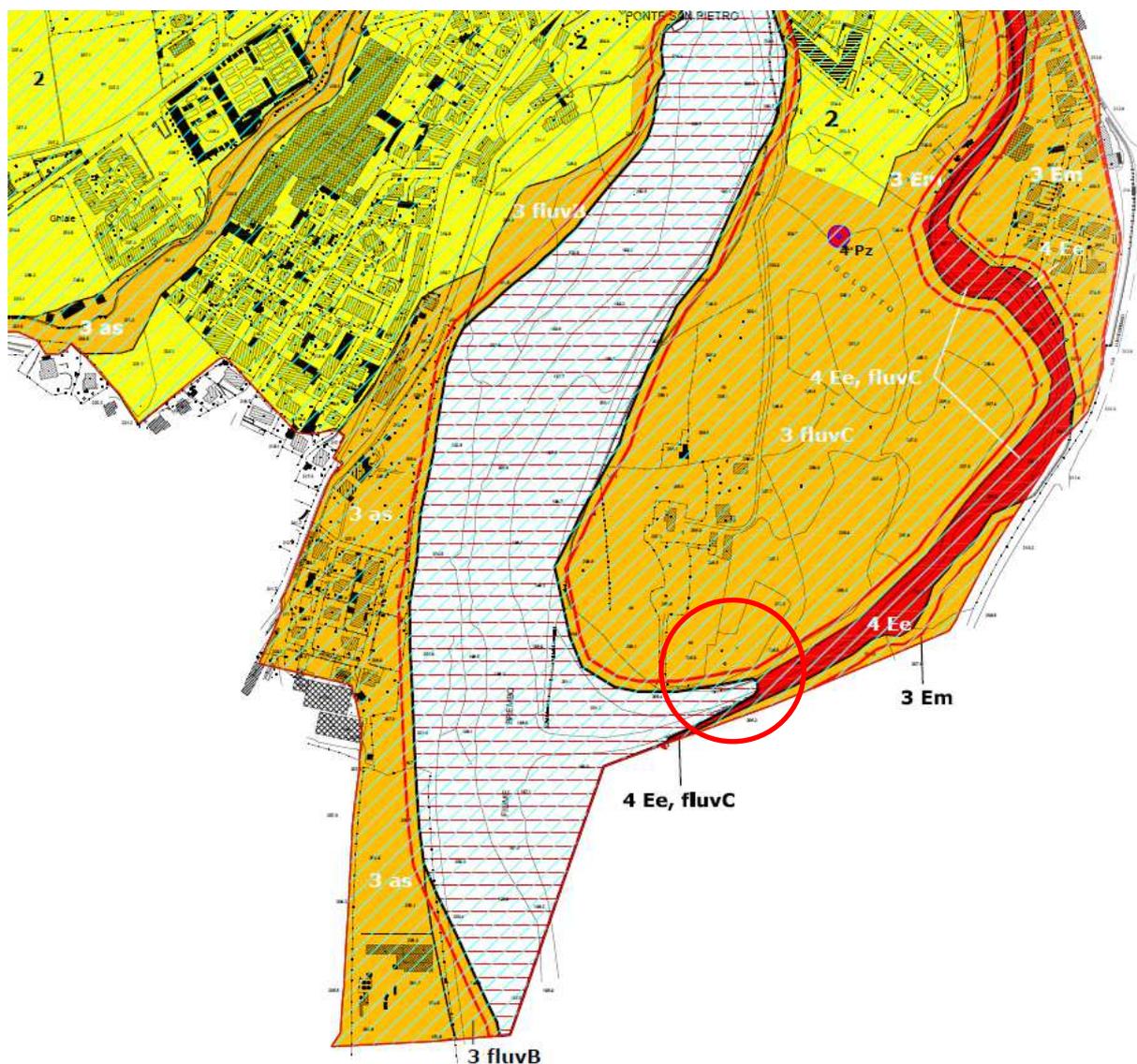


Fig. 5: Comune di Ponte S.Pietro: stralcio della Carta di Pericolosità Sismica Locale (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Carta di Fattibilità geologica: dove, sulla base delle criticità emerse nel corso dell'analisi del territorio, vengono attribuite le opportune classi di Fattibilità. Come evidenziato in Fig. 6 l'area interessata dal progetto ricade, nel tratto di pertinenza fluviale in classe "4 fluvA", mentre nell'area adiacente in classe "3 fluvC" per problematiche di carattere idraulico.



Classi di fattibilità geologica



Classe 4 - Fattibilità con gravi limitazioni
 4 fluvA - Aree di pertinenza della fascia fluviale A del P.A.I.
 4 Ee - Aree a pericolosità molto elevata di esondazione torrentizia
 4 Pz - Aree ad elevata vulnerabilità idrogeologica



Classe 3 - Fattibilità con consistenti limitazioni
 3 rp - Aree di riporto e/o aree colmate
 3 sg - Aree con caratteristiche geotecniche scadenti
 3 estr - Aree estrattive dismesse
 3 rst - Aree caratterizzate da ristagni idrici superficiali
 3 fluvB - Aree di pertinenza della fascia fluviale B del P.A.I.
 3 fluvC - Aree di pertinenza della fascia fluviale C del P.A.I.
 3 Em - Aree a pericolosità media o moderata di esondazione torrentizia
 3 as - Aree acclivi o prossime a scarpate acclivi

LEGENDA



Classe 2 - Fattibilità con modeste limitazioni



Aree di amplificazione sismica con $F_a < F_{asoglia}$
 con valutazioni puntuali mediante analisi semiquantitativa

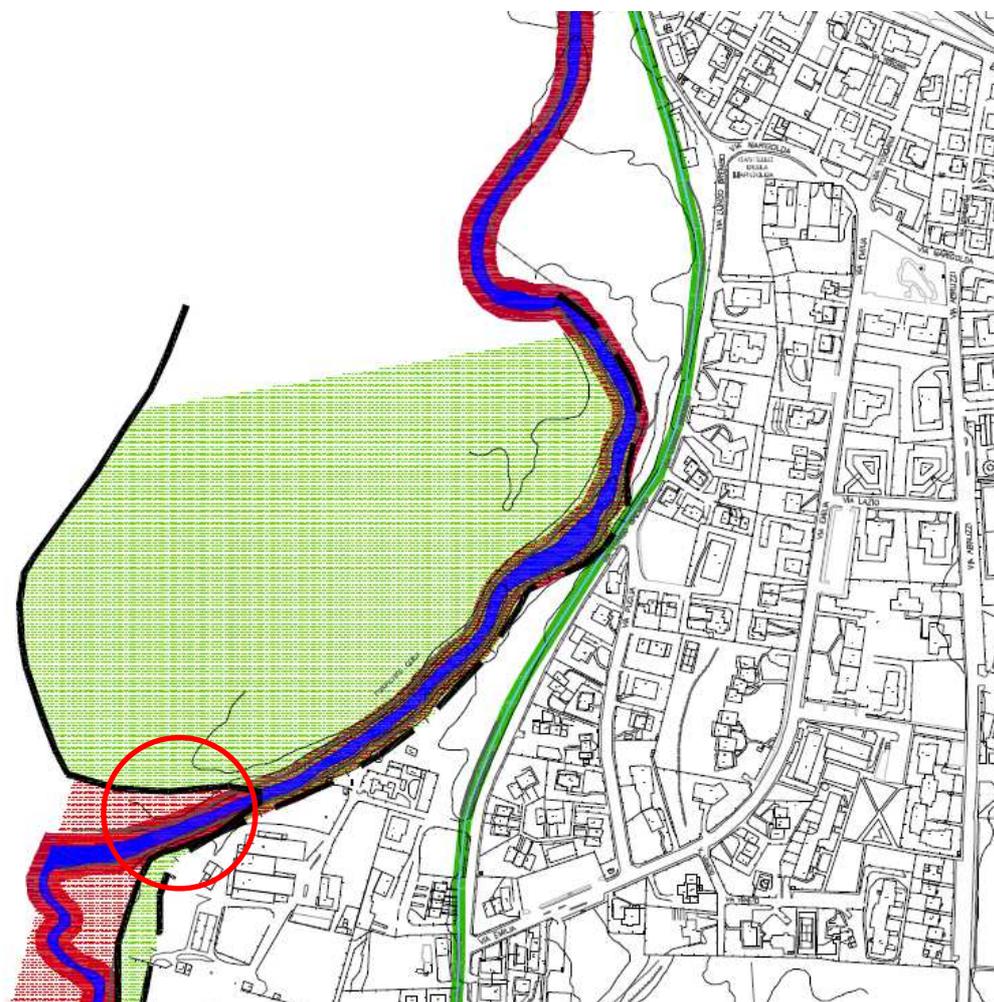


Vincolo di polizia idraulica (R.D. 25/07/1904 - DGR 25/01/2002 n. 7/7868)
 Fascia di rispetto del reticolo idrico principale (10 m) e rogge (5 m)
 (da verificare puntualmente)

Fig. 6: Comune di Ponte S.Pietro - stralcio della Carta di Fattibilità geologica (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

2.2 Studio geologico comune di Curno (sponda sinistra T. Quisa)

Carta dei vincoli. In questo elaborato vengono rappresentate le limitazioni d'uso del territorio derivanti da normative e piani sovraordinati in vigore e di contenuto prettamente geologico.



LEGENDA

L. 183/89, art. 17: delimitazione fasce fluviali P.A.I. - Fiume Brembo

- Limite esterno di Fascia A - fascia di deflusso della piena
- Limite esterno di Fascia B - fascia di esondazione
- Limite esterno di Fascia C - fascia di inondazione per piena catastrofica
- Area entro cui vigono le norme di Fascia A (Norme di Attuazione del P.A.I.)
- Area entro cui vigono le norme di Fascia B (Norme di Attuazione del P.A.I.)
- Area entro cui vigono le norme di Fascia C (Norme di Attuazione del P.A.I.)

Sul territorio comunale di Curno il limite esterno di Fascia B coincide localmente al limite esterno di Fascia A. In questi casi, seguendo i criteri con cui è stata redatta la Cartografia PAI, è stato riportato il graficismo relativo al limite esterno di Fascia B, che delimita una porzione di territorio su cui vengono applicate le norme di Fascia A, secondo quanto previsto dalle NTA del PAI e dalla -D.G.R. IX/2616/2011, art. 5.1

R.D. 523/1904, art. 96: reticolo idrico principale e fasce di rispetto

- Reticolo Idrico Principale
- Fascia di rispetto di 10 m sul reticolo idrico principale

R.D. 368/1904: reticolo idrico consortile e fasce di rispetto

- Reticolo Idrico Minore di pertinenza consortile
- Fascia di rispetto di 10 m o 5 m sul Reticolo Idrico Minore

D.L. 152/99, D.L. 258/00, D.G.R. 12693/03: aree di salvaguardia delle captazioni ad uso idropotabile

- Area di tutela assoluta (raggio 10 m)
- Fascia di rispetto

Fig. 7: Comune di Curno: stralcio della Carta dei vincoli (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Relativamente al tratto di torrente Quisa oggetto di studio si evidenziano i seguenti vincoli (Fig. 7):

- Fasce fluviali PAI in corrispondenza delle sponde del F.Brembo;
- Fasce di rispetto di 10 m sul reticolo principale (Vincolo di Polizia idraulica).

Carta di Sintesi: rappresenta le aree omogenee dal punto di vista della pericolosità/vulnerabilità riferita allo specifico fenomeno che le genera.

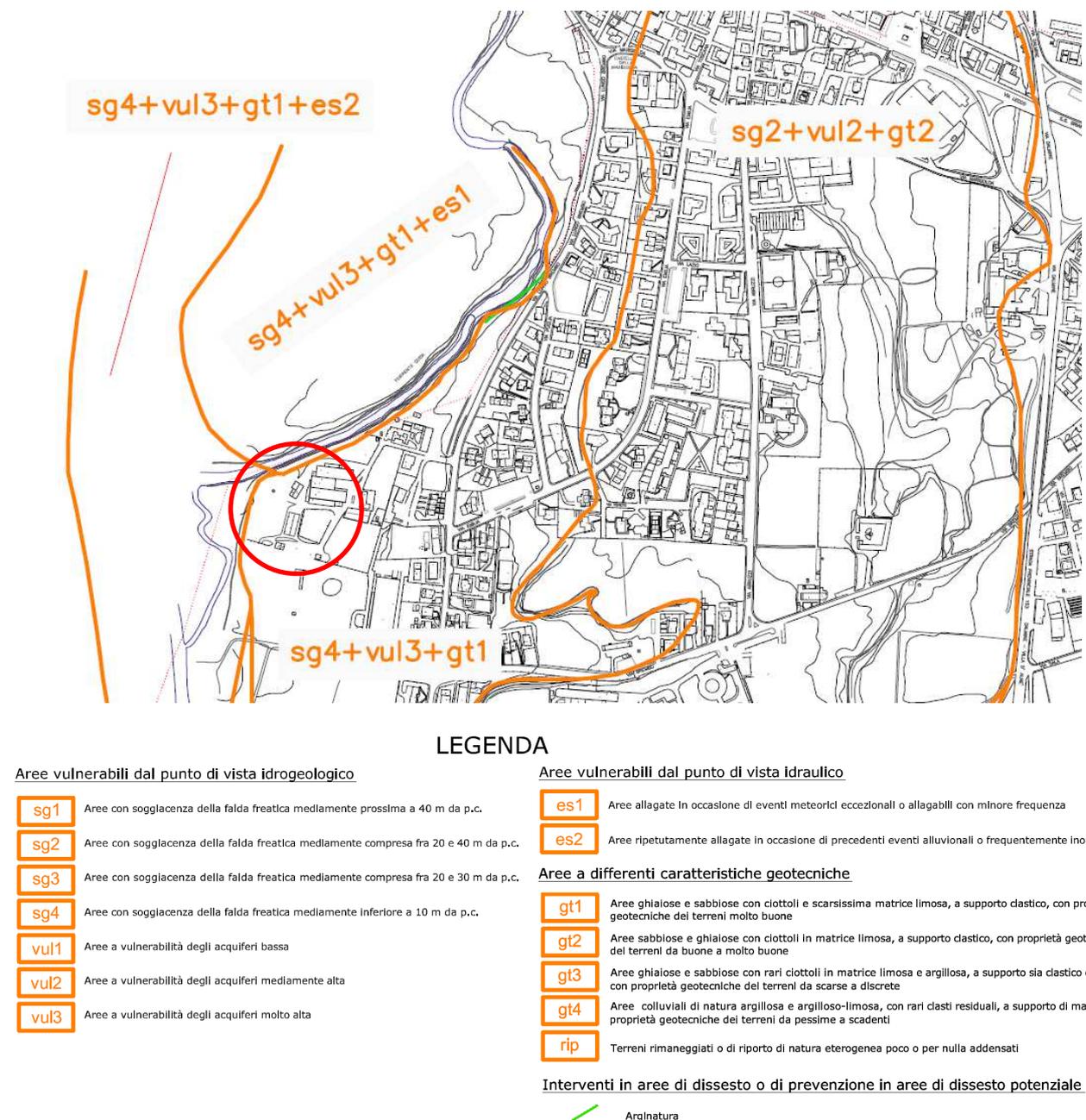


Fig. 8: Comune di Curno: stralcio della Carta di sintesi (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Come si può vedere dall'analisi della Fig. 8, per la sponda sinistra del T. Quisa sono state

riconosciute le seguenti criticità:

- Vulnerabilità idrogeologica per presenza di falda con soggiacenza inferiore ai 10 m “sg4” e “vul3”;
- Vulnerabilità idraulica “aree ripetutamente allagate in occasione di precedenti eventi alluvionali o frequentemente allagabili “es2”;

Carta della Pericolosità Sismica Locale: suddivide il territorio comunale in funzione degli effetti sismici di sito.

