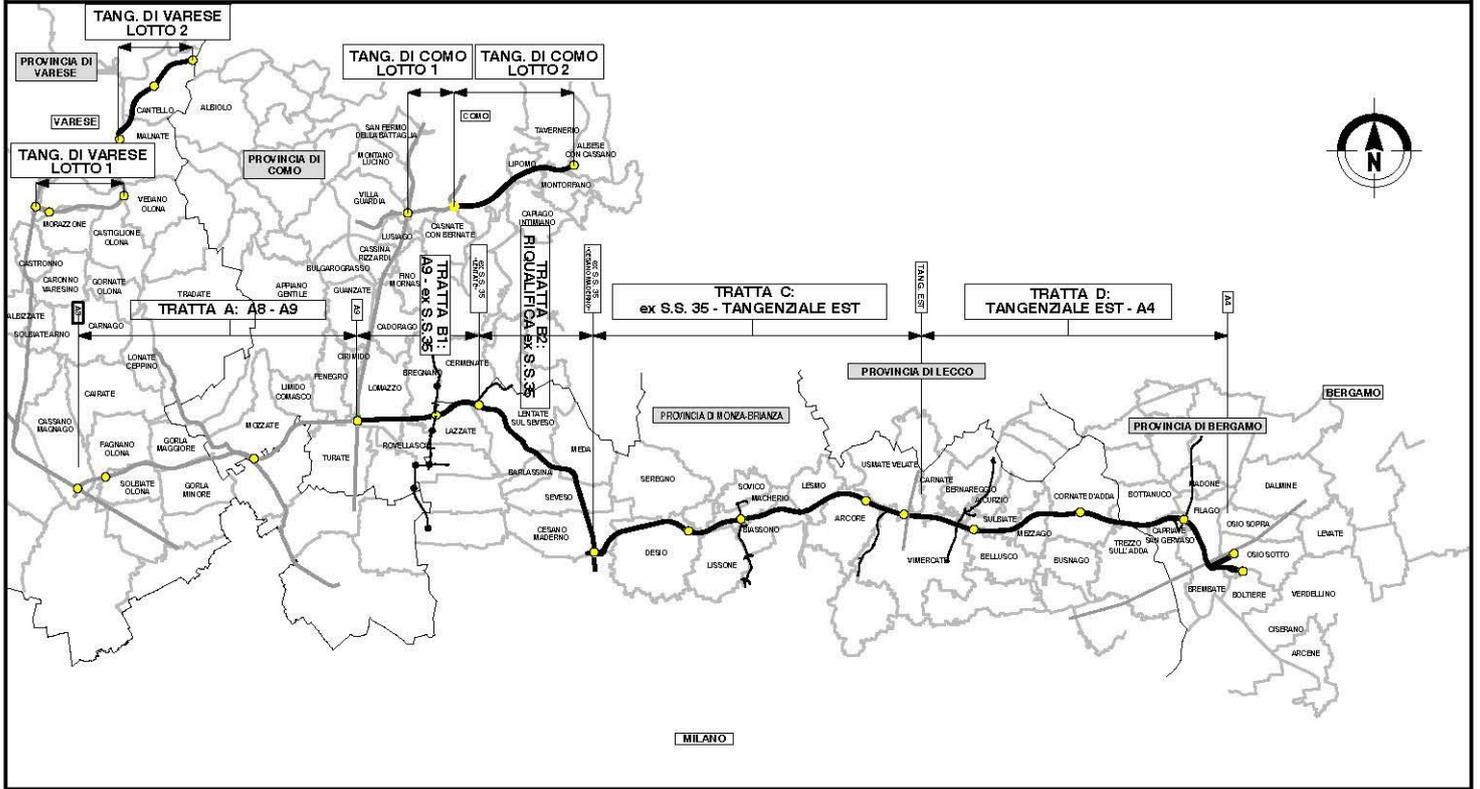


QUADRO DI UNIONE GENERALE



COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE DALMINE-COMO-VARESE-VALICO DEL GAGGIOLO E OPERE AD ESSO CONNESSE

CODICE C.U.P. F11B06000270007

PROGETTO ESECUTIVO TRATTA B2

RELAZIONE GEOLOGICA

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

| FASE PROGETTUALE | AMBITO | TRATTA | CATEGORIA | OPERA | PARTE DI OPERA | TIPO ELABORATO | PROGRESSIVA | REVISIONE ESTERNA |
|------------------|--------|--------|-----------|-------|----------------|----------------|-------------|-------------------|
| E | GG | B2 | 000 | GE00 | 000 | RS | 003 | A |

DATA 31 luglio 2023

SCALA

CONTRAENTE GENERALE

PEDELOMBARDA NUOVA S.c.p.A.

DATA

REVISIONE

| | | |
|----------------|--------------------------------|-----|
| 6 aprile 2023 | Prima edizione in bozza | A01 |
| 9 giugno 2023 | Emissione per aggiornamenti | A02 |
| 31 luglio 2023 | Revisione a seguito di RDV PLN | A03 |
| | | |
| | | |

ELABORAZIONE PROGETTUALE

PROGETTISTI
ing. E. Colasante.

**RESPONSABILE
INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI
SPECIALISTICHE**
Ing. Carlo Listorti



Redatto
dott. G. Broglioli

Visto
dott. L. Evangelisti

Aprovato
dott. W. Sandrucci

CONCESSIONARIO



PROGETTISTA





COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE
DALMINE – COMO – VARESE – VALICO DEL GAGGIOLO
E OPERE CONNESSE

PROGETTO ESECUTIVO

TRATTE B2, C, TRMI10/TRMI17/TRCO06

TRATTA B2

RELAZIONE GEOLOGICA

Sommario

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE | 4 |
| 1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE | 5 |
| 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 6 |
| 3.1 UNITA' STRATIGRAFICHE | 9 |
| 3.2 INQUADRAMENTO SISMICO GENERALE | 12 |
| 3.2.1 PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE | 14 |
| 4. MODELLO CONCETTUALE GEOLOGICO | 15 |
| 4.1 MODALITA' DI ELABORAZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO | 15 |
| 4.2 DESCRIZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO | 17 |
| 4.3 SEZIONI GEOLOGICHE TRASVERSALI AL TRACCIATO | 20 |
| 5 VALUTAZIONI QUALITATIVE SULLE CARATTERISTICHE LITOTECNICHE DELLE TERRE DA SCAVO | 22 |
| 6 PROBLEMATICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO | 25 |
| 6.1 IL FENOMENO DEGLI OCCHI POLLINI | 25 |
| 6.1.1 GENERALITA' SUGLI OCCHI POLLINI | 25 |
| 6.1.2 DIFFUSIONE DEL FENOMENO LUNGO IL TRACCIATO | 27 |
| 6.1.3 ANALISI DI SUSCETTIBILITA' AGLI OCCHI POLLINI | 28 |
| 6.1.4 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI E DEI RISCHI CONNESSI AGLI OCCHI POLLINI | 29 |
| 6.2 SCHEDE DI SINTESI PER TRATTE OMOGENEE | 29 |
| BIBLIOGRAFIA | 33 |
| APPENDICE A – OCCHI POLLINI | 34 |
| a.1 CARATTERISTICHE GENERALI | 34 |
| a.2 CONDIZIONI INFLUENTI LA GENESI E LO SVILUPPO DELLE CAVITA' SOTTERRANEE | 42 |
| a.3 CASO DI STUDIO IN ZONA INTERESSATA DA CAVITÀ TRA DEPOSITI ALLUVIONALI E TRATTI CEMENTATI (CEPPO) | 47 |

1. INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la relazione geologica di Progetto Esecutivo per la Tratta B2 e la viabilità connessa TRCO06 dell'Autostrada Pedemontana Lombarda e riporta considerazioni circa l'assetto geologico locale sulla base della cartografia geologica ufficiale (fogli CARG 1:50000 Seregno e Vimercate), dei dati bibliografici disponibili, di quelli raccolti presso gli enti competenti (Comuni, Regione), nonché di quelli rinvenuti durante le varie campagne di indagine geognostica e geofisica di Progetto Definitivo e dalle indagini di Progetto Esecutivo (cfr. elaborati EINB2000GE00000RS001 e EINB2000GE00000RS002), presentandone i tratti di maggiore interesse in relazione alla realizzazione dell'opera.

Nella relazione viene illustrato l'inquadramento geologico e stratigrafico generale dell'area attraversata dall'autostrada in oggetto con l'individuazione delle unità Allostratigrafiche affioranti, la ricostruzione del modello geologico concettuale e una descrizione di dettaglio del profilo geologico della tratta B2, basata sui dati derivanti dalle indagini di PD, integrate con quelli acquisiti nel corso delle indagini di PE. Infine, vengono proposte alcune schede di sintesi riportanti una valutazione delle criticità geologiche presenti lungo il tracciato, con particolare riguardo al fenomeno degli Occhi Pollini.

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Legge n° 1684/1962 e s.m. e i.; Provvedimenti per l'edilizia, con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- Legge n° 64/1974 e s.m. e i.; Provvedimenti per le costruzioni con Particolari prescrizioni per le zone sismiche
- AGI "Raccomandazione sulla programmazione ed esecuzione delle prove geotecniche", 1977
- D.M. Min. LL.PP. 11 Marzo 1988 – Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Circolare Min. LL.PP. 24 Settembre 1988, n° 30483 Legge 02/02/1974, n° 64, art. 1 D.M. 11/03/1988 - Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Legge 109/94 e s.m. e i; La nuova legge quadro in materia di lavori pubblici
- Decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE (G.U. n. 100 del 2 maggio 2006)
- Decreto legislativo 18 aprile 2016, n. 50, Codice dei contratti pubblici, (G.U. n. 91 del 19 aprile 2016)
- D.P.R. 554/99; Regolamento di attuazione della legge quadro in materia di lavori pubblici 11 febbraio 1994, n. 109, e successive modificazioni - (G.U. n. 98 del 28 aprile 2000)
- d.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207 -Regolamento di esecuzione ed attuazione del decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, recante «Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE». - (G.U. n. 288 del 10 dicembre 2010)
- Ordinanza Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 (20.03.2003), n. 3316 (02.10.2003), n. 3333 (02.02.2004), n. 3431 (10/05/2005) – "Primi elementi in materia di

criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” e s.m. e i

- Regione Lombardia - Direzione Generale Territorio e Urbanistica - L.R. 41/97 "Prevenzione del rischio geologico e sismico mediante strumenti urbanistici generali e loro varianti" - Direttive regionali in attuazione dell'art. 3 per lo studio geologico a supporto dei P.R.G.
- Deliberazione Giunta Regionale 29 ottobre 2001 - N. 7/6645 - Approvazione direttive per la redazione dello studio geologico ai sensi dell'art. 3 della L.R. 41/97

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'Autostrada Pedemontana Lombarda è una grande infrastruttura viaria che si va ad inserire nel territorio fortemente urbanizzato dell'hinterland settentrionale di Milano realizzando una connessione che parte dalla provincia di Varese fino ad arrivare alla periferia nord-orientale del capoluogo lombardo, raccordandosi alla A51.

La tratta B2 si sviluppa in sovrapposizione e sostituzione della SS35 "Milano-Meda", dall'interconnessione con la SS35 in località Lentate sul Seveso all'interconnessione con la SS35 in località Cesano Maderno, per circa 9,600 km complessivi. La riqualificazione dell'attuale superstrada SS 35 prevede modifiche di asse, altimetria e piattaforma, che in gran parte si traducono in sbancamenti laterali. Oltre all'intervento di autostradalizzazione della Milano-Meda è prevista anche la realizzazione di una nuova viabilità a carattere locale.

Il tracciato di progetto della tratta B2, visualizzato in Figura 1, si sviluppa in direzione NNO-SSE attraversando i territori dei comuni di Lentate sul Seveso (Cermenate viene lambita dall'interconnessione TRCO06), Barlassina, Meda, Seveso e Cesano Maderno. L'area interessata è situata nella media pianura Padana, a N della città di Milano. Dal punto di vista morfologico, il territorio risulta sub-pianeggiante, con quote comprese tra 270 m s.l.m. nella zona settentrionale e 200 m s.l.m. in corrispondenza del raccordo con la tratta C (svincolo di Cesano Maderno), con una pendenza media del 7‰ (Figura 1).

Gli elementi idrografici principali sono costituiti dal fiume Seveso e dal torrente Certesa. La valle del Seveso è quella che maggiormente caratterizza l'andamento morfologico del territorio in questo settore; essa viene attraversata dall'autostrada in comune di Meda. Il reticolo idrografico minore è sviluppato invece maggiormente nelle aree dei pianalti di Meda e delle Groane (cfr. per dettagli l'elaborato EGGB2000GE00000RS004 - Relazione geomorfologica).

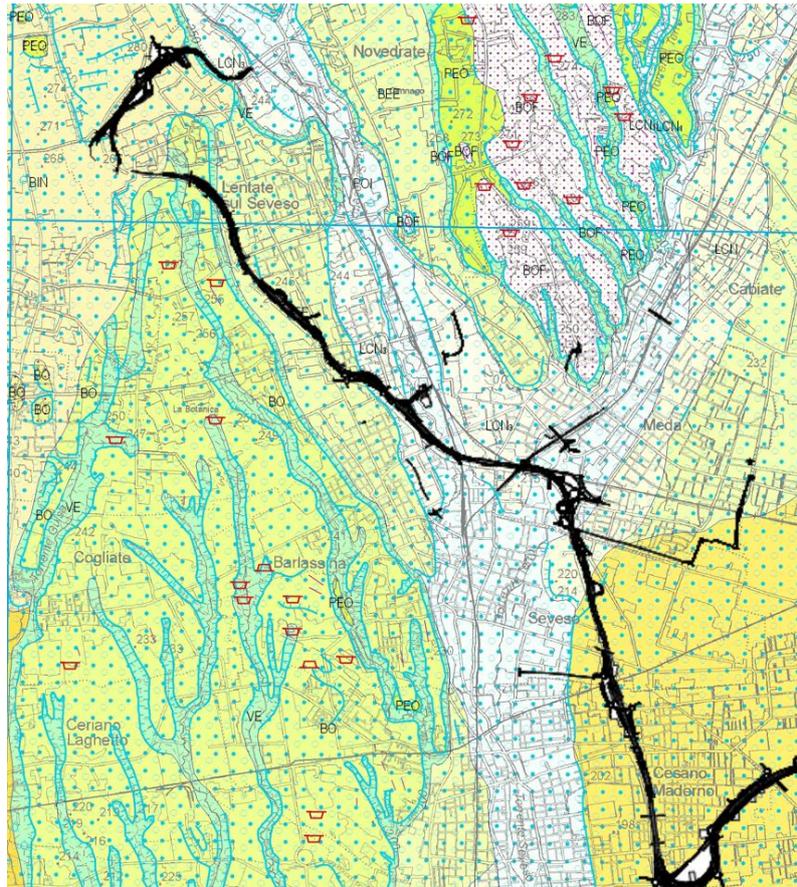


Figura 2 – stralcio della carta geologica 1:50000 (CARG) foglio 96 Seregno, lungo il tracciato della tratta B2

Per le unità più recenti (Pleistocene medio e superiore) i bacini di alimentazione sono differenti; ad esempio i depositi dell'Allogruppo di Besnate (BE) interessano buona parte della pianura fino a Carate, Monza e Milano, e sono collegati con le morene frontali del Seveso, mentre gli analoghi depositi provenienti da quello del Lambro ricoprono prevalentemente il settore adiacente, che si colloca più a Est, con quote anche di 15 m inferiori, come ad esempio avviene per il terrazzo pleistocenico di Albiate.

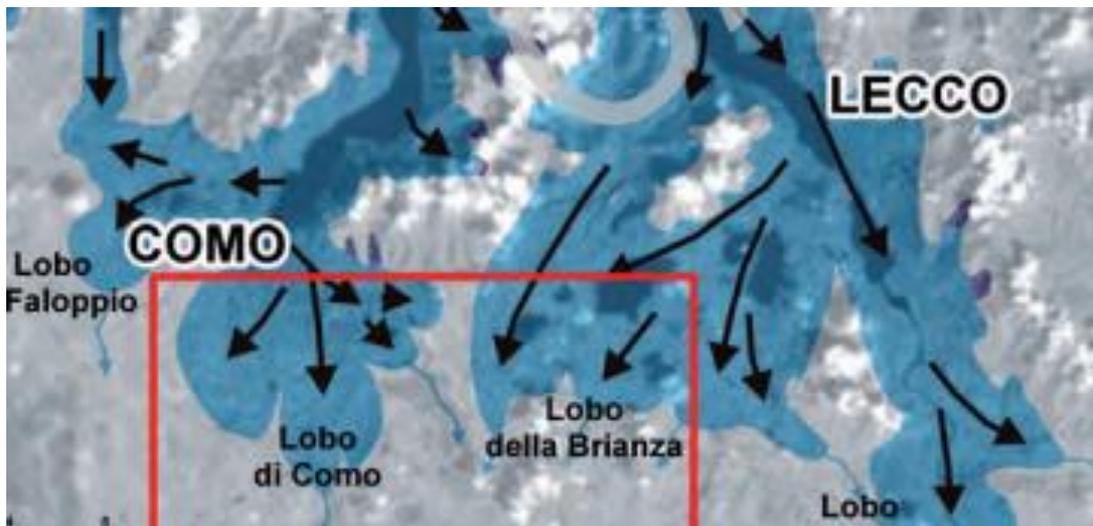


Figura 3 – Massima espansione dei ghiacciai nell'ultimo episodio glaciale (LGM), si evidenziano i diversi di alimentazione dei depositi fluvioglaciali presenti nell'area in oggetto (riquadro rosso). (dalle note illustrative del foglio CARG 96 Seregno)

Alla base della successione fluvioglaciale del Pleistocene-Medio superiore sopra descritta, sono presenti conglomerati di età Plesitocenico-inferiore/Pliocenica superiore ("Ceppo" Auct.), con spessori massimi nell'area in oggetto fino a 40-50 m (come emerge dalle sezioni del Foglio Seregno e dalle stratigrafie di pozzi per acqua profondi), caratterizzati da alternanza e giustapposizione di settori ben cementati e altri fortemente alterati e degradati. I conglomerati del Ceppo poggiano in discordanza su una successione costituita da un'alternanza di livelli di argille-argille sabbiose di colore grigio verdastro e livelli sabbioso-ghiaiosi (Villafranchiano Auct.). Il tetto dell'unità "Villafranchiana", caratterizzato da un andamento spiccatamente irregolare, non è stato raggiunto dai sondaggi delle campagne di indagine di PD e PE ad oggi disponibili; sulla base delle sezioni geologiche del foglio CARG Seregno e delle stratigrafie di alcuni pozzi profondi limitrofi al tracciato, si colloca ad una profondità attorno a 50-60 m da p.c.