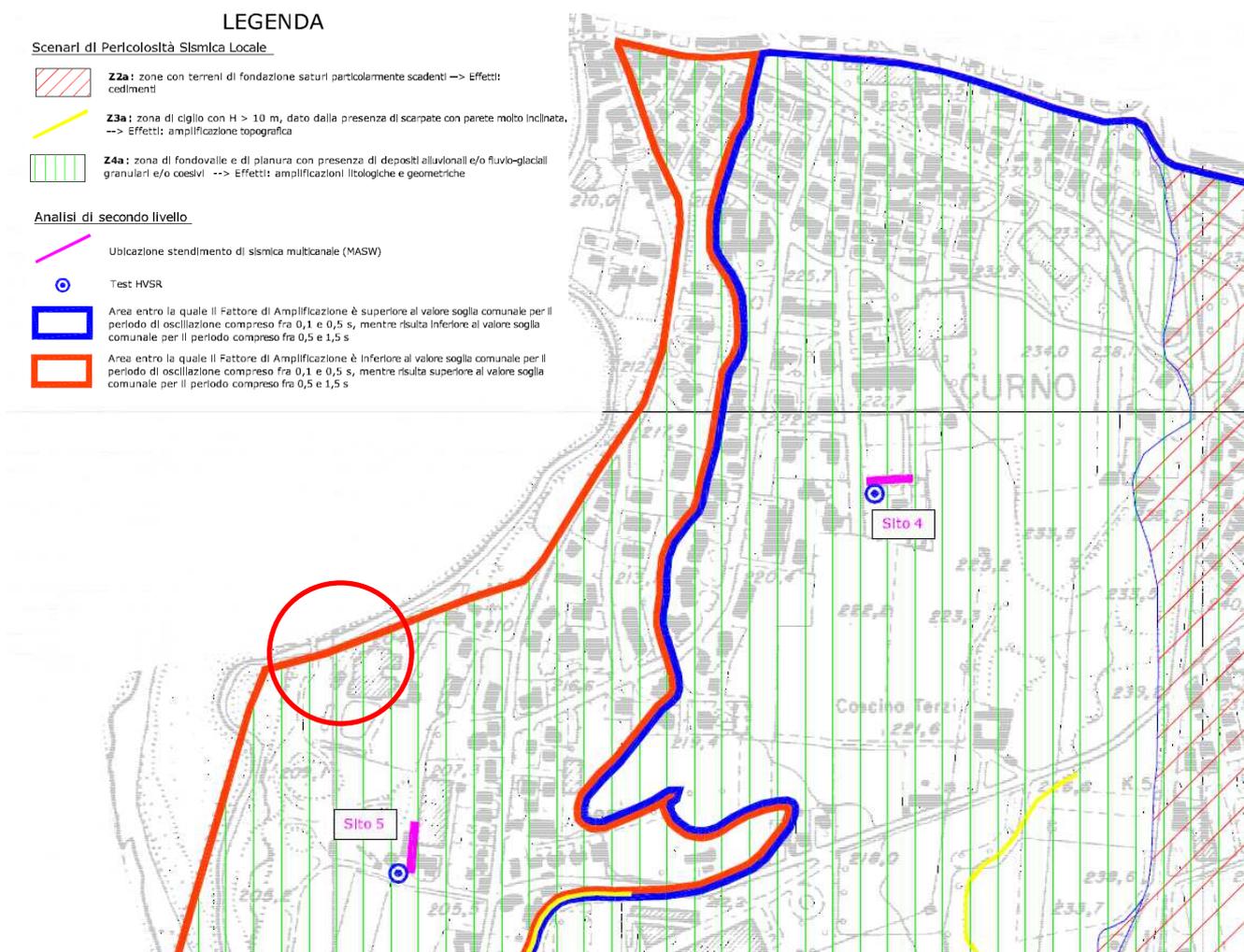


Fig. 9: Comune di Curno: stralcio della Carta di Pericolosità Sismica Locale (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

Come si può osservare dalla Fig. 9, l'area di interesse rientra nello scenario sismico Z4a “Zone di fondovalle e di pianura con depositi alluvionali/fluvioglaciali granulari e/o coesivi”.

Si evidenzia in particolare che il fattore di amplificazione sismica F_a risulta:

- inferiore al valore di soglia tabulato da Regione Lombardia per periodi di oscillazione compresi tra 0.1 e 0.5 s;
- superiore al valore di soglia tabulato da Regione Lombardia per periodi di oscillazione compresi tra 0.5 e 1.5 s;

Carta di Fattibilità geologica: dove, sulla base delle criticità emerse nel corso dell'analisi del

territorio, vengono attribuite le opportune classi di Fattibilità.

Come evidenziato in Fig. 10, l'area interessata dal progetto ricade, nel tratto di pertinenza fluviale in "classe 4" e in "classe "3c" per problematiche connesse alla fascia fluviale C del PAI nell'area immediatamente adiacente.

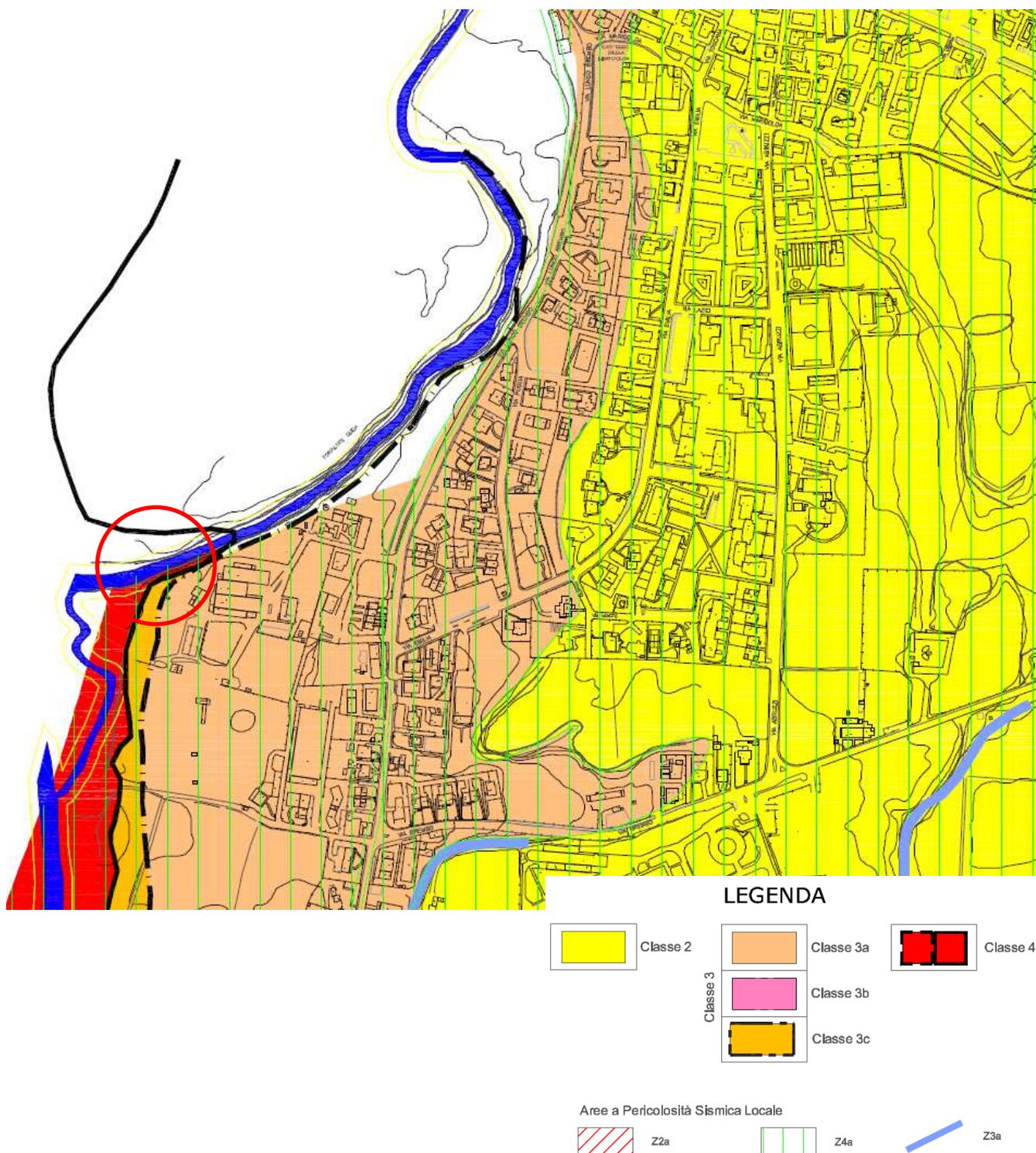


Fig. 10: Comune di Corno - stralcio della Carta di Fattibilità geologica (nel cerchio rosso, ubicazione dell'area oggetto dello studio)

2.3 Sintesi delle risultanze degli studi geologici comunali relativamente all'area interessata dall'intervento in progetto

Alla luce della disamina della documentazione riportata nei precedenti paragrafi e relativa agli studi geologici comunali di Ponte S.Pietro e Curno è possibile affermare che, relativamente all'area interessata dagli interventi in progetto, le maggiori criticità sono di tipo idraulico in quanto l'area di interesse si trova in prossimità della confluenza del T. Quisa nel F. Brembo.

Si evidenzia a questo proposito che le opere in progetto sono previste all'interno delle fasce fluviali individuate dal PAI per il F. Brembo, ed in particolare (vedi Fig. 6 e Fig. 10):

- la passerella rientra in fascia fluviale A del PAI a cui corrisponde la CLASSE 4 di Fattibilità geologica;
- IL percorso ciclabile di collegamento tra le sponde del Quisa ricade invece in fascia fluviale C del PAI a cui corrisponde la CLASSE 3 di Fattibilità geologica;

Infine, per quanto riguarda gli aspetti di carattere sismico si sottolinea che entrambe gli studi geologici, effettuati ai sensi della più recente normativa in materia di pianificazione territoriale (D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011), evidenziano la presenza su entrambe le sponde del T. Quisa di uno scenario di Pericolosità Sismica Locale "Z4a - *Zone di fondovalle e di pianura con depositi alluvionali/fluvioglaciali granulari e/o coesivi*".

Gli approfondimenti di 2° livello sismico, effettuati nell'ambito degli studi geologici sopracitati attraverso l'esecuzione di indagini sismiche "MASW", hanno poi consentito di stimare:

- 1) per il tratto in sponda destra (ricadente in comune di Ponte S.Pietro), valori di amplificazione sismica $F_a <$ rispetto al valore di soglia tabulato da Regione Lombardia (cfr. Fig. 5)
- 2) per il tratto in sponda sinistra (ricadente in comune di Curno), valori di amplificazione sismica $F_a <$ rispetto al valore di soglia tabulato da Regione Lombardia solo per periodi di oscillazione compresi tra 0.1 e 0.5g. (cfr. Fig. 9)

Si precisa a questo proposito che, nell'ambito del presente studio, al fine di valutare le condizioni sismiche specifiche per il sito in esame, si è proceduto all'esecuzione indagini geofisiche tipo MASW che hanno consentito la caratterizzazione dal punto di vista dinamico dei terreni dell'area oggetto di intervento.

Si rimanda quindi al capitolo 4 per le risultanze di tale indagine.

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO

L'area oggetto di studio è situata in corrispondenza del T. Quisa che, nel tratto di interesse, fa da confine tra il comune di Ponte S. Pietro ad ovest e quello di Curno ad est (cerchio rosso in Fig. 11).

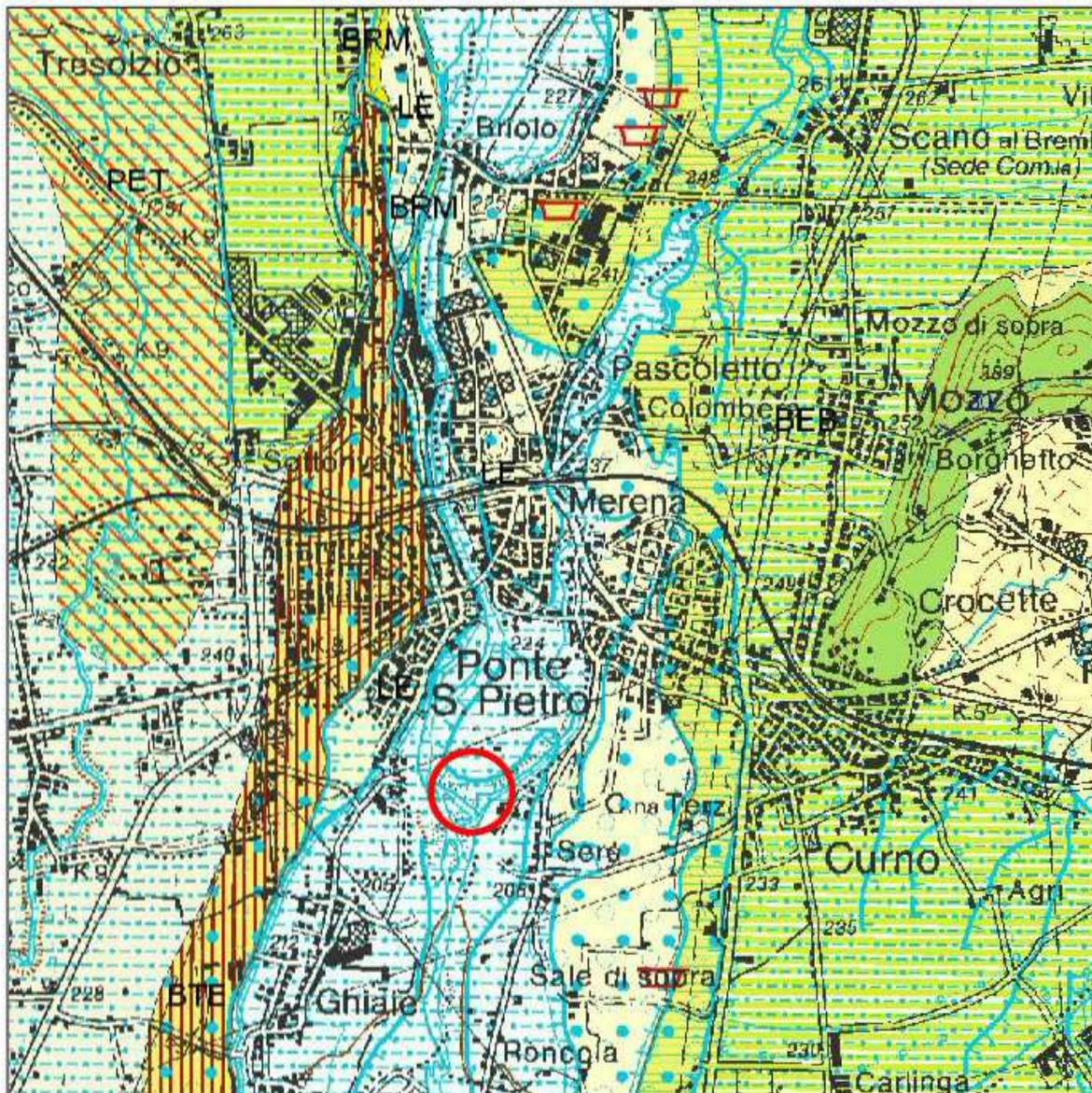


Fig. 11: stralcio della carta geologica CARG relativa all'area in esame

LEGENDA

POI: Unità Postglaciale - Sintema del Po; **PET:** Unità del T. Lesina - Supersintema di Palazzago; **BPO:** Unità di Ponte S. Pietro - Supersintema di Besnate; **BTE:** Sintema di Bonate - Supersintema di Besnate; **BEB:** Sintema di Brembate

Dal punto di vista geologico-geomorfologico l'area si colloca nell'ambito dell'alta pianura bergamasca in un'area pianeggiante con un'elevazione media di circa 200 m s.l.m., caratterizzata dalla presenza di depositi di età Pleistocenica appartenenti al "Livello Fondamentale della Pianura" (L.F.d.P.). Tali depositi, che formano la superficie topografica principale di buona parte della pianura bergamasca dando origine ad una superficie regolare che a partire dall'area

pedemontana degrada dolcemente verso sud, sono il risultato della coalescenza dei diversi conoidi alluvionali formatisi durante le fasi di fusione glaciale a partire dal margine prealpino. Questi depositi sono poi stati, in corrispondenza delle valli alpine principali, fortemente incisi a causa dell'intensa fase erosiva iniziata nell'Olocene, al termine della fase postglaciale.