Nella Figura 4 sono rappresentati schematicamente i rapporti fra le unità sedimentarie (alloformazioni) della zona, che vede al disopra di un substrato argilloso-limoso, una copertura di conglomerati ("Ceppo") il cui tetto è stato variamente inciso nel tempo da corsi d'acqua che hanno colmato le depressioni con depositi alluvionali. I conglomerati hanno natura leggermente differente e diversa età, come si può notare dalla Figura 5 che mostra una loro distribuzione fra il bacino del Seveso e quello della Molgora. Sono presenti a Ovest i conglomerati della Bevera e del Portichetto, mentre nel bacino del Lambro affiorano il Ceppo di Inverigo e a Est quello della Molgora. Come si osserva dalla figura, il substrato argilloso per un sollevamento tettonico relativamente recente è a quote più elevate nella zona orientale, e i conglomerati che su esso si appoggiano sono più antichi, quindi più alterati dai processi di dissoluzione. Analogamente i depositi alluvionali della zona orientale risultano più antichi e alterati di quelli del bacino del Seveso. Tale fatto comporta un maggiore degrado ed esposizione al dissesto procedendo dalla Valle del Seveso a quella della Molgora.

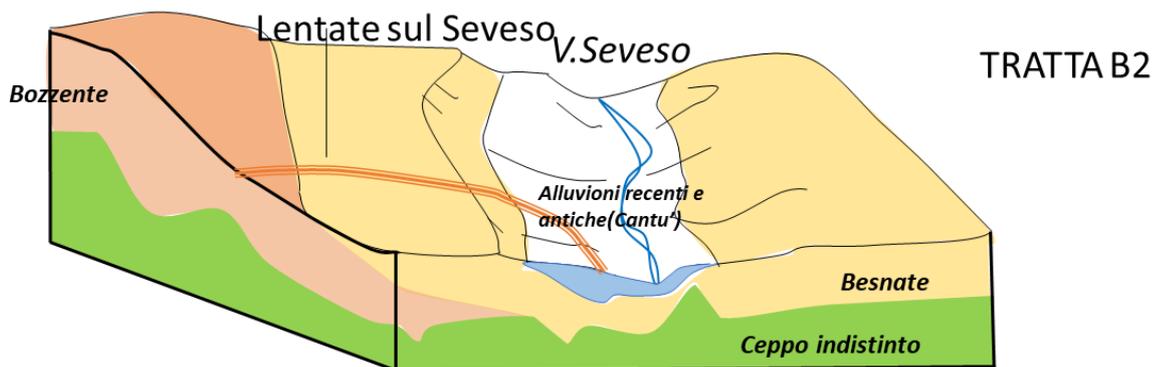
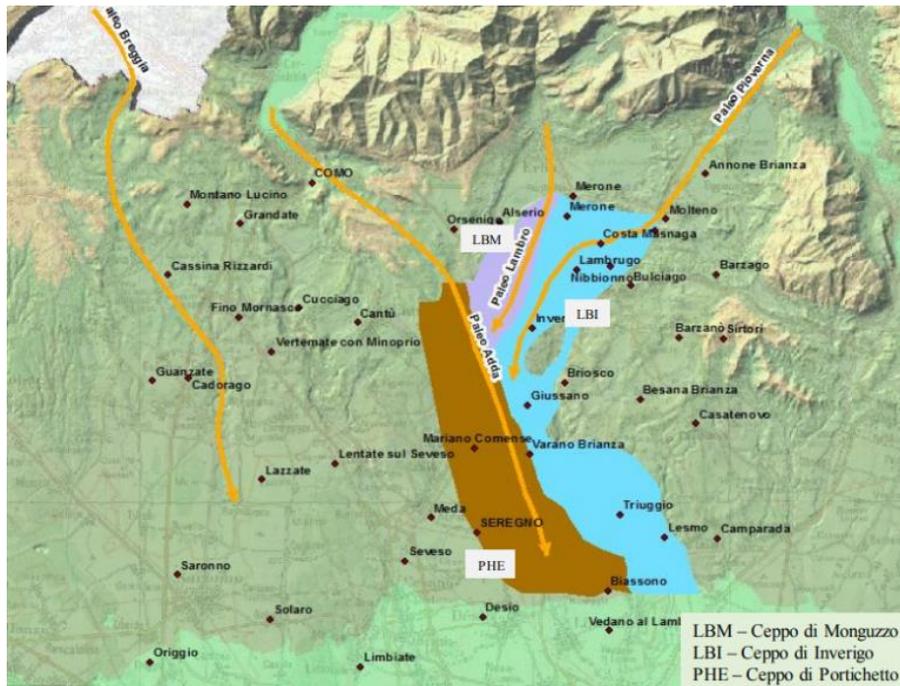


Figura 4: ricostruzione tridimensionale della geologia per la tratta B2



PLIOCENE SUPERIORE – PLEISTOCENE INFERIORE

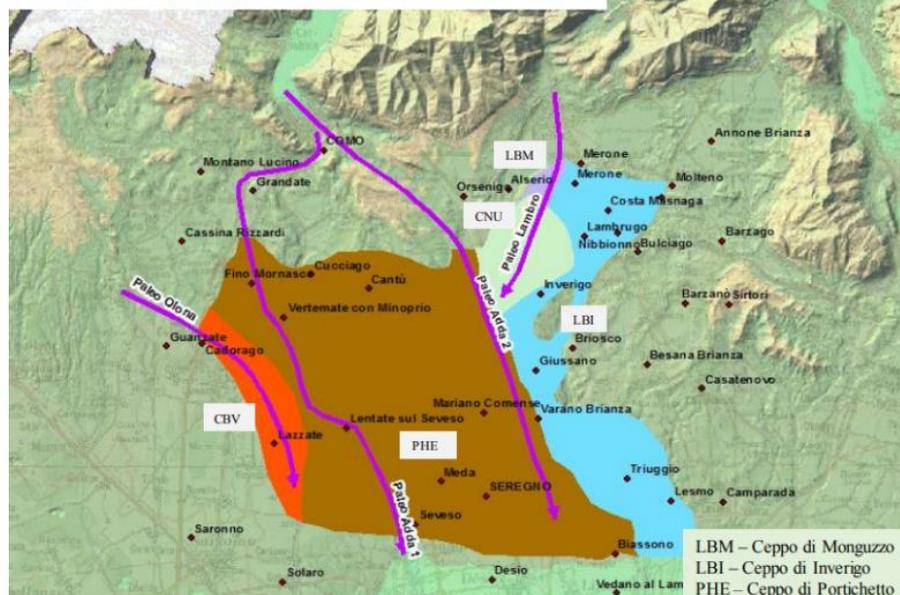


Figura 5: Rappresentazione delle aree di provenienza dei conglomerati più antichi dell'area brianza e dei solchi del Paleo-Olona e del Paleo Adda 1 e 2 (Da Tomasi e Strini, 2017)

3.1 UNITA' STRATIGRAFICHE

L'area entro cui si sviluppa il tracciato dell'Autostrada in progetto è stata cartografata sulla base delle nuove classificazioni che (Foglio Geologico Seregno a scala 1:50.000) assumono denominazioni diverse da quelle tradizionali riportate nella Carta Geologica d'Italia a scala 1:100000 ed utilizzate tuttora in alcuni. La nuova nomenclatura, come già visto nel cap. 2.3, a seconda degli autori verte su due sistemi di classificazioni diverse, le allunità (Alloformazioni, Allogruppi etc) o le UBSU (Unconformity - Bounded Stratigraphic Units) nella quali si riconoscono Supersintemi, Sintemi etc; si ha quindi, per esempio, che mentre la cartografia ufficiale alla scala 1:50.000 sia, a livello nazionale, basata sulle UBSU negli shapefile scaricabili dal Geoportale di Regione Lombardia inerenti la geologia della zona i depositi vengano suddivisi in allunità.

In Tabella 1 sono riportate le unità dell'area di interesse confrontandole con le tradizionali denominazioni, tuttora molto utilizzate sia per gli studi idrogeologici e nei piani di governo. Si ritiene di ovviare in tal modo alla difficoltà di recepire facilmente i contenuti della componente geologica del progetto.

Tabella 1: unità allostratigrafiche presenti lungo il tracciato della tratta B2 e confronto con le relative unità tradizionali

| UNITA' ALLOSTRATIGRAFICHE/SINTEMI | UNITA' TRADIZIONALI | ETA' |
|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| UNITA' POSTGLACIALE / SINTEMA DEL PO | ALLUVIONI RECENTI E ATTUALI | OLOCENE |
| ALLOFORMAZIONE DI CANTU'/SINTEMA DI CANTU' | WURM | PLEISTOCENE SUPERIORE |
| ALLOGRUPPO DI BESNATE/SUPERSINTEMA DI BESNATE | WURM/RISS nelle aree marginali | PLEISTOCENE MEDIO-SUPERIORE |
| ALLOFORMAZIONE DI BINAGO/SINTEMA DI BINAGO | RISS (Nangeroni 1954, Riva 1957) | PLEISTOCENE MEDIO |
| SUPERSINTEMA DEL BOZZENTE | MINDEL (Riva 1957) | PLEISTOCENE MEDIO |
| CONGLOMERATI DI INCERTA ATTRIBUZIONE | CEPPO | PIACENZIANO-CALABRIANO |
| ARGILLE DI CASTEL DI SOTTO | VILAFRANCHIANO | PLIOCENE SUP- PLEISTOCENE INF. |

È opportuno precisare che un'alloformazione comprende terreni di età diversa. Pertanto, il grado di alterazione dei terreni può cambiare nell'ambito della medesima unità, che non può quindi essere considerata in grado di fornire un'indicazione univoca circa lo stato di alterazione. È stato pertanto necessario integrare con l'analisi di elementi utili alla definizione del grado di alterazione quelli forniti dalle cartografie ufficiali. Tale operazione è stata effettuata con l'esame di dettaglio dei caratteri fisici dei terreni evidenziati nelle descrizioni stratigrafiche dei sondaggi e con l'osservazione diretta delle cassette catalogatrici dei sondaggi di PE nei tratti di maggiore interesse, come descritto in dettaglio nel Cap. 4. Al di là di queste considerazioni sulla spiccata diacronia di alcune alloformazioni, l'indicazione del possibile stato di alterazione fornito dalla cartografia CARG e di seguito riportato, considerata la loro rilevante base di attendibilità scientifica, è peraltro un elemento molto utile e di sostanziale interesse.