Nel caso specifico, si segnala la presenza di consistenti livelli di depositi fluviali di natura prevalentemente ghiaioso-sabbiosa in corrispondenza della piana di esondazione del F. Brembo che, a valle dell'abitato di Ponte S. Pietro, si espandono raggiungendo nella zona dell'"Isolotto", una larghezza di oltre 600 m (Fig. 11).

Si evidenzia infine l'incisiva azione antropica a cui è stata soggetta la zona in esame a partire dagli anni '50 e che ha fortemente modificato l'assetto morfologico dell'area. Nel seguito si riporta una sintesi dei principali interventi antropici effettuati nella zona, descritti attraverso la documentazione fotografica raccolta dalla scrivente, grazie anche alla fattiva collaborazione del Sig. Assolari di Ponte S. Pietro che da anni, con il sostegno dei comitati civici locali, si batte per la salvaguardia e la riqualificazione della zona dell'Isolotto di Ponte S. Pietro.

Nei primi anni del '900 viene realizzata una traversa con forma a "V" in corrispondenza del punto di biforcazione del F: Brembo in 2 rami (vedi freccia in foto 1). Come si può ben immaginare il toponimo "isolotto" deriva proprio dalla conformazione morfologica originaria della zona dove la separazione in 2 rami del Brembo aveva comportato la formazione di un'isola centrale.



**Foto 1: Foto panoramica dell'area dell'Isolotto
(per gentile concessione dell'"Archivio storico dell'immagine di Ponte san Pietro)**

Intorno al 1930 l'originaria traversa a "V" viene sostituita con l'attuale opera di derivazione realizzata poco a valle del ponte di via Roma (foto 2).



**Foto 2: Traversa a valle del ponte di via Roma
(per gentile concessione dell'”Archivio storico dell'immagine di Ponte San Pietro)**

La realizzazione della nuova traversa porta, nel tempo, ad intensi fenomeni erosivi nel tratto di valle del F.Brembo che modificano in modo consistente la morfologia dei luoghi; le acque del Brembo vengono infatti totalmente convogliate lungo il ramo più occidentale (coincidente con l'attuale) ed il ramo orientale viene invece con il tempo “abbandonato”. L'Isolotto perde quindi la sua conformazione originaria trasformandosi in una grossa penisola con il fiume Brembo da un lato ed il torrente Quisa dall'altro.

Nelle foto aeree sottostanti si riporta un confronto tra la situazione del 1954 e quella del 1975.



**Foto 3: Confronto foto aeree storiche
(da Geoportale Regione Lombardia)**

Per limitare l'erosione in alveo a partire dagli anni '70, sono state messi in atto alcuni interventi che hanno portato:

- alla realizzazione di alcune opere trasversali in cls ("pennelli") (vedi foto aerea 1975 in foto 3) finalizzati a ridurre la pendenza dell'alveo e quindi limitare i fenomeni erosivi;
- al ripristino del "ramo abbandonato" attraverso consistenti lavori di scavo con l'intento di riequilibrare le portate del Brembo.

Purtroppo nessuno dei due interventi ha avuto esito positivo; il primo perché le opere trasversali si sono rivelate poco efficaci e, in tempi abbastanza rapidi, sono state scalzate o ricoperte dai sedimenti, mentre il secondo per la presenza di livelli di "Ceppo" in alcuni tratti dell'alveo che non hanno consentito la riattivazione del "ramo abbandonato".

Se si confrontano infine le foto aeree "1975" e "2015" si nota che l'assetto morfologico dell'area dell'"Isolotto" risulta in costante evoluzione; si osserva in particolare un graduale aumento dei fenomeni erosivi in corrispondenza della sponda destra del Brembo (vedi frecce in foto 4) che comportano lo spostamento dell'alveo del Brembo verso est.

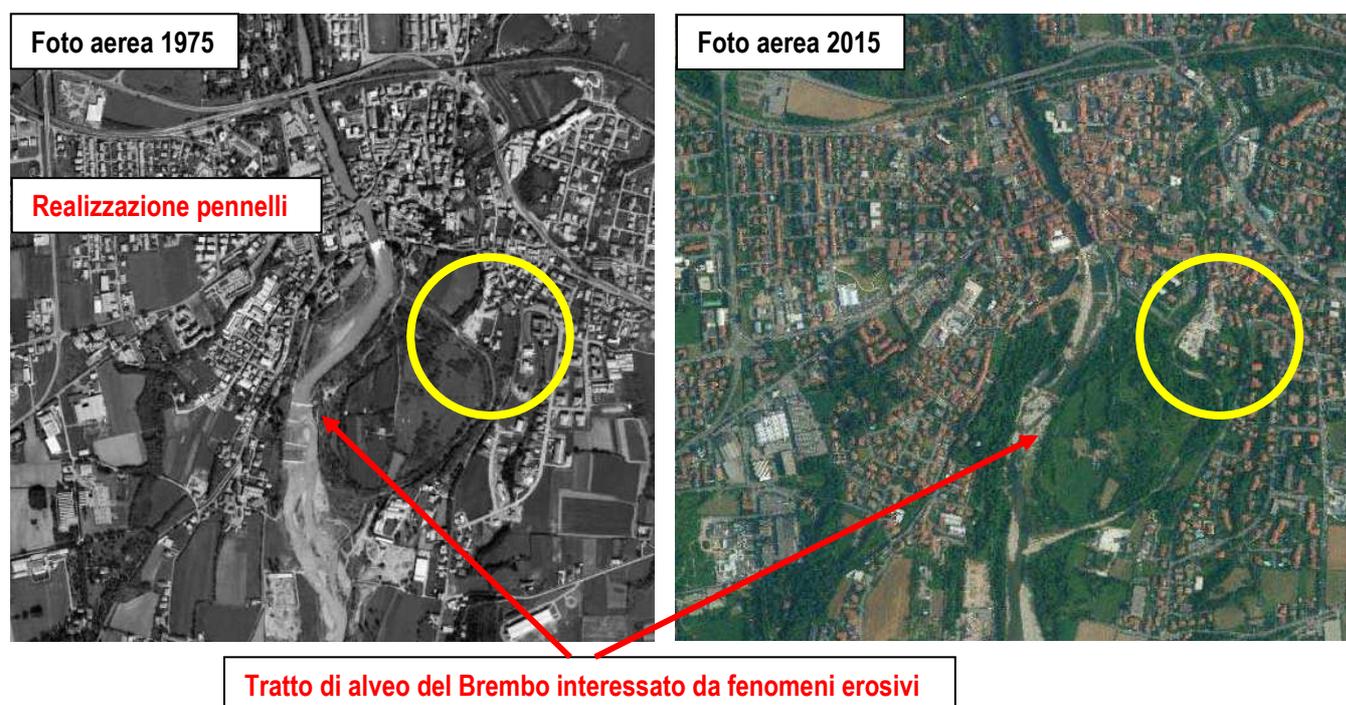


Foto 4: Confronto foto aeree storiche con individuazione delle principali modifiche morfologiche (da Geoportale Regione Lombardia)

Anche relativamente al torrente Quisa si osserva una significativa modifica dell'andamento del corso d'acqua specie nel tratto immediatamente a valle di via Marena (vedi cerchio giallo in foto 4). In questo caso tali modifiche morfologiche potrebbero essere connesse anche al forte grado di antropizzazione a cui l'area in esame è stata soggetta in questi ultimi 50 anni.

3.1 Rilievo geologico-geomorfologico di dettaglio dell'area in esame

Durante i sopralluoghi effettuati in sito si è proceduto a ricostruire un quadro dettagliato della geologia e della geomorfologia della zona oggetto di studio. Come descritto nel successivo capitolo 4, lo studio ha previsto anche l'esecuzione di indagini geognostiche in sito finalizzate alla caratterizzazione geologico-geotecnica dei terreni interessati dal progetto in esame.

Rimandando per gli aspetti geotecnici ai successivi capitoli, nel seguito si riporta una sintesi delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche raccolte nel corso del rilievo di terreno.

Come illustrato nella carta geologico-geomorfologica di figura 12, la passerella di attraversamento del T. Quisa in progetto è prevista a circa 180 m dallo sbocco del Quisa nel F. Brembo.

Dal punto di vista geomorfologico l'elemento che più caratterizza l'area in esame è rappresentato dalla presenza del F. Brembo che scorre in direzione N-S e del T. Quisa, suo immissario in destra idrografica.

Come descritto in dettaglio nel precedente paragrafo 3.1 l'area in esame è stata soggetta, a partire dai primi del '900, a significativi interventi antropici che hanno modificato in modo significativo la morfologia dei luoghi.

In particolare, nell'allegata carta geomorfologica di Fig. 12 sono state cartografate, oltre agli elementi geologici principali, anche quelli geomorfologici ed antropici che caratterizzano l'area in esame.

Facendo riferimento in particolare al tratto di T. Quisa interessato dalla passerella in progetto, è importante evidenziare la presenza, sulla sponda destra del torrente, di un significativo orlo di scarpata attivo.



Foto 5: scarpata fluviale attiva in sponda destra del T. Quisa in corrispondenza dell'area interessata dalla passerella in progetto.

CARTA GEOLOGICA E GEOMORFOLOGICA DI DETTAGLIO

SCALA 1:5.000

Elementi geologici

DEPOSITI FLUVIALI E FLUVIOGLACIALI

-  **Alluvioni attuali** (Olocene)
a) ghiaie prevalenti b) sabbie e limi prevalenti
-  **Depositi fluviali - Sintema del Po** (Pleistocene Sup. - Olocene):
Depositi fluviali e di esondazione appartenenti all'Unità Postglaciale
Ghiaie a supporto clastico in prevalenti strati planari
-  **Depositi fluvio-glaciali - Supersintema di Lenna** (Pleistocene Sup.):
Ghiaie a prevalente supporto clastico, con matrice sabbiosa o sabbioso-limosa
-  **Depositi fluvio-glaciali - Unità di Ponte S.P.** (Pleistocene Medio-Sup.):
Ghiaie a prevalente supporto clastico, con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa, carbonatica

Elementi geomorfologici

-  Orlo di scarpata fluviale attivo
-  Orlo di scarpata fluviale inattivo
-  Traccia di paleoalveo

Forme di origine antropica

-  Scogliera in grossi massi intasata in cls
-  Muro in cls
-  Opere idrauliche trasversali (briglie, traverse)
-  Accumuli di depositi fluviali
-  Ubicazione passerella in progetto

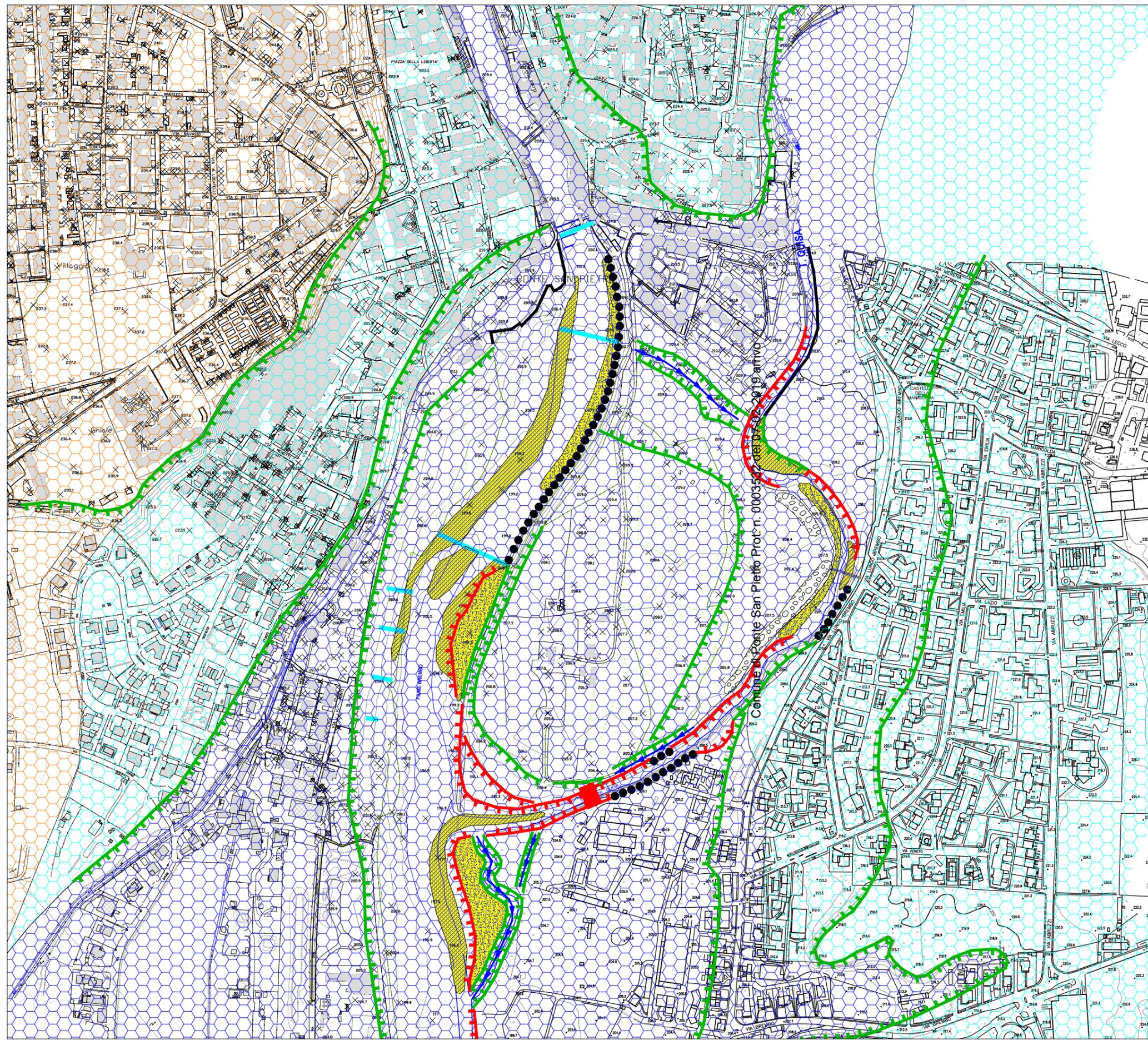


Fig. 12
PASSERELLA SUL T. QUISA
Carta geomorfologica dell'area di interesse

Come si può osservare anche dalle successive foto 6 e 7 dove si riporta, relativamente al tratto in esame, un confronto tra la situazione “2014” e “2017”, si nota la costante evoluzione a cui questo tratto di sponda è soggetto.