Di seguito si riporta la descrizione delle unità stratigrafiche presenti lungo il tracciato, dalla più recente alla più antica, in accordo con la classificazione della Carta Geologica d'Italia 1:50000 (foglio 96 Seregno).

Unità Postglaciale (Pg) (Pleistocene Superiore – Olocene)

L'unità, indicata nella cartografia ufficiale con la denominazione "Sintema del Po" (POI), è costituita prevalentemente da alternanze di ghiaie matrice-sostenute, non alterate, ghiaia fine con sabbia grossolana grano-sostenute, sempre con matrice abbondante, e sabbia grossolana; clasti da subarrotondati a spigolosi, poligenici. L'Unità comprende i depositi dell'ultimo evento sedimentario iniziato subito dopo il ritiro del ghiacciaio dell'Episodio Cantù e tuttora in corso di evoluzione. Il deposito si presenta, generalmente, da sciolto a poco addensato con caratteristiche litotecniche da

medie a discrete in funzione della granulometria e dell'addensamento. Permeabilità, di tipo primario, elevata.

Allogruppo di Venegono (Ve) (da Pleistocene Medio a Pleistocene Superiore)

L'unità è costituita prevalentemente da depositi di versante ed eluvio-colluviali e da depositi "loessici" appartenenti a più eventi sedimentari spesso indistinguibili sul terreno. Dal punto di vista litologico tali depositi sono costituiti da limi argillosi con clasti alterati sparsi. Superfici limite costituite da superfici di erosione. Caratteristiche litotecniche da scadenti a scarse. Permeabilità, di tipo primario, bassa.

Sintema di Cantù (Ca) (Pleistocene Superiore)

L'unità, nell'area in oggetto comprende depositi fluvioglaciali e fluviali, è costituita da ghiaie medie e grossolane stratificate matrice-sostenute (matrice sabbiosa) e da alternanze lentiformi di sabbie, sabbie e limi, sabbie con ciottoli. Superficie limite superiore caratterizzata da morfologia ben conservata, copertura loessica assente, profilo di alterazione poco evoluto con profondità massima di circa 2 metri. Cementazione solo locale. Caratteristiche litotecniche da discrete a buone in relazione alla granulometria, all'alterazione e alla cementazione. Permeabilità, di tipo primario, da media a elevata.

Allogruppo di Besnate (Be) (Pleistocene Medio-Superiore)

L'Unità è costituita ghiaie e sabbie stratificate e gradate. Presentano un profilo di alterazione poco evoluto (2-5-5 m di spessore); alterazione, in genere, limitata al 30% dei clasti, localmente fino al 50%: ciottoli carbonatici alterati, clasti granitoidi e scistosi parzialmente alterati, gneissici con patina di ossidazione, quarziticci non alterati. Caratteristiche litotecniche discrete in relazione alla granulometria e all'alterazione. Permeabilità, di tipo primario, media-elevata.

Alloformazione di Binago (Bi) (Pleistocene Medio)

Ghiaia a supporto di matrice, poligenica o a dominanza di litologie locali. Superficie limite superiore caratterizzata da un profilo di alterazione evoluto, di spessore non valutabile. L'alterazione interessa mediamente il 50% dei clasti. Le caratteristiche litotecniche complessivamente appaiono discrete-buone. Dove l'alterazione e l'argillificazione prevalgono le caratteristiche possono risultare decisamente più scadenti. Permeabilità, di tipo primario, da media a elevata.

Allogruppo del Bozzente (Bo)

L'unità è costituita da depositi fluviali, fluvioglaciali e glaciolacustri ed affiora in corrispondenza del pianalto delle Groane. Dal punto di vista litologico è costituita da ghiaie massive o poco stratificate con decarbonatazione, argillificazione e arenizzazione che interessa fino al 90% dei clasti ad eccezione dei ciottoli quarzosi. Sono localmente presenti patine e screziature di Fe-Mn. Copertura loessica complessa sempre presente. Caratteristiche litotecniche generalmente discrete; dove l'alterazione e l'argillificazione prevalgono le caratteristiche possono risultare decisamente più scadenti. Permeabilità, di tipo primario, da media a scarsa.

Conglomerati di incerta attribuzione (CI)

Trattasi di unità conglomeratiche di incerta attribuzione, le cui caratteristiche sono affini alle contigue unità del tipo Ceppo e fra esse va comunque considerata. L'unità è caratterizzata da una spiccata eterogeneità, con alternanza/giustapposizione di settori costituiti da conglomerati poligenici ben cementati e settori a debole cementazione e/o con forte alterazione e degradazione che hanno ridotto l'originario conglomerato in deposito ghiaioso-sabbioso; localmente si osservano intercalazioni di livelli limoso-argillosi con ghiaia e ciottoli sparsi, anch'essi con ogni probabilità originati da fenomeni di intensa alterazione. L'andamento del tetto delle zone caratterizzate da

conglomerati ben cementati presenta notevoli variazioni verticali anche su brevi distanze, a causa dei fenomeni differenziali di alterazione (struttura a “organi geologici”), determinando variazioni anche repentine ed imprevedibili delle caratteristiche litotecniche attribuibili a tale unità. Permeabilità di tipo primario bassa, di tipo secondario da media a localmente elevata. I CI nell’area del tracciato comprendono le unità del Ceppo del Portichetto, Ceppo della Bevera, Ceppo di Inverigo, ceppo della Molgora che presentano una diversa composizione litologica e grado di alterazione. Lungo la tratta B2 lo spessore complessivo dell’unità varia tra 30-35 m e oltre 50 m.

Fenomeni locali di cementazione possono essere presenti anche nelle unità fluvioglaciali più recenti (Bozzente, Binago, Besnate e talora Cantù) che si manifestano generalmente sottoforma di croste e/o livelli di conglomerato di ridotto spessore (centimetrico) intercalati all’interno dei depositi ghiaioso-sabbiosi. Più raramente localmente possono essere presenti lenti e livelli di spessore ed estensione più rilevante (da decimetrico a metrico).

Argille di Castel di Sotto (AKS)

Nel territorio in oggetto questa unità è presente unicamente nel sottosuolo ed è individuata attraverso le stratigrafie di sondaggi e pozzi profondi. È costituita da limi argillosi e sabbiosi e argille di colore variegato dal grigio-azzurro al grigio-verde; sono spesso presenti intercalazioni grossolane costituite da ghiaie sabbiose e sabbie e localmente livelli di conglomerato. I livelli argilloso-limosi sono contraddistinti da contenuto di sostanza organica, localmente abbondante. L’unità in letteratura viene identificata, nell’area in oggetto, con la denominazione formale di “Argille sotto il Ceppo” e corrisponde alla parte superiore, di ambiente continentale o transizione, del “Villafranchiano” degli autori precedenti. Lungo la tratta B2 nessuno dei sondaggi di PD e PE ha raggiunto l’unità; le stratigrafie dei pozzi profondi ubicate nelle aree limitrofe ne hanno evidenziato il tetto a profondità di almeno 50-60 m da p.c. (cfr. Par. 4.3).

3.2 INQUADRAMENTO SISMICO GENERALE

Si riporta nel presente paragrafo una disamina generale della sismicità del territorio interessato dalla tratta B2, rimandando per ulteriori dettagli alla Relazione Sismica di Progetto Esecutivo.

L’analisi della sismicità, intesa come distribuzione spazio-temporale dei terremoti in una determinata area, costituisce il primo tassello per gli studi di valutazione della pericolosità sismica di base. Trattandosi di modelli probabilistici, infatti, le caratteristiche sismotettoniche e le modalità di rilascio dell’energia sismica pregressa consentono la messa a punto di modelli previsionali dell’attività sismica attraverso una quantificazione dei livelli di accelerazione attesi. Nella classificazione definita dai Decreti emessi fino al 1984 (D.M. 05.03.1984) la sismicità è definita attraverso il “grado di sismicità” S; nella proposta di riclassificazione del GdL del 1998 si utilizzano 3 categorie sismiche più una categoria di Comuni Non Classificati (NC) della facevano parte i comuni interessati dal progetto.

A seguito dell’emanazione della D.G.R. 11 luglio 2014 n.X/2129 “Aggiornamento delle zone sismiche in R4gione Lombardia”, i comuni attraversati dal tracciato (Lentate sul Seveso, Barlassina, Seveso, Meda, Cesano Maderno) sono classificati con l’attribuzione di una zona sismica 4 (sismicità bassa).

Come deducibile dal catalogo DBMI15 v. 4.0, database utilizzato per la compilazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) aggiornato a gennaio 2022 (Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., Antonucci A., 2022 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>), nel quale sono riportate le osservazioni macrosismiche relative a diversi comuni italiani, e dalla consultazione dei cataloghi sismici redatti dall’Istituto di Geofisica e Vulcanologia per gli studi di pericolosità, risulta la seguente storia sismica locale:

- le osservazioni relative ai comuni in oggetto archiviano complessivamente n. 10 registrazioni;
- l'area è caratterizzata da risentimenti connessi ad eventi sismici di intensità epicentrale massima rilevata dell'ordine del VIII-IX grado della scala Mercalli;
- le località epicentrali per gli eventi che hanno prodotto i maggiori risentimenti al sito (osservazioni macrosismiche) provengono da settori territoriali del tutto decentrati rispetto all'area comunale, nello specifico nell'area bergamasca-bresciana, in Liguria occidentale, nel veronese, in Emilia-Romagna e in Svizzera (Grigioni), in Piemonte (Monferrato, Canavese), in Toscana.
- dal catalogo parametrico dei terremoti italiani non si rileva attività sismica con epicentro all'interno dei territori comunali interessati dal tracciato

Le suddette osservazioni sono elencate nel seguente prospetto tratto dall'archivio sismico INGV.

| Intensità locale | Anno | Area Epicentrale | Lat | Long | Intensità epicentrale | Magnitudo momento |
|------------------|------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|-------------------|
| 3-4 | 1887 | Liguria occidentale | 43.891 | 7.992 | 9 | 6.27 |
| 4 | 1891 | Valle d'Ilasi | 45.564 | 11.165 | 8-9 | 5.87 |
| 3-4 | 1894 | Bresciano | 45.563 | 10.123 | 6 | 4.89 |
| 4 | 1901 | Garda occidentale | 45.584 | 10.49 | 7-8 | 5.44 |
| 4 | 1909 | Emilia Romagna orientale | 44.579 | 11.688 | 6-7 | 5.36 |
| 2-3 | 1912 | Canavese | 45.549 | 7.785 | 5-6 | 4.71 |
| 4 | 1914 | Lucchesia | 43.912 | 10.598 | 7 | 5.63 |
| 2-3 | 1991 | Grigioni, Vaz | 46.731 | 9.527 | 6 | 4.7 |
| 2 | 2000 | Monferrato | 44.911 | 8.38 | 6 | 4.94 |
| 2 | 2002 | Franciacorta | 45.65 | 10.141 | 5 | 4.21 |
| 4-5 | 2004 | Garda occidentale | 45.685 | 10.521 | 7-8 | 4.99 |

Infine, per il dettaglio delle aree interessate, considerando le "Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani", valutate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA (D. Molin, M. Stucchi, G. Valensise), dalla Figura 6 emerge una $I_{max} < 6$ (scala Mercalli).

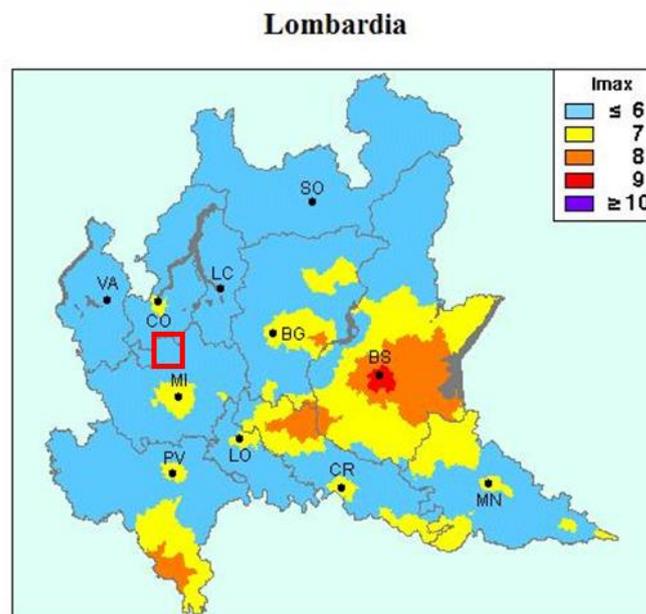


Figura 6 - massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani, in rosso l'area interessata dal tracciato della tratta B2

A conclusione dell'analisi della sismicità, alla luce dei recenti avvenimenti che hanno coinvolto l'Emilia-Romagna, è stato condotto un approfondimento della tematica.

Nello specifico si è verificato se l'area di pertinenza l'intervento sia ricompresa nell'ambito delle cosiddette Individual or Composite Seismogenic Sources, ovvero settori individuati per i quali è palese una evoluzione sismica in atto legata a fenomeni neotettonici (sorgenti sismogenetiche). Dall'analisi del suddetto database a cura dell'INGV (DISS v. 3.2.1), si evince come l'area di interesse sia esterna a dette sorgenti sismogenetiche Figura 7.

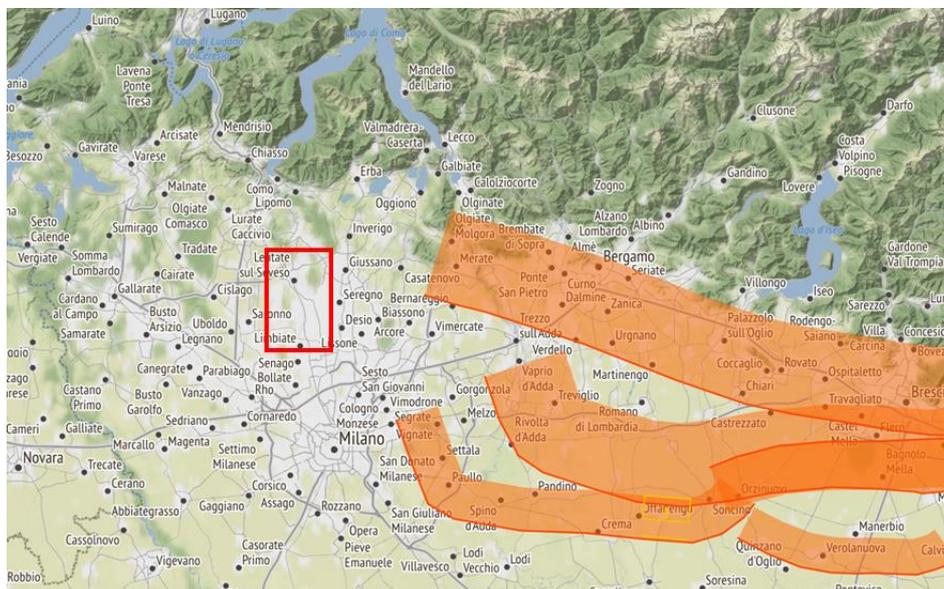


Figura 7 – ubicazione delle sorgenti sismogenetiche, in rosso l'area interessata dal tracciato della tratta B2

3.2.1 PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

Si riporta di seguito una sintesi, tratta dagli studi geologici dei Piani di Governo del Territorio, dei fattori degli scenari di pericolosità sismica e i relativi fattori di amplificazione locale identificati nel territorio dei comuni interessati dall'opera (Figura 8).

La definizione degli scenari di Pericolosità Sismica Locale (PSL) contenuta negli studi geologici¹, evidenzia per l'intero tracciato della tratta B2 l'attribuzione alla classe Z4A, "Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi" e Z4C "Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (compresi le coltri loessiche)" (quest'ultima classe limitata a due strette fasce nel territorio di Lentate sul Seveso, lungo le scarpate di raccordo tra il pianalto delle Groane e i terrazzi fluvio-glaciali più recenti, cfr. Par.4.2) entrambe legate alla sussistenza di possibili effetti di "Amplificazioni litologiche e geometriche".

Anche il tracciato dell'opera connessa TRCO06 ricade in classe Z4A ad eccezione della scarpata di versante al km 2+400, attribuita alla classe Z3A, "Zona di ciglio di scarpata $H > 10\text{ m}$ e pendio sottostante", soggetta a possibili fenomeni di "Amplificazioni topografiche".

¹ Per il comune di Cesano Maderno, nello studio geologico comunale si specifica che "l'ambito di pianura nel quale ricade l'intero territorio di Cesano Maderno non è stato individuato come scenario di pericolosità sismica locale (ambito PSL) in quanto le indagini disponibili escludono la presenza di un substrato rigido nei primi 30÷40 m di profondità ed il calcolo delle velocità di propagazione delle onde di taglio fornisce dei valori di VS30 ampiamente inferiori al valore limite di 800 m/s per il quale si possono prevedere amplificazioni del moto sismico superiori a quelli previsti dal D.M. 14.1.2008"

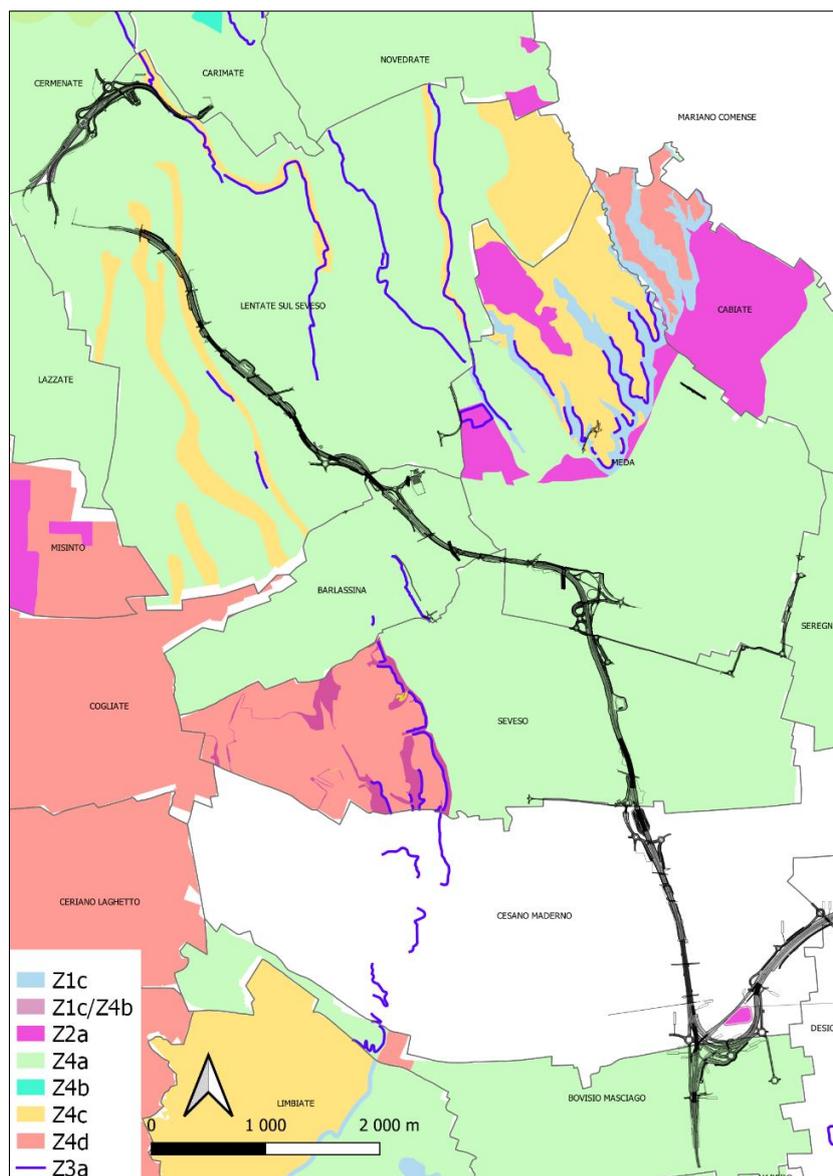


Figura 8 – classi di pericolosità sismica locale lungo il tracciato della tratta B2 (fonte: PGT comunali)