Foto 6: scarpata fluviale attiva in sponda destra del T. Quisa in corrispondenza dell'area interessata dalla passerella in progetto (vista da valle).

Prendendo come riferimento la pianta indicata dalla freccia rossa in foto 6, si osserva un arretramento della sponda destra del T. Quisa con associato fenomeno erosivo della scarpata fluviale.

Anche nel tratto di valle, verso lo l'immissione del Quisa nel Brembo (foto 7), i fenomeni di erosione in corrispondenza della sponda destra sono significativi.



Foto 7: scarpata fluviale attiva in sponda destra del T. Quisa in corrispondenza dell'area interessata dalla passerella in progetto (vista da monte).

Per quanto riguarda infine gli aspetti idraulici del corso d'acqua si rimanda alla "RELAZIONE IDRAULICA, *luglio 2018*" redatta a firma dell'Ing. Fenaroli nell'ambito del presente progetto, per ottenere il nulla osta idraulico da parte dell'UTR Bergamo.

4. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO: METODOLOGIE E RISULTATI

A seguito di un primo sopralluogo eseguito nell'area è stato predisposto un programma di indagini in sito finalizzato a valutare le caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione e la categoria di sottosuolo dell'opera in progetto.

Nell'area destinata alla realizzazione della passerella, si è proceduto quindi all'esecuzione di:

- n° 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo con esecuzione di prove SPT in foro in corrispondenza della sponda destra del T. Quisa;
- n° 1 stendimento sismico MASW in corrispondenza della sponda sinistra del T: Quisa;

I punti di indagine sono indicati nella figura seguente

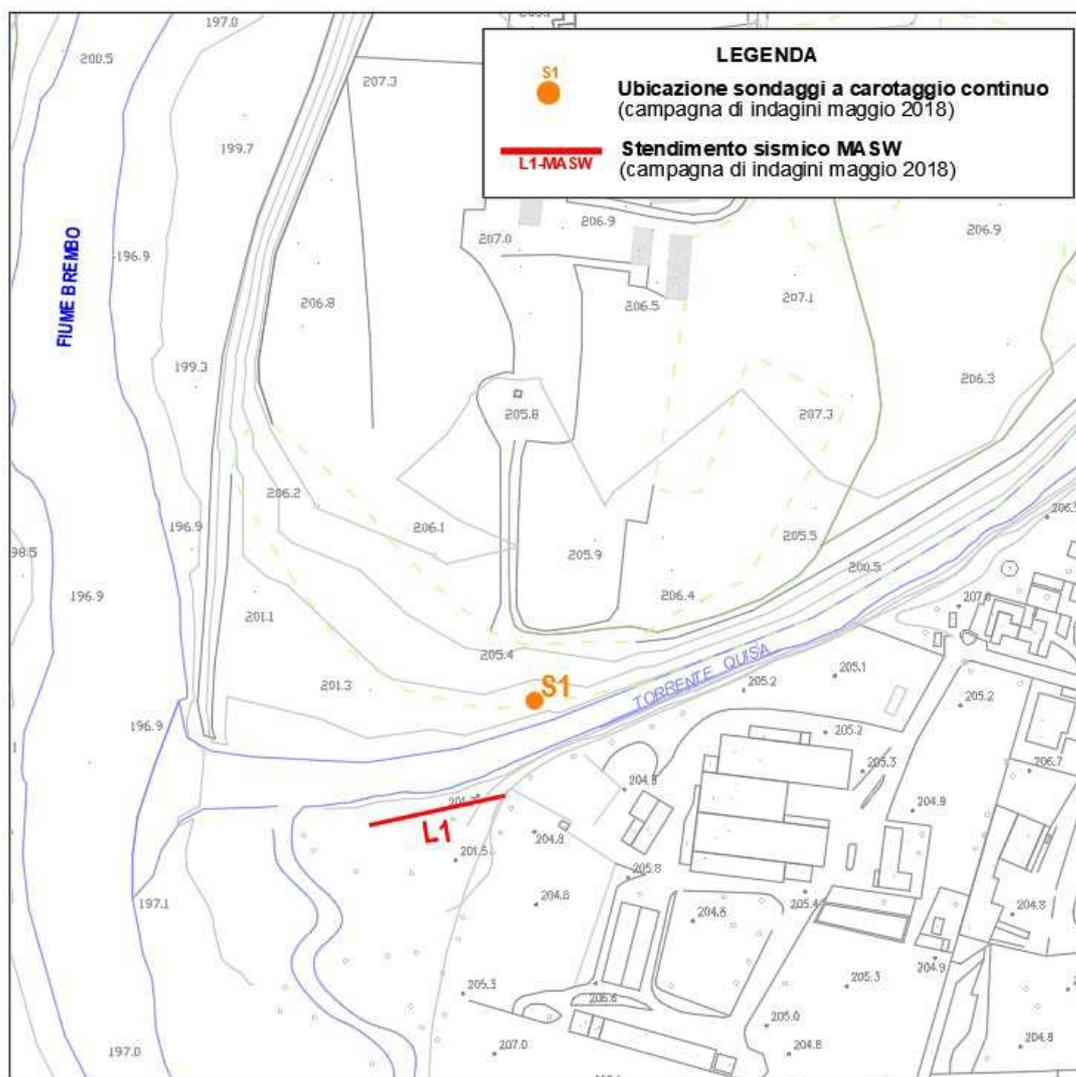


Fig. 13: Planimetria con ubicazione dei punti di indagine

4.1 Metodologie per l'esecuzione delle indagini in sito

4.1.1 Sondaggio a carotaggio continuo

Per l'esecuzione del sondaggio è stata utilizzata una sonda tipo Comacchio cingolata. La perforazione è stata eseguita utilizzando un carotiere semplice di diametro esterno pari a 101 mm, con corona Widia, ed una tubazione di rivestimento di $\phi 127$ mm. I materiali recuperati sono stati disposti in apposite cassette catalogatrici e fotografati; si è quindi proceduto alla descrizione stratigrafica di dettaglio del sondaggio riportata (Allegato A).

4.1.2 Prove SPT in foro

Per l'esecuzione delle prove SPT (Standard Penetration Test) è stata utilizzata un'attrezzatura standard (direttamente montata sulla sonda), costituita da un campionatore Raymond avvitato ad una batteria di aste di $\phi 50$ mm, da un maglio del peso di 63.5 kg, con testa di battuta e guida con un sistema di sganciamento automatico. L'altezza di caduta libera è di 76 cm.

Il numero di colpi N necessario per una penetrazione del campionatore pari a 30 cm, successivamente ad una prima infissione dinamica di 15 cm per il posizionamento, è il dato assunto come indice di resistenza alla penetrazione N_{SPT} .

4.1.3 Indagine sismica MASW

L'attrezzatura utilizzata in campagna è costituita da un sismografo a 24 canali, 24 geofoni a frequenza variabile e pari a 4,5 Hz, cavi con take-out distanziati di 3 metri, mazza e piastra di battuta. Il sismografo ha possibilità di "stack" degli impulsi sismici, filtraggio digitale programmabile (per la riduzione dei rumori) e guadagno verticale del segnale (in ampiezza) con sensibilità tra 1 e 100 decibel. La registrazione dei dati in digitale, con formato in uscita pari a 24 bit, viene effettuata su PC sul quale vengono successivamente elaborati i dati.

L'indagine ha previsto un punto di energizzazione in andata, posto a 2 metri dal primo geofono.

Acquisizione delle onde sismiche per interpretazione MASW

L'acquisizione della velocità delle onde di taglio (V_s) avviene per mezzo di indagine sismica a rifrazione con metodo MASW, mediante energizzazione del sottosuolo e registrazione degli arrivi delle onde rifratte in corrispondenza di geofoni verticali. Questi sono stati disposti secondo un allineamento con interasse tra i geofoni di 2 metri, in questo modo la base sismica ha avuto una lunghezza pari a 50 m.

Modalità interpretativa

L'elaborazione dei dati sismici con metodo MASW è stata effettuata per mezzo del software SWAN che, mediante la trasformata di Fourier, è in grado di fornire indicazioni sulla suddivisione delle unità litologiche del sottosuolo mediante l'individuazione delle onde V_s .

Interpretazione qualitativa delle indagini geofisiche

E' necessario sottolineare che l'interpretazione delle indagini geofisiche viene fatta nell'ipotesi che gli strati del sottosuolo siano omogenei, orizzontali e con superfici di separazione piano

parallele. Nell'area indagata le condizioni sopra riportate sono rispettate quasi del tutto.

Si rammenta infine come, in ogni caso, la valutazione delle velocità e degli spessori dei singoli strati viene effettuata con un margine di incertezza, insita proprio nei metodi geofisici, quantificabile in un errore pari al 10-15 %.

Rappresentazione dei dati sismici con metodo MASW

Al fine di fornire i valori delle Vs, necessarie per la caratterizzazione sismica del sito, è stata realizzata una stesa sismica di lunghezza pari a 50 m con distanza intergeofonica pari a 2 m. L'energizzazione è stata effettuata ad entrambi degli estremi dello stendimento ad una distanza di 2 m dal primo geofono mediante una mazza di 10 kg.

4.2 Risultati delle indagini geognostiche

Come anticipato nel precedente paragrafo 4.1, il sondaggio S1 è stato effettuato in corrispondenza della sponda destra del T. Quisa, in prossimità della spalla della passerella in progetto (vedi ubicazione in Fig. 13).

Dall'analisi della stratigrafia riportata in Allegato A è possibile riconoscere, alla base di un primo livello di suolo, i seguenti orizzonti principali:

Orizzonte 1: tra 0.30 e 1.10 m: Sabbia limoso argillosa con abbondanti frammenti vegetali parzialmente decomposti;

Orizzonte 2: tra 1.10 e 4.50 m: Ghiaia in matrice sabbiosa con litici poligenici di diametro medio pari a 4-5 cm;

Orizzonte 3: tra 4.50 e 5.10 m: Sabbia con ghiaia color nocciola (diametro medio litici 3-4 cm);

Orizzonte 4: tra 5.10 e 8.00 m: Ghiaia in matrice sabbioso-limosa con aumento del diametro dei clasti procedendo verso la base della sequenza.

Nel corso dell'esecuzione del sondaggio S1 sono state effettuate anche 2 prove SPT in foro per verificare le caratteristiche geotecniche dei terreni in corrispondenza del piano di fondazione della struttura in progetto. I risultati sono riportati nella tabella seguente:

Sondaggio (sigla)	Profondità (m)	N1	N2	N3	N _{SPT}
S1	4.50	50	RIFIUTO	RIFIUTO	RIFIUTO
S1	6.00	RIFIUTO	RIFIUTO	RIFIUTO	RIFIUTO

E' importante evidenziare fin d'ora che nel corso dell'esecuzione del sondaggio è stato individuato il livello di falda ad una profondità di circa 3.00 m dal piano campagna attuale.

4.3 Risultati delle indagini geofisiche MASW

In data 20 aprile 2018 è stata effettuata un'indagine geofisica tipo MASW al fine di caratterizzare dal punto di vista dinamico i terreni dell'area oggetto dell'intervento, lungo la sponda sinistra del Torrente Quisa nel Comune di Ponte San Pietro (BG).

Nello specifico è stata disposta la realizzazione di una base sismica denominata "L1" (Fig. 13 e foto 8) attrezzata con geofoni con registrazione verticale e ubicata sulla sponda del torrente Quisa.



Foto 8: ubicazione dello stendimento MASW L1

In corrispondenza della linea è stata realizzata un'indagine sismica applicando la metodologia MASW descritta nel precedente paragrafo 4.1.3 che consente, attraverso opportune elaborazioni, di risalire alla velocità di propagazione delle onde S (onde di taglio).

In particolare la stesa sismica ha una lunghezza pari a 50 m con distanza intergeofonica pari a 2 m. L'energizzazione è stata effettuata ad entrambi degli estremi dello stendimento ad una distanza di 2 m dal primo geofono mediante una mazza di 10 kg.

Di seguito si riporta il sismogramma cumulato di ciascuna acquisizione, filtrato di eventuali disturbi di fondo.