4. MODELLO CONCETTUALE GEOLOGICO

Di seguito si riporta la descrizione dell'assetto geologico e geologico-tecnico ricostruito lungo i profili longitudinali della tratta B2 e della viabilità connessa TRCO06, riportati rispettivamente negli elaborati EGGB2A00GE00000GL001 - EGGB2A00GE00000GL004 e EGGB2H01GE00000GL001, realizzati a partire dalle stratigrafie e dalle prove di laboratorio acquisite nel corso delle campagne di indagine di PD e PE. A completamento dell'analisi della struttura geologica lungo il tracciato autostradale sono state inoltre eseguite 3 sezioni geologiche trasversali al tracciato, con l'obiettivo di fornire una valutazione nelle tre dimensioni delle eventuali variazioni litologiche in un intorno significativo delle opere in progetto.

4.1 MODALITA' DI ELABORAZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO

Prima della descrizione di dettaglio della struttura geologica lungo il profilo di progetto è utile premettere alcune considerazioni relative alle modalità di elaborazione dei dati (stratigrafie, prove di

laboratorio) e di realizzazione delle sezioni, sottolineando le differenze con le sezioni geologiche di PD, e sulle problematiche riscontrate, di seguito elencate:

- preliminarmente, tutte le ubicazioni delle indagini di PD sono state controllate e all'occorrenza spostate: sia la posizione in mappa sia la quota indicata nelle monografie di PD appare errata, pertanto, le indagini sono state spostate in posizione che appare più corretta (previo accurato controllo con tutte le fonti disponibili) ed è stata verificata la quota utilizzando generalmente il DTM Monza-Brianza e solo in pochi casi aggiustandola con verifiche puntuali (per ulteriori dettagli si rimanda all'elaborato EGE000GE00000RS001- Piano indagini di PE).
- È stata operata una rappresentazione maggiormente dettagliata dell'unità dei "Conglomerati di Incerta Attribuzione", controllando le informazioni desunte dalle monografie e in particolar modo incrociando descrizione stratigrafica, foto cassette catalogatrici, eventuale utilizzo di doppio carotiere/corona diamantata, risultato delle prove SPT, risultato delle prove simiche downhole. Tale attività ha portato a una migliore definizione dei caratteri litologici dell'unità rappresentata nella sezione, distinguendo con diverse simbologie suddivisa in 4 classi in base al grado di cementazione:
 - conglomerati lapidei da debolmente a molto cementati
 - conglomerati prevalentemente alterati e degradati in ghiaie e sabbie con intercalazione di lenti e livelli lapidei di spessore da centimetrico a decimetrico
 - depositi prevalentemente sabbioso-ghiaiosi (in parte probabilmente derivanti dall'alterazione dei conglomerati)
 - depositi prevalentemente limoso sabbiosi (in parte probabilmente derivanti dall'alterazione dei conglomerati)

Per i soprastanti depositi alluvionali e fluvioglaciali sono state distinte, con diverse simbologie, tre macroclassi litologiche e granulometriche, di seguito descritte, nelle quali sono state raggruppate le tipologie di terreni che presentano, ai fini progettuali, caratteristiche assimilabili dal punto di vista meramente litologico e granulometrico. La rappresentazione litologica in sezione risulta in questo modo necessariamente più sintetica rispetto ad una sezione geologica tradizionale; tale scelta è stata dettata dall'esigenza di fornire nel profilo di progetto una rappresentazione maggiormente focalizzata sugli aspetti sia geologici che geologico-tecnici (tramite la rappresentazione di ulteriori parametri quali grado di alterazione dei terreni o la presenza di fenomeni di detensionamento, come di seguito descritto) che rivestono una maggiore utilità pratica ai fini della progettazione delle opere:

- ghiaie e sabbie prevalenti con subordinata presenza di frazione limosa e localmente argillosa (ghiaie in matrice limoso-sabbiosa, sabbie ghiaiose/con ghiaia)
- sabbie limose/con limo, con subordinata frazione ghiaiosa
- limi sabbiosi e argillosi con subordinata presenza di frazione ghiaiosa, argille limose
- Localmente si osservano apparenti discrepanze nelle descrizioni stratigrafiche di sondaggi limitrofi, in particolare tra sondaggi realizzati nella prima fase di indagine di PD e quelli realizzati nella seconda fase; in questi casi nella redazione della sezione geologica è stato considerato il sondaggio con la descrizione stratigrafica maggiormente rispondente con le caratteristiche litologiche e granulometriche note dell'unità allostratigrafica presente nell'area. Dove disponibili sono state analizzate le curve granulometriche definite in laboratorio, al fine di attribuire la corretta litologia a ciascun intervallo stratigrafico.
- Sul profilo geologico del tracciato è stato rappresentato, indicato con un'apposita simbologia, anche il grado di alterazione dei terreni e dei conglomerati, data la notevole importanza di tale parametro nel determinare le caratteristiche meccaniche dei terreni e la suscettibilità allo sviluppo del fenomeno degli Occhi Pollini. La valutazione del grado di alterazione è stata effettuata qualitativamente sulla base delle descrizioni stratigrafiche dei sondaggi (esplicite informazioni circa il grado e l'estensione dell'alterazione, abbondanza e colore della frazione limoso-argillosa), sull'osservazione delle fotografie delle cassette catalogatrici e da

informazioni derivanti da bibliografia o studi pregressi disponibili nell'area per le diverse unità allostratigrafiche.

Per la definizione del grado di alterazione dei clasti è stato utilizzato lo schema riportato nella seguente tabella 2. Per i conglomerati è stata posta inoltre particolare attenzione all'eventuale presenza di tessitura vacuolare e di fenomeni di dissoluzione carbonatica/ricristallizzazione.

Tabella 2 – definizione del grado di alterazione dei terreni a granulometria grossolana (ghiaie, sabbie e conglomerati)

| GRADO DI ALTERAZIONE | DESCRIZIONE | CLASSE |
|-----------------------------|--|---------------|
| Assente | Nessuna traccia di alterazione dei clasti; è possibile una leggera decolorazione sulla superficie | WC1 |
| Leggero | La decolorazione superficiale indica leggera alterazione del clasto, che può essere localmente più debole che in condizioni non alterate | WC2 |
| Medio | Meno del 50% dei clasti sono alterati con presenza di fenomeni di parziale arenizzazione o argillificazione | WC3 |
| Elevato | Più del 50% dei clasti sono alterati con presenza di fenomeni di arenizzazione e/o argillificazione; possono essere presenti ancora in modo discontinuo clasti freschi o poco alterati | WC4 |
| Molto elevato | Tutti i clasti sono decomposti e degradati in una terra (argillificazione), la tessitura originaria del terreno può essere ancora in parte riconoscibile | WC5 |

Nella redazione del profilo geologico sono state distinte 2 macro-classi basate sulla definizione di dettaglio sopracitata, evidenziando quelle di maggiore interesse ai fini progettuali. In particolare sono state distinte aree caratterizzate da grado di alterazione "alto" quando l'alterazione dei clasti appare intensa (con presenza di clasti completamente alterati, arenizzati o argillificati) e diffusa (con % di clasti alterati valutabile qualitativamente attorno al 50% o superiore, classi WC4 e WC5) e grado di alterazione "medio" quando la presenza di clasti alterati interessa solo parzialmente l'intervallo stratigrafico considerato (% di clasti alterati valutabile qualitativamente tra 30 e 50%, classe WC3).

- In relazione alla definizione dei limiti tra le diverse unità, è opportuno precisare che le unità allostratigrafiche difficilmente sono riconoscibili con certezza dai dati di sottosuolo, essendo distinte prevalentemente sulla base di elementi rilevati direttamente in superficie. Il criterio principale adottato è stata l'individuazione sulle verticali di sondaggio di variazioni litologiche/granulometriche e del grado di alterazione che potessero indicare il possibile passaggio ad unità deposizionali più antiche; tuttavia, dato il carattere erosivo di tali limiti, la messa in posto delle unità più recenti determina frequentemente l'asportazione della parte più superficiale, maggiormente alterata, delle sottostanti unità, rendendo complicata l'individuazione del passaggio tra un'unità e l'altra sulla base dei criteri litologici e di alterazione precedentemente citati. Per tali ragioni, risulta spesso difficoltoso tracciare i limiti tra diverse unità nel sottosuolo che sono pertanto da considerarsi interpretativi.

4.2 DESCRIZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO

Dal punto di vista delle caratteristiche litostratigrafiche e litotecniche, il tracciato dell'asse principale della tratta B2 può essere suddiviso in tre settori complessivamente omogenei (in aggiunta al tratto

relativo all'opera connessa TRCO06). Di seguito si riporta la descrizione del profilo per ciascuno di questi settori e del profilo dell'opera connessa TRCO06/Ponte Novedratese.

TRCO06

Il tracciato della viabilità connessa TRCO06 si sviluppa per la maggior parte su un terrazzo fluvioglaciale caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Binago. Dalla carta geologica si individua in questa zona un settore che dalla morfologia indica chiaramente che il deposito alluvionale ricopre una struttura collegata con le retrostanti morene e uno allungato da N a S in cui modeste colline di origine glaciale si sovrappongono ad alluvioni (Figura 2).

I depositi fluvioglaciali costituiscono una coltre con spessore superiore a 40 m e sono costituiti in prevalenza da sabbie limose con ghiaia e ciottoli, con presenza di lenti e livelli limoso-sabbiosi plurimetrici. Il grado di alterazione dei terreni varia da moderato ad alto, evidenze di alterazione sono presenti localmente fino a 20 m di profondità.

Nel tratto compreso tra i sondaggi SB1_28 e SB1_30 si osserva a partire da circa 8 m di profondità la presenza di limi sabbiosi alterati, con spessore superiore a 5-6 m che potrebbero indicare la presenza di una zona di alto relativo della più antica unità del Bozzente, affiorante poco più a sud sul pianalto delle Groane. La zona di raccordo tra i due terrazzi presenta in affioramento i depositi eluvio-colluviali prevalentemente limoso-argillosi dell'unità di Venegono.

Nella parte più orientale (viadotto Novedratese) il tracciato si sviluppa sul più recente terrazzo dell'unità di Cantù, ad una quota di circa 20 m inferiore. In questo settore le stratigrafie dei sondaggi hanno evidenziato a partire da 12-17 m da p.c. la presenza di conglomerati lapidei di spessore plurimetrico, alternati a livelli alterati e degradati in ghiaia e sabbia, estesi fino ad una profondità di almeno 38 m.

SETTORE 1 - DA KM 0+000 A KM 3+500

Il primo tratto di questo settore (km 0 – 0+600 m) è caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Binago costituita nei primi 5 metri da limi sabbioso-argillosi con sporadica ghiaia alterata e più in profondità da sabbie ghiaiose e ghiaie in matrice sabbioso limosa, localmente con presenza di fenomeni di ricristallizzazione e di interlivelli di spessore centimetrico di conglomerato. A partire da 11-12 m di profondità sono presenti sabbie limose a tratti ghiaiose con evidenza di fenomeni di alterazione e degradazione dei clasti, che indicano un probabile passaggio alla sottostante unità del Bozzente.

Nel tratto seguente (km 0+600 – 1+000) il tracciato attraversa il pianalto delle Groane, dove è presente in affioramento l'unità del Bozzente, costituita da depositi sabbioso-ghiaiosi caratterizzati da fenomeni di alterazione fino ad almeno 20 dagli effetti dell'infiltrazione delle acque che nel tempo hanno prodotto la dissoluzione del cemento e talora dei ciottoli e granuli calcarei. Nei primi 7-8 m da p.c. è presente un livello di alterazione superficiale costituito da un'alternanza di sabbie con limo debolmente ghiaiose e limi argillosi debolmente sabbiosi, passanti in profondità a ghiaie eterometriche in matrice sabbioso-limosa marrone. I terreni in questo settore sono caratterizzati da un alto grado di alterazione e diffusi fenomeni di decarbonatazione e argillificazione dei clasti, fino ad una profondità di 15 m da p.c. (SB2_04, ESB2_S08). Il raccordo morfologico del pianalto con le alluvioni di fondovalle dei corsi d'acqua attraversati risulta inoltre coperto da una coltre colluviale (unità di Venegono) costituita da alcuni metri di materiale a forte componente argillosa che, pur trovandosi su modeste pendenze, può favorire locali smottamenti.

A partire dal km 1+000 il tracciato si sviluppa su un terrazzo alluvionale caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Besnate, costituita da limi sabbioso-argillosi nei primi 3 m e in seguito da sabbie ghiaiose e ghiaie in matrice sabbioso-limosa localmente alterate. A maggiore profondità

prevalgono terreni costituiti da alternanze di lenti di sabbie limoso ghiaiose e ghiaie in matrice sabbioso-limosa con grado di alterazione da medio ad alto; dati gli spessori (mediamente 6-8 m, localmente fino a 15 m) caratterizzati da fenomeni di alterazione, è stata ipotizzata l'appartenenza dei terreni oltre i 10 m di profondità alla sottostante e più antica unità del Bozzente. Come premesso, vista la difficoltà di distinguere nel sottosuolo sulla base dei soli dati stratigrafici unità con caratteristiche litologiche analoghe, tale attribuzione risulta ipotetica.

Nel tratto compreso tra il km 2+300 e 3+600 (tra i sondaggi SB2_10 e SB2_19), la maggior parte dei sondaggi intercettano a profondità comprese tra 16 e 25 m da p.c. l'unità dei Conglomerati di Incerta Attribuzione, che in questo settore mostrano la presenza di una zona di "alto" relativo. I conglomerati sono caratterizzati, come già premesso nell'inquadramento geologico generale, dall'alternanza di spessori da metrici a plurimetrici lapidei talvolta ben cementati, a livelli alterati e degradati in sabbie e ghiaie in matrice limosa, in cui localmente si riconoscono ancora lenti e livelli con spessori da centimetrico e decimetrico di conglomerati cementati. I livelli lapidei risultano rilevanti, per spessore ed estensione, in particolare tra il Km 2+500 e 2+700 (interessando in parte l'area della G.A. Montegrappa Ovest) dove sono rinvenuti a partire da circa 19 m da p.c. con spessori fino a 4 m (SB12, SB13) e si presentano da mediamente a fortemente cementati, localmente con tessitura cariata e vacuolare. Oltre a variazioni del grado di cementazione e alterazione lungo la verticale si osserva anche una spiccata eterogeneità laterale, con passaggio su brevi distanze da conglomerati lapidei a depositi ghiaioso-sabbiosi poco o nulla cementati e andamento del tetto che presenta forti variazioni di quota.

SETTORE 2 - (DA KM 3+500 A KM 6+660)

In questo settore il tracciato si sviluppa all'interno delle valli del Seveso e del Certesa, caratterizzate dalla presenza dei depositi connessi con i più recenti episodi fluviali e fluvioglaciali (unità di Cantù e unità Postglaciale). Tali depositi sono prevalentemente costituiti da ghiaie in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa e da sabbie ghiaiose con ciottoli con locali intercalazioni di lenti e livelli sabbioso-limosi di spessore metrico. Il grado di alterazione è generalmente inferiore rispetto al settore precedente ed è variabile da assente/debole a localmente medio. La presenza di terreni alterati e caratterizzati da una maggiore frazione fine si evidenzia in particolare nel settore compreso tra il km 5+500 e 6+000 (ponte Certesa 1, G.A. Meda) dove le stratigrafie dei sondaggi hanno anche rivelato la presenza di isolate cavità (Occhi Pollini) di spessore metrico (SB2_33).

Lo spessore complessivo dei depositi ghiaioso-sabbiosi è di circa 18 m in corrispondenza della G.A. Colombo (km 3+500 – 4+000) mentre più a sud, tra il km 5+100 e 6+600i (sondaggi SB2_29 - SB2_41) appare più ridotto, nell'ordine di 12-13 m, fino ad un minimo di 9-10 m in corrispondenza del sondaggio SB2_33 (Ponte Certesa 1). Gli spessori massimi sono raggiunti in corrispondenza dell'asse della valle del Seveso/Certesa, tra il km 4+600 e 5+100 (circa 35 m in SB2_28), dove oltre il 15-20 m di profondità presentano caratteristiche litologiche e di alterazione differenti; l'attribuzione di questi depositi a unità più antiche (besnate/binago/bozzente) è solo ipotetica, per le ragioni esposte in premessa.

I depositi fluviali e fluvioglaciali poggiano sui conglomerati di incerta attribuzione che presentano caratteristiche analoghe a quelle evidenziate nella parte finale del precedente tratto. L'andamento del tetto risulta irregolare e caratterizzato da repentine variazioni di quota nella parte centrale della valle del Seveso/Certesa, mentre risulta più regolare verso Sud. Dal punto di vista litologico si osservano alternanze di zone lapidee da mediamente a ben cementati e zone alterate e degradate in sabbie e ghiaie e localmente limi sabbioso-ghiaiosi (SB2_24) con cementazione debole o nulla. Il passaggio tra conglomerati lapidei e conglomerati fortemente alterati e degradati appare spesso, come già osservato in precedenza repentino anche tra sondaggi posti a breve distanza (es. SB2_23 e SB2_24). Dove i conglomerati tipo sono più vicini alla superficie (12-15 m da p.c.) e quindi più facilmente vulnerabili alla dissoluzione e ai fenomeni di erosione sotterranea, le stratigrafie evidenziano la presenza di una elevata percentuale di vacuoli e piccole cavità fino a profondità di

almeno 20 m da p.c., particolarmente diffuse in prossimità del corso del torrente Certesa (sondaggi SB2 30-35-36-37). In corrispondenza di questo settore si osserva un "alto" relativo del tetto dei conglomerati (9-10 m da p.c. in SB2_36), ove sono presenti superiormente depositi ghiaioso-sabbiosi alterati e detensionati.