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito poi di estrapolare la trasformata di Fourier, di seguito riportata, dalla quale si risale alla curva di dispersione che, confrontata con quella teorica, mediante sovrapposizione, consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

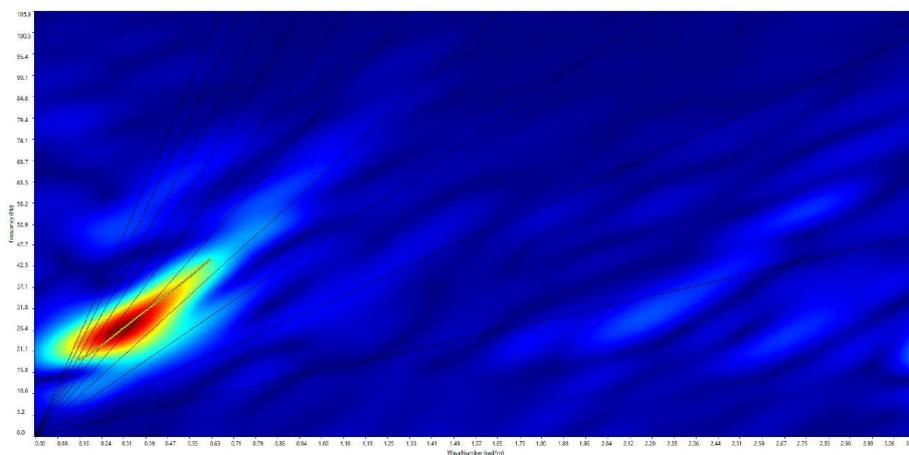
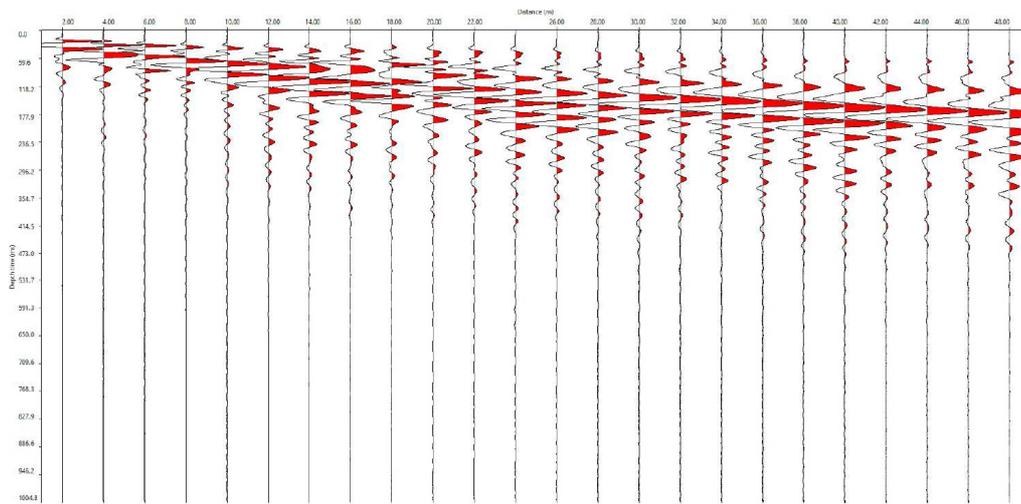


Fig. 14: Sismogramma della base sismica MASW

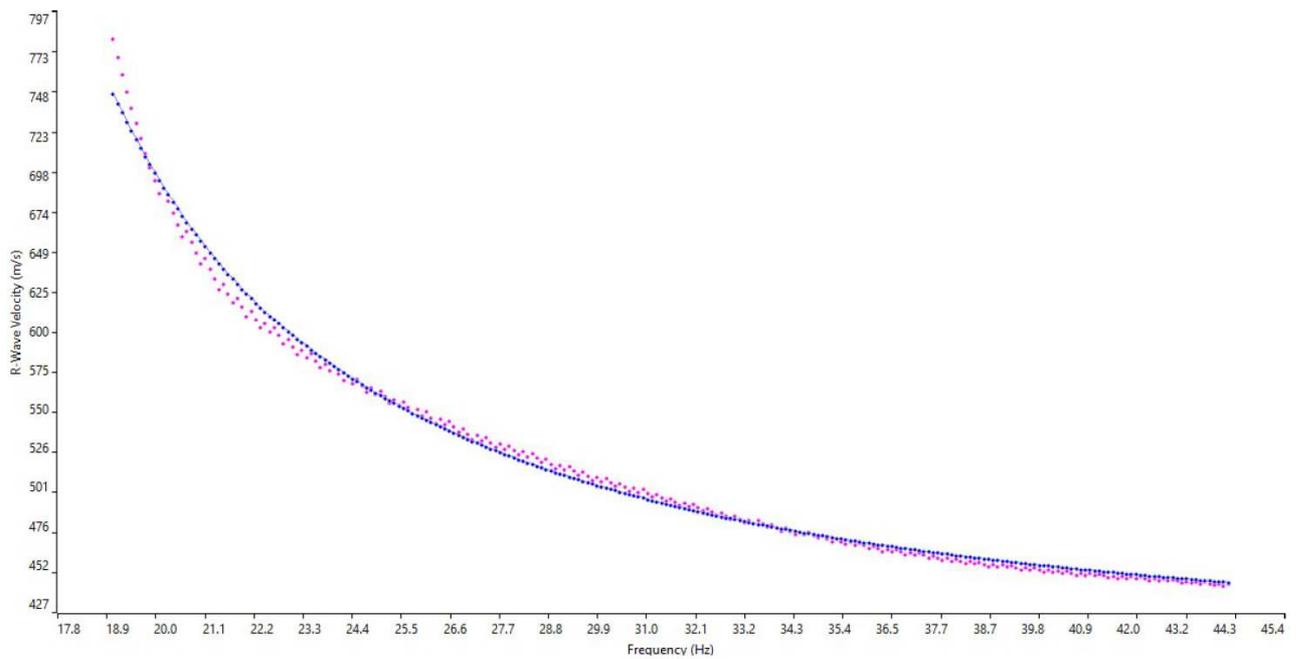


Fig. 15: Curva di dispersione della base sismica L1 (in magenta curva dispersione ottenuta, in blu quella calcolata)

Dalla sovrapposizione della curva di dispersione si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come indicato nella figura e tabella seguente:

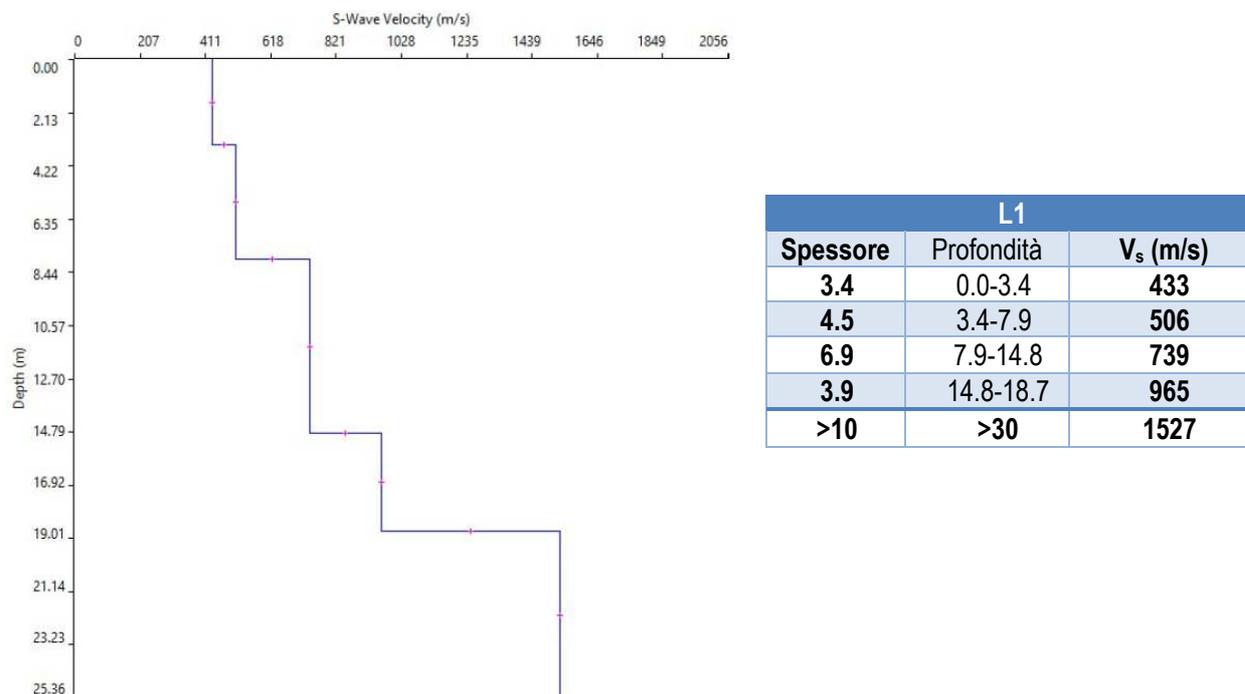


Fig. 16: Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica L1

4.4 Individuazione della categoria di sottosuolo (NTC 2018)

Come anticipato in precedenza l'esecuzione dell'indagine geofisica è stata finalizzata oltre alla verifica dell'assetto stratigrafico dell'area, alla definizione della categoria di suolo dei terreni di fondazione.

A tale proposito si è fatto in particolare riferimento alle recenti "NTC 2018" che suddividono i suoli di fondazione in cinque classi (A, B, C, D, E) in base alle loro caratteristiche stratigrafiche ed alla velocità media delle onde sismiche di taglio (trasversali), ovvero alle $V_{s,eq}$:

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

dove:

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo

$V_{s,i}$ = Velocità dell'onda di taglio i-esimo strato

N = Numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Nel caso in esame, il valore di Vs è stato calcolato con un valore H=15 m e si è ottenuta una

Vs,eq pari a 570 m/s da piano campagna. Secondo lo schema presente nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17/01/2018), **i terreni indagati risultano appartenere alla categoria di sottosuolo di tipo B:**

“Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà con la profondità e da valori Vs,eq compresi tra 360 m/s e 800 m/s”.

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

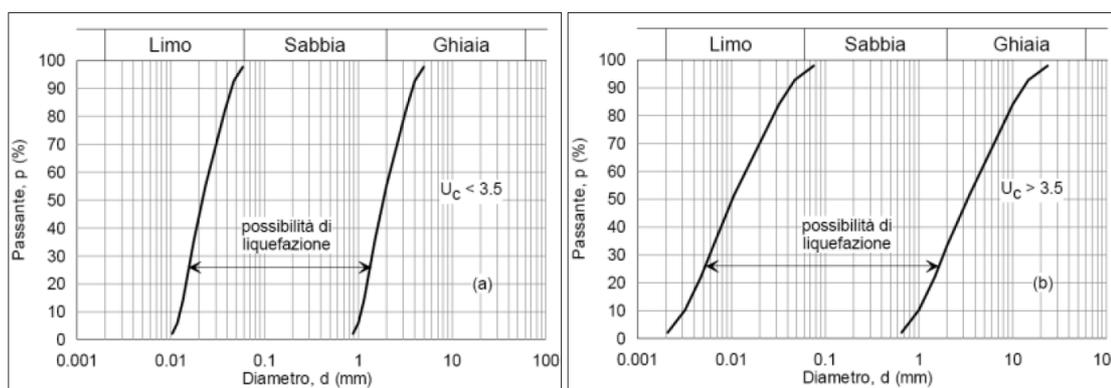
4.5 Verifica del potenziale di liquefazione

Il fenomeno della liquefazione è governato dalla generazione e dall'accumulo di eccessi di pressione interstiziale, in occasione di un terremoto, in sabbie e sabbie limose, sature e poco addensate. I dati sperimentali di letteratura mettono in evidenza che l'incremento della pressione interstiziale avviene in risposta alle sollecitazioni cicliche tangenziali a cui un elemento di volume di terreno è sottoposto in condizioni non drenate durante lo scuotimento sismico. Per tale elemento di volume, il valore finale della pressione interstiziale è funzione delle caratteristiche del moto sismico, cioè ampiezza, contenuto in frequenza e numero di cicli, ovvero durata.

Per la determinazione del potenziale di liquefazione dei terreni di fondazione, sono state considerate le “*circostanze di esclusione*” dalla verifica alla liquefazione elencate al punto 7.11.3.4.2 del D.M. 17/01/2018. Secondo il suddetto punto è possibile non effettuare la verifica alla liquefazione quando si manifesta, in ordine, almeno una delle seguenti condizioni:

- comma 1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;*
- comma 2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;*
- comma 3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N_1) $60 \leq 30$ oppure $q_{CIN} > 180$, dove (N_1) 60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{CIN} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;*
- comma 4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a), nel caso di*

terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Figura 7.11.1(b) (nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$ (vedi figura seguente).



Data la presenza in affioramento e in sondaggio di materiali di natura prevalentemente ghiaiosa è da escludere, per il sito in esame, l'occorrenza di possibili fenomeni di liquefazione, essendo verificata la circostanza di esclusione di cui al comma 4 del punto 7.11.3.4.2 del D.M. 17/01/2018.

4.6 Ricostruzione del modello geologico del terreno

A partire dalle indagini di terreno effettuate in corrispondenza del sito in esame e consistite nella ricostruzione dei caratteri geologico-geomorfologici locali descritte nel capitolo 3 e nella ricostruzione delle caratteristiche stratigrafiche e sismiche (individuate attraverso l'esecuzione di specifici indagini in sito, Cap. 4), si è arrivati alla definizione del modello geologico del terreno in corrispondenza della passerella in progetto, rappresentato dalla "sezione geotecnica" schematica illustrata nella figura seguente:

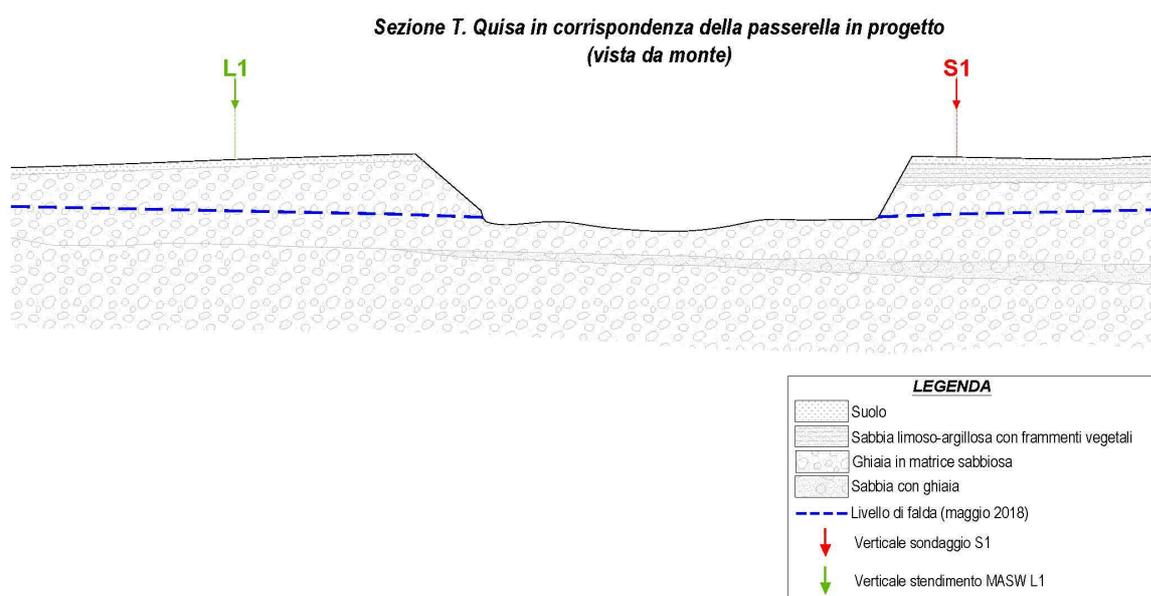


Fig. 17: Sezione geotecnica schematica in corrispondenza della passerella in progetto

Come anticipato in precedenza, si sottolinea che nel corso dell'esecuzione del sondaggio S1 il

livello freatico è stato individuato ad una profondità di circa 3.0 m dal piano campagna attuale (vedi stratigrafia in Allegato A).

E' evidente però che tale livello risulta fortemente condizionato dal regime idraulico del T. Quisa. A favore di sicurezza, nelle successive elaborazioni di carattere geotecnico si è quindi deciso di considerare il livello di falda coincidente con il piano campagna attuale.

5. STIMA DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE ATTRAVERSO L'UTILIZZO DELLA PROCEDURA PREVISTA DALL'ALLEGATO 5 - D.G.R. 9/2616/2011

L'analisi di 2° livello per l'area oggetto dell'intervento, prevede una caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione, consentendo l'individuazione di aree in cui la normativa nazionale risulta sufficiente o insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale (Fattore di amplificazione F_a calcolato superiore a F_a di soglia comunale fornito da Regione Lombardia). Per tali aree, in fase di progettazione, si dovrà procedere ad indagini ed approfondimenti di 3° livello o, in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore.

Il valore di F_a si riferisce agli intervalli di periodo tra 0.1-0.5s (strutture basse, regolari e piuttosto rigide) e 0.5-1.5s (strutture più alte e flessibili) in funzione del periodo proprio delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale.

La procedura per la verifica degli effetti litologici tramite l'impiego delle schede predisposte dalla Regione Lombardia (punto 2.2.2 dell'Allegato 5 alla d.g.r. 30 novembre 2011 n. IX/2616 "Analisi e valutazione degli effetti sismici di sito in Lombardia finalizzate alla definizione dell'aspetto sismico nei P.G.T."), necessita della conoscenza della litologia prevalente dei materiali presenti in sito, della stratigrafia del sito e dell'andamento delle V_s con la profondità fino a valori pari o superiori a 800 m/s (ottenuta utilizzando metodi di indagine diretti ed indiretti, in grado di fornire un modello geologico e geofisico del sottosuolo attendibile) e dello spessore e velocità di ciascuno strato.

La procedura prevede in primo luogo la **determinazione del modello geofisico del sito** (andamento della velocità delle onde di taglio V_s con la profondità) che nel caso specifico è stata definita mediante un'apposita campagna di indagini geofisiche illustrata nel precedente capitolo 4.

A partire dai dati di input sopra riportati si è proceduto preliminarmente alla validazione delle condizioni di base imposte dalla procedura prevista dalla normativa previste dall'allegato 5 della D.G.R. n. 9/2616, e successivamente al calcolo del fattore di amplificazione F_a utilizzando le correlazioni F_a -T degli abachi di riferimento.

Sulla base del confronto tra le curve dell'andamento delle velocità delle onde di taglio con la profondità misurate nel sito, le evidenze stratigrafiche e le curve di riferimento regionali, è stata scelta la scheda di valutazione per il litotipo "**Ghiaiosa**" (Fig. 18).

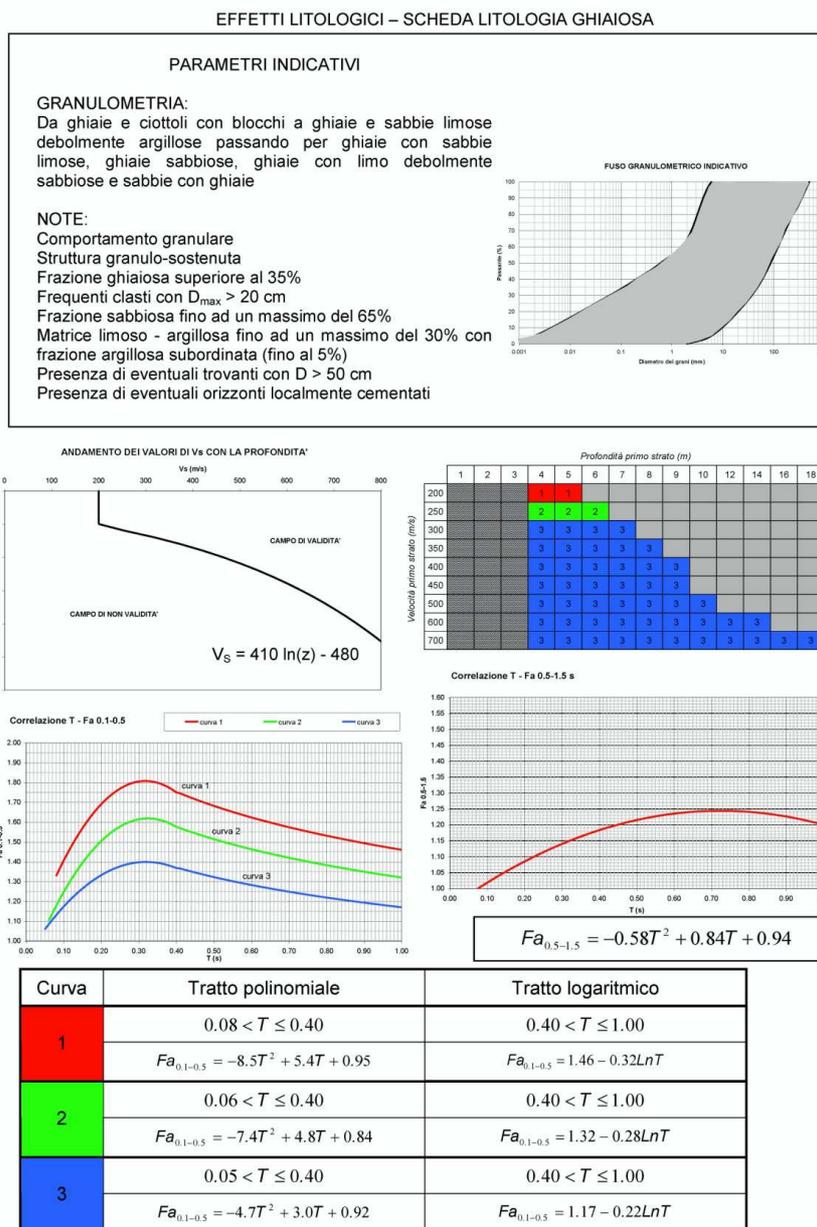


Fig. 18: Scheda sperimentale per litotipo Ghiaioso secondo quanto definito da Regione Lombardia

Per il calcolo del periodo proprio di sito T, necessario per l'utilizzo della scheda di valutazione, è stata considerata la di velocità di propagazione delle onde di taglio V_s fino alla profondità per la quale si registra un valore pari a o superiore a 800 m/s.

Per il calcolo del periodo proprio di sito si è utilizzata la seguente relazione:

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

Applicando la relazione sopra riportata, per l'area oggetto dello studio si ottiene un valore di periodo proprio di sito $T=0.10s$.

Per il calcolo del fattore di amplificazione litologico è necessario dapprima individuare lo spessore e la velocità di propagazione delle onde di taglio dello strato superficiale, definito come

il primo strato a partire dalla superficie avente spessore minimo di 4m. Qualora non si dovesse riconoscere uno strato di spessore adeguato è necessario procedere alla individuazione di uno strato superficiale equivalente avente spessore adeguato, mediando gli strati individuati attraverso le indagini sismiche. A tale strato si assegna una velocità di propagazione delle onde di taglio pari alla media pesata delle velocità dei singoli strati che lo costituiscono.

Per l'ambito di intervento, è stata individuata una velocità di circa 433 m/s da assegnare al primo strato per il calcolo del fattore di amplificazione.

Sulla base dei valori di spessore e velocità di propagazione delle onde di taglio dello strato superficiale, si individuano le equazioni da impiegare per il calcolo del valore di Fa per strutture aventi periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5 s per strutture aventi periodo proprio compreso tra 0.5 e 1.5 s.

Nel caso in esame le equazioni individuate, che corrispondono alla curva 3 di cui alla scheda per "litotipo Ghiaioso" riportata in Fig. 18, sono mostrate di seguito:

T 0.1-0.5s

Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico
1	$0.08 < T \leq 0.40$	$0.40 < T \leq 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -8.5T^2 + 5.4T + 0.95$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.46 - 0.32LnT$
2	$0.06 < T \leq 0.40$	$0.40 < T \leq 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -7.4T^2 + 4.8T + 0.84$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.32 - 0.28LnT$
3	$0.05 < T \leq 0.40$	$0.40 < T \leq 1.00$
	$Fa_{0.1-0.5} = -4.7T^2 + 3.0T + 0.92$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.17 - 0.22LnT$

To.5-1.0s

$$Fa_{0.5-1.5} = -0.58T^2 + 0.84T + 0.94$$

Utilizzando le equazioni sopra riportate a partire dai valori di periodo proprio di sito precedentemente determinati e dal valore di velocità e profondità del primo strato, si sono determinati i valori del coefficiente di amplificazione litologica Fa di seguito mostrati:

Periodo proprio struttura	
0.1-0.5s	0.5-1.5s
1.2	1.0

Per i comuni di Ponte S. Pietro e Curno, i valori di soglia del Fattore di amplificazione Fa forniti dalla Regione Lombardia, differenziati per suoli di fondazione e per periodi, sono i riportati nella seguente tabella:

Valori di Fa di soglia per periodi compresi tra 0.1 e 0.5 s				
Comune	Suolo di tipo B	Suolo di tipo C	Suolo di tipo D	Suolo di tipo E
Ponte S. Pietro	1.5	1.9	2.3	2.0
Curno	1.5	1.9	2.3	2.0

Valori di Fa di soglia per periodi compresi tra 0.5 e 1.5 s				
Comune	Suolo di tipo B	Suolo di tipo C	Suolo di tipo D	Suolo di tipo E
Ponte S. Pietro	1.7	2.4	4.3	3.1
Curno	1.7	2.4	4.3	3.1

Per procedere al confronto dei valori di soglia con i valori del coefficiente di amplificazione litologica precedentemente determinati, arrotondati alla prima cifra decimale, occorre sommare la variabilità statistica pari a 0.1 s come precisato nella procedura regionale. I valori così ottenuti sono mostrati nella seguente tabella in cui sono messi a confronto con i valori di soglia definiti per i comuni di Ponte S. Pietro e Curno per terreni di categoria B:

	Periodo proprio struttura	
	0.1-0.5s	0.5-1.5s
Valore soglia comunale Suolo tipo B	1.5	1.7
Valore calcolato da livello 2	1.2	1.0

Il valore del fattore di amplificazione litologica F_a ricavato sia per strutture con periodo proprio compreso tra 0.1 e 0.5s, sia per strutture con periodo proprio compreso tra 0.5 e 1.5s attraverso l'analisi di approfondimento di secondo livello è risultato inferiore al valore di soglia comunale. Tale risultato evidenzia la compatibilità energetica del metodo semplificato proposto dalle NTC con i fenomeni attesi al sito.

Risulta pertanto sufficiente in fase di progettazione edilizia utilizzare lo spettro relativo alla categoria di sottosuolo corrispondente al V_{S30} misurato ovvero la categoria B.

6. VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO

6.1 Caratterizzazione e modellazione geotecnica secondo le nuove NTC 2018

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni le recenti NORME TECNICHE PER LA COSTRUZIONI D.M. 17/01/2018 (NTC 2018) forniscono specifiche indicazioni rispetto, sia alla fase di indagine, sia alla valutazione dei parametri geotecnici da adottare in fase di progettazione.

Per quanto riguarda la “fase di indagine” si sottolinea in particolare l’importanza di definire un adeguato piano di indagini, programmato in funzione del tipo di opera e/o intervento e che deve permettere la definizione del modello geotecnico di sottosuolo necessario per la progettazione.

A partire dai risultati dell’indagine, si deve poi procedere alla ricostruzione di un modello geotecnico di sottosuolo rappresentativo del volume significativo di terreno; tale modello potrà essere suddiviso in unità omogenee sotto il profilo fisico-meccanico, caratterizzate in funzione dello specifico problema geotecnico che si va ad affrontare. Nel modello geotecnico di sottosuolo devono essere anche definiti il regime delle pressioni interstiziali e i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Le NTC 2018 assegnano particolare importanza alla determinazione dei parametri “caratteristici” specificando che essi devono derivare da “...una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato. I valori caratteristici delle proprietà fisiche e meccaniche da attribuire ai terreni devono essere dedotti dall’interpretazione dei risultati di specifiche prove di laboratorio su campioni rappresentativi di terreno e di prove e misure in sito.”.

6.2 Determinazione dei parametri geotecnici caratteristici per il caso in esame

Alla luce di quanto illustrato nel paragrafo precedente, a partire dai risultati forniti dalle indagini geognostiche descritte nei precedenti capitoli, sono stati ricavati i parametri geotecnici del terreno di fondazione. In particolare, a partire dai dati ottenuti dalle prove SPT in foro effettuate nel sondaggio S1 ed utilizzando le correlazioni più idonee proposte da diversi autori, sono stati stimati i parametri geotecnici caratteristici del sito in esame.

Rimandando all’allegato B per il dettaglio, nel seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti:

dove:

Sondaggio (sigla)	Sigla SPT	Profondità [m]	N _{SPT}	N _{SPT} corretto falda	Descrizione	parametri geotecnici caratteristici "K"						
						γ [t/m ³]	γ_{saturo} [t/m ³]	Dr [%]	ϕ [°]	Cu [Kg/cm ²]	Ed [Kg/cm ²]	E [Kg/cm ²]
S1	SPT1	4.50	100	57.5	Ghiaia sabbiosa	1.89	2.18	98	34.27	0.00	408.25	611.25
	SPT2	6.10	100	57.5	Sabbia con ghiaia	1.89	2.18	97	33.91	0.00	408.25	611.25

- γ = peso di volume del terreno
- ϕ = angolo d'attrito interno del terreno
- Cu = coesione non drenata
- E_{ed} = Modulo edometrico
- E = Modulo elastico

Come si può osservare dall'analisi della tabella sopraindicata, i valori stimati sono tipici di terreni incoerenti da moderatamente a molto addensati.

A favore di sicurezza si è ritenuto opportuno adottare, per le successive stime della capacità portante, il valore minimo ottenuto dalle diverse prove e corrispondente alla prova SPT2 effettuata ad una profondità di 6.30 m dal piano campagna:

PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI IN CORRISPONDENZA DEL PIANO DI FONDAZIONE

Sondaggio (sigla)	Sigla SPT	Profondità [m]	N _{SPT}	N _{SPT} corretto falda	Descrizione	parametri geotecnici caratteristici "K"						
						γ	γ _{saturo}	Dr	φ	Cu	Ed	E
						[t/m ³]	[t/m ³]	[%]	[°]	[Kg/cm ²]	[Kg/cm ²]	[Kg/cm ²]
S1	SPT2	6.10	100.00	57.5	Sabbia con ghiaia	1.89	2.18	97	33.91	0.00	408.25	611.25

Si noti infine che il valore N_{SPT} ricavato dalla prova è stato corretto per tener conto della presenza della falda utilizzando la seguente espressione:

$$N_{spt\ corretto} = 15 + 0.5 \cdot (N_{spt} - 15)$$

A partire dai parametri geotecnici caratteristici si sono poi determinati, per il livello di interesse, i **“parametri di progetto”** attraverso l'applicazione dei coefficienti parziali γ_m (tab. 6.2.II delle NTC 2018):

Sondaggio (sigla)	Sigla SPT	Profondità [m]	N _{SPT}	parametri geotecnici caratteristici "K"			CORRETTI CON COEFFICIENTE PARZIALE γ _m					
				γ _d [kg/m ³]	φ _d [°]	Cu _d [Kg/cm ²]	CASO M1			CASO M2		
							1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.40
S1	SPT2	6.10	57.50	1.89	33.91	0.00	1.89	33.91	0	1.89	28.27	0

Una volta che sarà definita tipologia e profondità delle fondazioni si potrà procedere alle verifiche agli stati limite ultimi SLU e di esercizio SLE.

7. CLASSIFICAZIONE SISMICA DELL'AREA

Per la caratterizzazione sismica del sito si è fatto riferimento alla sezione 3.2 "Azione sismica" delle Norme Tecniche per le Costruzioni che prevede, a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, l'individuazione delle azioni sismiche di progetto.

7.1 Stima della pericolosità sismica di base

Le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla "**pericolosità sismica di base**" del sito oggetto di intervento, a sua volta definita dalla probabilità che, in un fissato lasso di tempo (periodo di riferimento V_R espresso in anni), si verifichi un evento sismico di entità almeno pari al valore V_R prefissato. La probabilità è denominata "**Probabilità di eccedenza o di superamento nel periodo di riferimento**" P_{VR} .

Si tratta quindi di definire i parametri relativi:

1) all'opera in progetto:

- Tipo di costruzione e Vita nominale V_N ;
- Classe d'uso e coefficiente d'uso C_U ;
- Vita di riferimento V_R ;
- Tipo di verifica sull'opera in progetto;

2) ai fattori di amplificazione sismica locale:

- Categoria di sottosuolo;
- Condizioni topografiche;

per poi procedere:

- al calcolo delle forme spettrali a_g , F_0 , T^*_C per il sito
- alla definizione dei coefficienti sismici S_s e C_C riguardanti le condizioni stratigrafiche
- all'individuazione dei parametri per la progettazione sismica A_{max} , K_h , K_v

7.1.1 Parametri caratteristici dell'opera in progetto

Tipo di opera e Vita nominale V_N

La vita nominale di un'opera V_N è intesa come il numero di anni nel quale la struttura purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata (Par. 2.4.1 delle NTC 2018).

La vita nominale dei diversi tipi di opere è riportata nella tabella seguente:

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Con riferimento al caso in esame, è stato adottato un valore di $V_N \geq 50$ anni

Classe d'uso e coefficiente d'uso C_U

Nel caso in esame siamo in presenza di un edificio senza funzioni pubbliche in cui si prevedono normali affollamenti; facendo riferimento alle indicazioni contenute nelle NTC 2018 (par. 2.4.2) è quindi stata adottata la **Classe d'uso II**.

A partire dalla classe d'uso dell'edificio è poi possibile ricavare il coefficiente d'uso C_U , utilizzando la tabella 2.4.II contenuta nelle NTC 2018 (par. 2.4.3)

Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso C_U

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Per il

caso in esame, $C_U = 1,0$

Vita di riferimento V_R

Le azioni sismiche per ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N * C_U$$

Se $V_R \leq 35$ anni, si pone comunque $V_R = 35$ anni

Considerando che, per il caso in esame, l'opera in progetto è di tipo ordinario ($V_N = 50$ anni) e si è in presenza di una classe d'uso II ($C_U = 1.0$), si ottiene un valore di V_R pari a;

$$V_R = 50 * 1.0 = 50 \text{ anni}$$

Tipo di verifica sull'opera in progetto

Questo parametro si riferisce alla tipologia dell'opera che si prevede di realizzare. Il caso in esame rientra tra le **opere di fondazione**.

Nella tabella sottostante vengono sintetizzati i parametri relativi all'opera in progetto descritti in dettaglio nei paragrafi precedenti:

parametri opera in progetto	
Tipo di costruzione	2
Vita nominale V_N	50 anni
Classe d'uso	II
Coefficiente d'uso C_U	1.0
Vita di riferimento V_R	50 anni
Tipo di verifica sull'opera in progetto	Opere di fondazione

7.1.2 Fattori di amplificazione sismica locale

Gli effetti della risposta sismica locale possono essere valutati con metodi semplificati oppure eseguendo specifiche analisi. Nel caso in esame si è adottato il metodo semplificato, basato sull'esame della categoria di sottosuolo, delle condizioni topografiche e delle condizioni

stratigrafiche del sito in esame.

Categoria di sottosuolo

La categoria di sottosuolo si ricava a partire dal valore di V_{s30} di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. Per il caso in esame tale valore è stato determinato sulla base dell'indagine sismica descritta nel capitolo 4, da cui è risultato:

$$V_{s30} = 570 \text{ m/s}$$

In base alla tabella 3.2.II contenuta nelle NTC 2008 e riportata nel seguito, il sito in esame ricade in **categoria di suolo B**.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

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

Condizioni topografiche

Per la determinazione dell'amplificazione sismica è necessario tenere in considerazione anche dei fattori morfologici locali che possono modificare le caratteristiche del moto sismico, filtrando le onde di passaggio dal "bedrock" alla superficie. Nel caso di condizioni topografiche semplici come quelle del caso in esame, che è caratterizzato da deboli pendenze, è possibile adottare la classificazione contenuta nelle NTC 2018 e riportata nel seguito:

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Il sito in esame ricade in **categoria T1**.

7.2 Stima dell'effetto sismico per l'opera in progetto

7.2.1 Forme spettrali di sito

Le forme spettrali di sito sono costituite dai seguenti parametri:

- a_g accelerazione massima orizzontale al sito;
- 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 di accelerazione orizzontale.

per la stima dei quali bisogna considerare la posizione geografica del sito e fare riferimento, secondo la procedura dettagliata nel seguito, alla Tabella 1 del DM 17 gennaio 2018, che fornisce la terna dei valori di a_g , F_0 , T^*_c per un reticolo che copre tutto il territorio Nazionale.

A partire dalle coordinate geografiche del sito di interesse:

Passerella ciclopedonale sul T. Quisa – Ponte S.Pietro-Curno (BG)	Long = 9.6303	Lat= 45.7528
---	---------------	--------------

si sono individuati i 4 nodi della griglia di riferimento, all'interno dei quali ricade il sito di interesse (vedi Fig. 19).

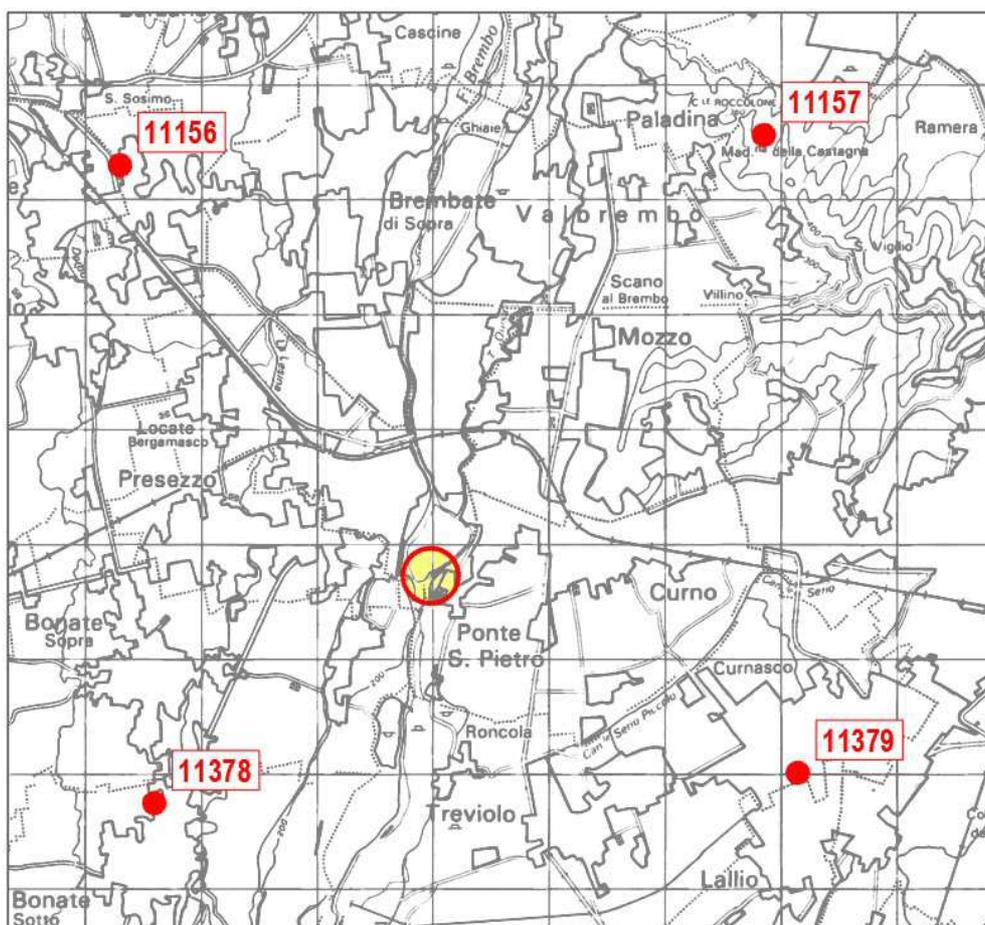


Fig. 19: Ubicazione sito di interesse rispetto ai punti della griglia di riferimento per la definizione dei parametri sismici secondo le NTC 2018

Attraverso la media ponderata (rispetto all'inverso della distanza) dei valori di a_g , F_0 e T_c^* forniti dalle NTC per ciascuno dei suddetti nodi, è poi possibile calcolare (per interpolazione rispetto ai valori di tabella) le “forme spettrali” nel sito di interesse per i vari tempi di ritorno T_R , relativi alla vita di riferimento V_R (vedi 7.1.1) ed alle diverse condizioni di “stato limite”:

Forme spettrali		V_R	SLE		SLU	
			SLO	SLD	SLV	SLC
Tempo di ritorno	T_R anni	50	30	50	475	975
Accelerazione di picco orizzontale	a_g [g]	0.036	0.028	0.036	0.100	0.132
Accelerazione di picco orizzontale	a_g [m/s ²]	0.354	0.273	0.356	0.981	1.296
Fatt.amplif. spettro acceleraz.orizz.	F_0 [-]	2.490	2.450	2.490	2.435	2.452
Periodo inizio Vcost spettro acc.orizz.	T_c^* [s]	0.210	0.198	0.210	0.272	0.280

NB: $V_R = V_N \times C_U$, ma sempre ≥ 35 ; a_g , F_0 , T_c^* x interpolaz.lineare su Ln T_R

7.2.2 Coefficienti sismici/Condizioni stratigrafiche

Anche le condizioni stratigrafiche, come quelle morfologiche locali, possono modificare le caratteristiche del moto sismico filtrando le onde di passaggio dal “bedrock”.

Le modifiche di tipo stratigrafico sono legate alla successione stratigrafica, alle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni, alla geometria del contatto tra substrato rigido ed i terreni sovrastanti ed alla geometria dei contatti tra gli strati di terreno.

La tabella 3.2.IV delle NTC indica le espressioni che permettono calcolare i coefficienti sismici S_s e C_c in funzione della categoria di sottosuolo:

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_s e di C_c

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

Conoscendo i fattori di amplificazione sismica locale (par. 7.1.2) e le forme spettrali di sito (7.2.1), mediante le espressioni della tabella precedente è possibile calcolare i relativi coefficienti sismici S_s e C_c :

Coefficienti sismici		SLE		SLU	
		SLO	SLD	SLV	SLC
Amplificazione stratigrafica	S_s	1.20	1.20	1.20	1.20
Coeff.funzione categoria sottosuolo	C_c	1.52	1.50	1.43	1.42
Amplificazione topografica	St	1.00	1.00	1.00	1.00

7.2.3 Determinazione dei parametri per la progettazione sismica

Utilizzando tutti i parametri precedentemente illustrati si arriva infine alla determinazione dei parametri da utilizzare per la progettazione sismica, costituiti da:

- accelerazione massima attesa al sito $A_{max} = a_g * g * S_s * S_t$ [m/ s²]
- coefficiente sismico orizzontale $K_h = \beta_s * A_{max}/g$
- coefficiente sismico verticale $K_v = \pm 0.5 \times k_h$

dove β_s è il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito ed è funzione sia di a_g , sia della categoria di sottosuolo (vedi tabella NTC riportata nel seguito).

Tab. 7.11.I – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20	0,20

I risultati ottenuti applicando le formulazioni riportate nelle NTC 2018 al caso in esame sono illustrati nel dettaglio in figura 20 e riassunti nella tabella seguente:

Parametri progettazione sismica		SLE		SLU	
		SLO	SLD	SLV	SLC
Accelerazione massima attesa al sito	A_{max} [m/s ²]	0.328	0.427	1.178	1.555
Coeff. riduzione dell'accelerazione massima A_{max}	β	0.200	0.200	0.240	0.240
Coeff. sismico orizzontale	$K_h = \beta \times A_{max}/g$	0.007	0.009	0.03	0.038
Coeff. sismico verticale	$K_v = \pm 0.5 \times k_h$	0.003	0.004	0.01	0.019

Si precisa infine che secondo le Norme Tecniche delle Costruzioni, il rispetto dei vari stati limite relativamente agli elementi strutturali, viene conseguito:

- nei confronti di tutti gli stati limite ultimi (SLU) quando sono soddisfatte le verifiche relative al solo SLV (salvaguardia vita).
- nei confronti di tutti gli stati limite di esercizio (SLE) quando sono soddisfatte le verifiche relative al solo SLD (danno).

	Contributo	dist	PESO	T _R =30			T _R =50			T _R =72			T _R =101			T _R =140			T _R =201			T _R =475			T _R =975			T _R =2475		
				a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C
1	P1 -11378	0.0355	0.305	0.082	0.748	0.061	0.106	0.760	0.064	0.124	0.766	0.067	0.148	0.748	0.073	0.171	0.754	0.076	0.202	0.751	0.079	0.291	0.745	0.082	0.386	0.748	0.085	0.531	0.763	0.089
2	P2 -11156	0.0470	0.231	0.059	0.568	0.044	0.077	0.577	0.048	0.090	0.584	0.051	0.106	0.570	0.055	0.123	0.573	0.055	0.142	0.575	0.060	0.204	0.568	0.065	0.270	0.566	0.065	0.374	0.577	0.067
3	P3 -11379	0.0434	0.250	0.072	0.607	0.050	0.094	0.619	0.052	0.114	0.607	0.057	0.135	0.607	0.060	0.157	0.607	0.062	0.187	0.604	0.065	0.271	0.602	0.067	0.355	0.614	0.070	0.485	0.627	0.072
4	P4 -11157	0.0507	0.214	0.060	0.527	0.043	0.077	0.533	0.045	0.092	0.531	0.047	0.109	0.524	0.051	0.126	0.529	0.054	0.149	0.522	0.056	0.215	0.520	0.058	0.284	0.524	0.060	0.390	0.537	0.062
			1.000	0.273	2.449	0.198	0.354	2.490	0.210	0.419	2.488	0.222	0.498	2.450	0.240	0.577	2.462	0.248	0.679	2.453	0.260	0.982	2.435	0.272	1.296	2.452	0.280	1.780	2.505	0.290

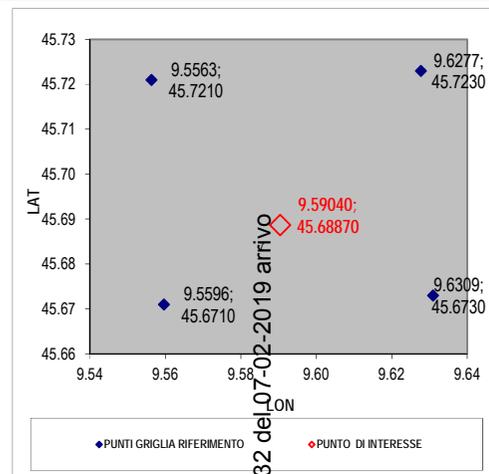
pti griglia	PUNTO DI INTERESSE	LON	LAT	T _R =30			T _R =50			T _R =72			T _R =101			T _R =140			T _R =201			T _R =475			T _R =975			T _R =2475		
				a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C	a _g	F ₀	T _C
1	11378			[m/s ²]	[-]	[s]	[m/s ²]	[-]	[s]																					
2	11156			[g]	[-]	[s]	[g]	[-]	[s]																					
3	11379	9.59040	45.68870	0.273	2.449	0.198	0.354	2.490	0.210	0.419	2.488	0.222	0.498	2.450	0.240	0.577	2.462	0.248	0.679	2.453	0.260	0.982	2.435	0.272	1.296	2.452	0.280	1.780	2.505	0.290
4	11157			0.028	0.036		0.036			0.043			0.051			0.059			0.069			0.100			0.132			0.181		

tipo coordinate interesse	0
0 = Geografiche	
1 = Gauss Boaga zona 1	
2 = Gauss Boaga zona 2	

Tipo di opera	2	-> V _N =50
Classe d'uso	II	-> C _U =1
Categoria Suolo	B	
Caratt.Sup.Topograf.	T1	
tipol.verifica	1	
1 = Fondaz, pendii, scavi		
2 = opere sostegno		
3 = opere sostegno non in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno		

V _N	1	Opere provvisorie, provvisionali, strutture in fase costruttiva (T>2 anni)	≤10
	2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥50
	3	Grandi Opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥100

C _U	I	Costruz. con presenza solo occasionale persone, edif.agricoli	0.7
	II	Costruz. con normali affollamenti, sz contenuti pericolosi, sza funz.pubbl. Ponti e infrastrutt non in classe III-IV, ferrovie non importanti, dighe con conseguenze collasso non rilevanti	1
	III	Costruz. con affollamenti significativi, con contenuti pericolosi. Reti viarie extraurb. non in classe IV, ponti e ferrovie importanti, dighe con conseguenze collasso rilevanti	1.5
	IV	Costruz. con funz.pubbl/strateg, industrie molto pericolose. Reti viarie A-B DM6792 e C tra capoluoghi provincia non serviti da A-B. Ponti e ferrovie strateg per vie comunicazione. Dighe strategiche per Acquedotti/Energia	2



Forme spettrali		V _R	SLE		SLU	
	T _R anni		SLO	SLD	SLV	SLC
Tempo di ritorno	T _R anni	50	30	50	475	975
Accelerazione di picco orizzontale	a _g [g]	0.036	0.028	0.036	0.100	0.132
Accelerazione di picco orizzontale	a _g [m/s ²]	0.354	0.273	0.356	0.981	1.296
Fatt.amplif. spettro acceleraz.orizz.	F ₀ [-]	2.490	2.450	2.490	2.435	2.452
Periodo inizio Vcost spettro acc.orizz.	T* _g [s]	0.210	0.198	0.210	0.272	0.280

NB: V_R=V_N x C_U, ma sempre ≥ 35; a_g, F₀, T*_g x interpolaz.lineare su Ln TR

Coefficienti sismici		SLE		SLU	
		SLO	SLD	SLV	SLC
Amplificazione stratigrafica	S _s	1.20	1.20	1.20	1.20
Coeff.funzione categoria sottosuolo	C _c	1.52	1.50	1.43	1.42
Amplificazione topografica	S _t	1.00	1.00	1.00	1.00

Stati limite			P _{VR} = probabilità superamento nel periodo di riferimento V _R
stati limite di esercizio SLE	SLO	Operatività	80%
	SLD	Danno	63%
stati limite ultimi SLU	SLV	Salvaguardia vita	10%
	SLC	Prevenzione e collasso	3%

Parametri progettazione sismica		SLE		SLU	
		SLO	SLD	SLV	SLC
Accelerazione massima attesa al sito	A _{max} [m/s ²]	0.328	0.427	1.178	1.555
Coeff. riduzione dell'accelerazione massima A _{max}	β	0.200	0.200	0.240	0.240
Coeff. sismico orizzontale	K _h = β x A _{max} /g	0.007	0.009	0.03	0.038
Coeff. sismico verticale	K _v = ± 0.5 x k _h	0.003	0.004	0.01	0.019

Figura 20: classificazione sismica del sito destinato di interesse

8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PRESCRIZIONE DI CARATTERE GEOLOGICO-TECNICO

Il presente studio redatto in conformità a quanto previsto dalle NTC 2018, ha avuto come scopo la caratterizzazione geologica e geotecnica dei terreni in previsione della realizzazione di una nuova passerella sul torrente Quisa in corrispondenza del settore meridionale dell'”Isolotto” tra Ponte San Pietro e Curno.

Lo studio ha innanzitutto analizzato gli **aspetti connessi alla pianificazione territoriale** (capitolo 2), facendo in particolare riferimento alle indicazioni contenute nei seguenti studi geologici comunali:

per il comune di Ponte S. Pietro (sponda destra T. Quisa):

“AGGIORNAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO effettuata ai sensi della D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 dal dr.geol. E. Granata, settembre 2016”.

per il comune di Curno (sponda sinistra T. Quisa):

“NUOVO AGGIORNAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO effettuata ai sensi della D.G.R. IX/2616 del 30/11/2011 dallo STUDIO CASTALIA, febbraio 2017”

da cui è risultato che:

- la passerella in progetto rientra in fascia fluviale A del PAI a cui corrisponde la CLASSE 4 di Fattibilità geologica;
- la pista ciclabile di collegamento tra le sponde del Quisa ricade invece in fascia fluviale C del PAI a cui corrisponde la CLASSE 3 di Fattibilità geologica;

Per quanto concerne poi gli **aspetti geologico-geomorfologici** relativi al sito in esame (capitolo 3) ci si è basati sull'analisi della documentazione esistente (in particolare cartografia geologica CARG e documentazione storica relativamente alla zona dell'”Isolotto”) e sull'effettuazione di sopralluoghi in sito. In sintesi, l'area in esame è caratterizzata dall'affioramento diffuso di ghiaie a supporto clastico in matrice limoso-argillosa e sabbiosa. Per quanto riguarda gli aspetti geomorfologici si segnala che la zona, a partire dai primi anni del '900, è stata oggetto di intense modificazioni di carattere antropico che hanno comportato significative modificazioni dell'assetto morfologico sia del F. Brembo che del T. Quisa. Relativamente a quest'ultimo si evidenzia in particolare che il corso d'acqua è tutt'oggi interessato da significativi fenomeni di erosione spondale che dimostrano la presenza di una dinamica morfologica ancora attiva.

La **valutazione dei parametri geotecnici dei terreni di fondazione** invece, il piano di indagine ha previsto l'esecuzione di 1 sondaggio a carotaggio continuo (comprensivo di SPT in foro) ed 1 stendimento sismico MASW che hanno consentito la ricostruzione del seguente schema stratigrafico:

profondità [m]	spessore strato [m]	Descrizione
0.00-0.30	0.30	Suolo di colore bruno
0.30-1.10	0.80	Sabbia limoso argillosa con abbondanti frammenti vegetali
1.10-4.50	3.40	Ghiaia in matrice sabbiosa con litici poligenici
4.50-5.10	0.60	Sabbia con ghiaia color nocciola
5.10-8.00	2.90	Ghiaia in matrice sabbioso-limosa

Nel corso dell'esecuzione del sondaggio è stato individuato il livello di falda ad una profondità di circa 3.00 m dal piano campagna attuale. Considerato però che tale livello risulta ovviamente fortemente condizionato dal regime idraulico del T. Quisa, a favore di sicurezza, nelle elaborazioni di carattere geotecnico si è deciso di considerare il livello di falda coincidente con il piano campagna attuale.

Per la **caratterizzazione geotecnica dei terreni** (capitolo 6) si è fatto specifico riferimento alle recenti **NORME TECNICHE PER LA COSTRUZIONI D.M. 17/01/2018 (NTC 2018)**. In particolare, a partire dalle risultanze dell'indagine in sito, si è proceduto alla determinazione dei **parametri "caratteristici"**, definiti come i parametri che rappresentano la miglior stima delle caratteristiche del terreno e riportati nella tabella seguente:

PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI IN CORRISPONDENZA DEL PIANO DI FONDAZIONE

Sondaggio (sigla)	Sigla SPT	Profondità [m]	N _{SPT}	N _{SPT} corretto falda	Descrizione	parametri geotecnici caratteristici "K"						
						γ	γ _{saturo}	Dr	φ	Cu	Ed	E
						[t/m ³]	[t/m ³]	[%]	[°]	[Kg/cm ²]	[Kg/cm ²]	[Kg/cm ²]
S1	SPT1	3.50	50.00	32.5	Ghiaia limoso-sabbiosa	1.7	2.1	65.9	29.3	0.0	195.0	237.50

A partire dai parametri geotecnici caratteristici si sono poi determinati i **"parametri di progetto"** attraverso l'applicazione dei coefficienti parziali γ_m (tab. 6.2.II delle NTC 2018):

Sondaggio (sigla)	Sigla SPT	Profondità [m]	N _{SPT}	parametri geotecnici caratteristici "K"			CORRETTI CON COEFFICIENTE PARZIALE γ _m					
							CASO M1			CASO M2		
				γ _d [kg/m ³]	φ _d [°]	Cu _d [Kg/cm ²]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.40
S1	SPT1	3.50	32.50	1.72	29.29	0.00	1.72	29.3	0	1.72	24.17	0

Per quanto riguarda infine la **classificazione sismica dell'area** destinata all'intervento edilizio, si è proceduto in primo luogo alla determinazione della categoria di sottosuolo attraverso l'esecuzione di un'indagine MASW (capitolo 4). Tale indagine ha permesso di stimare il valore di V_{Seq} :

$$V_{Seq} = 570 \text{ m/s}$$

da cui, in base alla tabella 3.2.II contenuta nelle NTC 2018, si è verificato che il sito in esame ricade in **categoria di suolo B**.

Prendendo poi riferimento la sezione 3.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, si è proceduto alla stima della "pericolosità sismica di base" del sito e dell'effetto sismico dell'opera in progetto, per arrivare alla determinazione dei parametri per la progettazione sismica illustrati nel dettaglio in figura 20 e riassunti nel seguito:

Parametri progettazione sismica			SLE		SLU	
			SLO	SLD	SLV	SLC
Accelerazione massima attesa al sito	A_{max} [m/s ²]		0.328	0.427	1.178	1.555
Coeff. riduzione dell'accelerazione massima A_{max}	β		0.200	0.200	0.240	0.240
Coeff. sismico orizzontale	$K_h = \beta \times A_{max}/g$	k_h	0.007	0.009	0.03	0.038
Coeff. sismico verticale	$K_v = \pm 0.5 \times k_h$	k_v	0.003	0.004	0.01	0.019

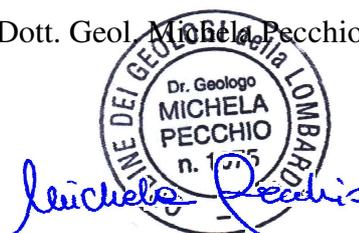
Sulla base delle considerazioni sopra esposte è in definitiva concludere che:

- non si evidenziano particolari criticità dal punto di vista geotecnico;
- sono presenti invece problematiche di tipo geologico-geomorfologico per la presenza di intensi fenomeni di erosione spondale nel tratto interessato dalla passerella in progetto. A questo proposito si consiglia quindi di impostare le fondazioni ad una quota inferiore rispetto al fondo alveo attuale e di proteggere entrambe le sponde della passerella in progetto con opportuna scogliera in massi ciclopici.

La scrivente si rende disponibili per eventuali sopralluoghi, particolarmente importanti durante l'apertura degli scavi. Questo permetterà di riscontrare eventuali situazioni anomale rispetto a quelle previste nella presente relazione e quindi formulare ulteriori raccomandazioni ed individuare eventuali proposte di intervento.

Bergamo, luglio 2018

Dott. Geol. Michela Pecchio



ALLEGATO A:
Stratigrafia sondaggio e documentazione fotografica

STRATIGRAFIA SONDAGGIO S1

Profondità da P.C. (m)		Spessore strati (m)	Colonna stratigrafica	Descrizione Stratigrafica	Prova SPT	Piezometro	Profondità falda	Prelievo campione N°	Cassa campioni N.	Note
0.30		0.30	*	Suolo di colore bruno						
1.0		0.80		Sabbia limoso argillosa con abbondanti frammenti vegetali parzialmente decomposti						
2.0				Ghiaia in matrice sabbiosa con litici poligenici (Ø med. 4-5 cm, Ø max 10-12 cm)						
3.0										1
4.0										
4.50		3.40		Sabbia con ghiaia color nocciola con litici poligenici (Ø med. 3-4 cm, Ø max 7-8 cm)	50, RIF.					
5.0		0.50		Ghiaia in matrice sabbiosa color grigio nocciola (Ø med. 1-2 cm, Ø max 5-6 cm)						
6.0		1.00		Ghiaia in matrice sabbioso-limosa color nocciola (Ø med. 3-4 cm, Ø max 7-8 cm)	RIF.					
7.0										2
8.0		1.90		FONDO FORO						
9.0										
10.0										



Sondaggio S1: da 0.00 m a 5.00 m



Sondaggio S1: da 5.00 m a 8.00 m

ALLEGATO B:
Parametri geotecnici dei terreni di fondazione

PARAMETRI PROVE SPT IN FORO

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA S1 (SPT a -4.50 m da piano campagna)

TERRENI INCOERENTI

Densità relativa

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Densità relativa (%)
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	Gibbs & Holtz 1957	98.43

Angolo di resistenza al taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	Malcev (1964)	34.27

Modulo di Young

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	D'Appollonia ed altri 1970 (Sabbia)	611.25

Modulo Edometrico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	Farrent 1963	408.25

Classificazione AGI

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Classificazione AGI
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	Classificazione A.G.I	MOLTO ADDENSATO

Peso unità di volume

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m ³)
Strato (1)	100	0.00-4.95	57.5	Meyerhof ed altri	1.89

Peso unità di volume saturo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m ³)
Strato (1) Strato	100	0.00-4.95	57.5	Terzaghi-Peck 1948-1967	2.18

STIMA PARAMETRI GEOTECNICI PROVA S1 (SPT a -6.30 m da piano campagna)

TERRENI INCOERENTI

Densità relativa

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Densità relativa (%)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Gibbs & Holtz 1957	96.79

Angolo di resistenza al taglio

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Angolo d'attrito (°)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Malcev (1964)	33.91

Modulo di Young

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo di Young (Kg/cm ²)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	D'Appollonia ed altri 1970 (Sabbia)	611.25

Modulo Edometrico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Modulo Edometrico (Kg/cm ²)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Farrent 1963	408.25

Classificazione AGI

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Classificazione AGI
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Classificazione A.G.I	MOLTO ADDENSATO

Peso unità di volume

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unità di Volume (t/m ³)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Meyerhof ed altri	1.89

Peso unità di volume saturo

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	Peso Unità Volume Saturo (t/m ³)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Terzaghi-Peck 1948-1967	2.18

Modulo di deformazione a taglio dinamico

Descrizione	NSPT	Prof. Strato (m)	N. Calcolo	Correlazione	G (Kg/cm ²)
Strato (1) Strato	100	0.00-6.30	57.5	Ohsaki (Sabbie pulite)	2930.90