In superficie in corrispondenza del tratto in rilevato dell'attuale SS35 sono presenti materiali di riporto eterogenei (ghiaie, sabbie, limi sabbioso-ghiaiosi con presenza di laterizi e residui di inerti, localmente con spessore fino a 10 m (SB2_34).

SETTORE 3 (DA KM 6+600 A KM 9+600)

Questo settore appare complessivamente omogeneo dal punto di vista litologico ed è caratterizzato dalla presenza di depositi in prevalenza ghiaioso-sabbiosi-ciottolosi appartenenti all'unità di Besnate, con locale presenza di lenti e livelli sabbioso limosi con spessori nell'ordine di 2-3 m.

Lo spessore complessivo dei depositi ghiaioso-sabbiosi varia da circa 20 m a nord a oltre 30 m a fine tratta.

I sottostanti conglomerati sono rinvenuti a profondità minime di circa 10-12 m presso SB_40-41 e in corrispondenza dell'imbocco sud della GA Seveso dove si rinviene la presenza di livelli metrici di conglomerati lapidei (SB2_45). In corrispondenza GA Cesano Maderno, livelli plurimetrici di conglomerato cementato sono rinvenuti nei nuovi sondaggi ESB2_S32 e ESB2_S33 a partire da 32 m da p.c. e presentano diffusi vacuoli da millimetrici a centimetrici per fenomeni di dissoluzione del cemento carbonatico.

I livelli di alterazione superficiali limoso-sabbiosi presentano spessore ridotto, generalmente inferiore a 2 m; il grado di alterazione dei terreni ghiaioso-sabbiosi è nel complesso moderato, ma si evidenziano in ogni caso settori caratterizzati da alterazione medio-alta, in particolare in corrispondenza dei tratti in cui i conglomerati sono presenti a minori profondità (SB2_45, SB2_50, ESB2_S31, SB2_54).

4.3 SEZIONI GEOLOGICHE TRASVERSALI AL TRACCIATO

Come premesso, oltre al profilo geologico di progetto lungo l'asse autostradale, sono state redatte 3 sezioni geologiche trasversali al tracciato, al fine di evidenziare eventuali variazioni litologiche laterali in un intorno significativo alla viabilità in progetto (mediamente 700-1000 metri, in base ai dati disponibili). Per la redazione delle sezioni sono state utilizzate, oltre ai sondaggi di PD e PE, le stratigrafie di pozzi e sondaggi disponibili da fonti ufficiali, in particolare dalla Banca Dati Geologica del Sottosuolo della Regione Lombardia.

I dati stratigrafici riferiti alla banca dati regionale, per la loro stessa natura (le perforazioni erano fondamentalmente realizzate per approvvigionamento idropotabile), risultano decisamente meno raffinati di quelli realizzati per la Pedemontana. Ne consegue che è possibile una sovrastima nella rappresentazione di alcune litologie (vedi conglomerato ad esempio); per uniformità con quanto rilevato lungo l'asse principale di Pedemontana, si è cercato di limitare gli spessori lapidei congruentemente, al fine di evitare una difformità dettata dalla qualità del dato più che dalla reale differenza dell'assetto geologico.

Le sezioni e le relative tracce sono riportate negli elaborati EGGB2A00GE00000SZ001 e EGGB2A00GE00000SZ002; di seguito se ne riporta la descrizione.

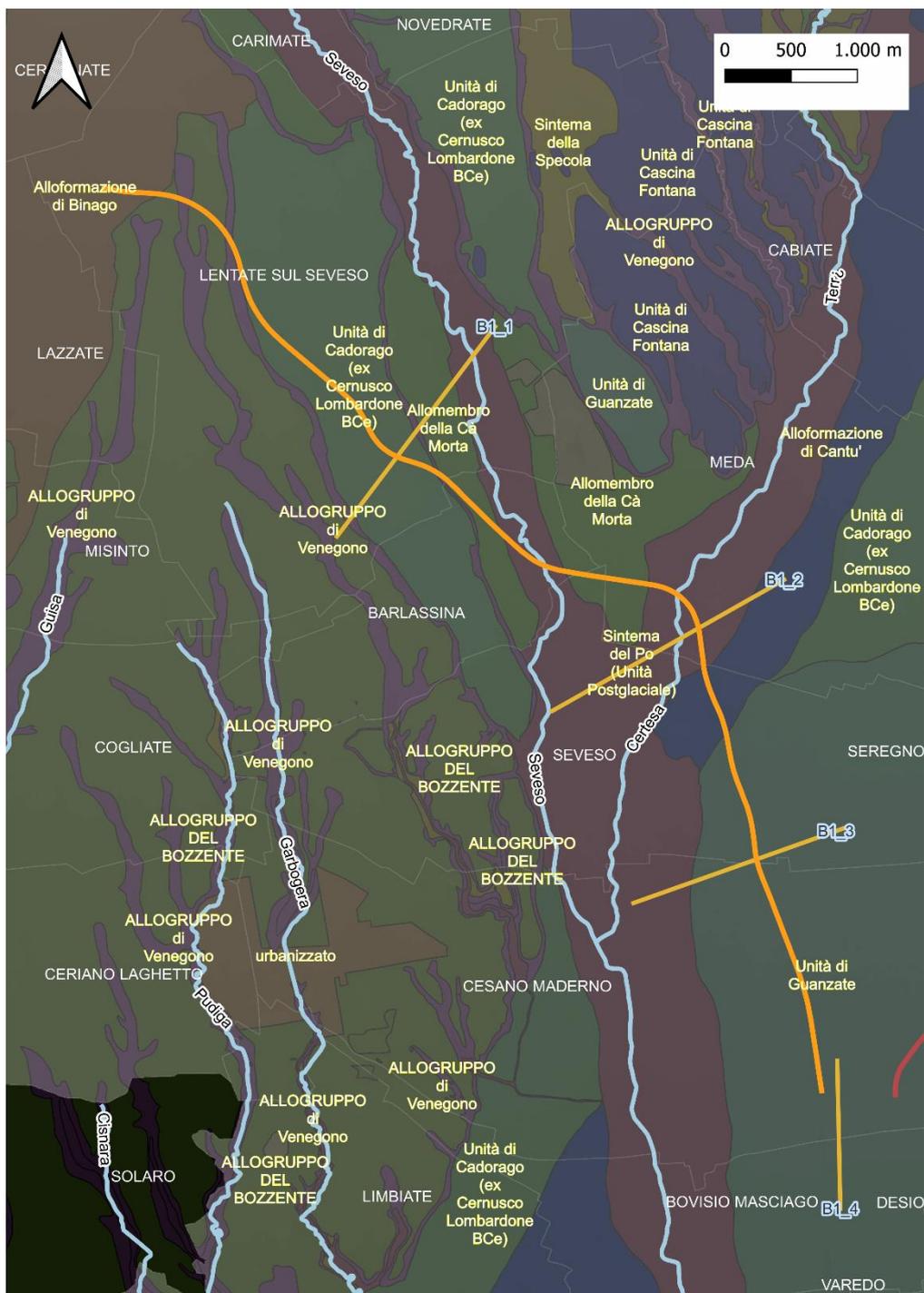


Figura 9: ubicazione delle sezioni trasversali per la tratta B2 e svincolo di Cesano Maderno (B1_4)

SEZIONE B2_1

La sezione si sviluppa all'interno del territorio comunale di Lentate sul Seveso e interseca l'Asse Principale al km 3+200 circa (sondaggio ESB2_12). Approssimativamente 500 m a Ovest del tracciato, in questo settore, è presente il pianalto delle Groane caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità del Bozzente, che si raccorda procedendo verso est al più recente terrazzo fluvio-glaciale dell'allogruppo di Besnate (unità di Cadorago) tramite una ripida scarpata con presenza di depositi superficiali eluvio-colluviali prevalentemente limoso sabbiosi (unità di Venegono). A Est del tracciato sono presenti in affioramento le unità di Cantù e successivamente

l'unità Postglaciale (sintema del Po). Lo spessore stimato delle unità fluvioglaciali più recenti è nell'ordine massimo di 10-15 e poggiano con ogni probabilità su terreni sepolti dell'unità del Bozzente, affiorante da entrambi i lati della valle del Seveso. In corrispondenza del tracciato e nelle aree limitrofe (circa 300 m e oltre 700 m ad Ovest di esso) sono presenti conglomerati con caratteristiche di cementazione molto eterogenee a profondità di circa 20 m. A Est del tracciato, in corrispondenza della valle del Seveso, le stratigrafie disponibili non evidenziano la presenza di conglomerati indicandone un probabile approfondimento del tetto fino ad oltre 50 m da p.c.; tale depressione, riempita di depositi sabbioso-ghiaiosi è connessa con ogni probabilità ad una più antica incisione valliva del Seveso stesso.

SEZIONE B2_2

La sezione interseca il tracciato al km circa 6+000 (sondaggio ESB2_S20) e si sviluppa trasversalmente alla valle del Seveso-Certesa tra i comuni di Seveso e Meda. In superficie gran parte dell'area è caratterizzata dalla presenza in affioramento delle alluvioni recenti dell'unità Postglaciale sovrapposta alle più antiche unità fluvioglaciali di Besnate e di Binago. L'andamento del tetto dei Conglomerati di Incerta Attribuzione è piuttosto regolare nell'intorno del tracciato, mentre verso Sud-Ovest mostra una progressiva risalita fino a pochi metri da p.c.; in questo settore le stratigrafie disponibili intercettano, alla base dell'unità conglomeratica, le argille limose appartenenti all'unità sepolta delle Argille di Castel di Sotto, ad una profondità di circa 50 m da p.c.

SEZIONE B2_3

La sezione è inclusa nei territori comunali di Cesano Maderno e Seveso e interseca il tracciato principale al km circa 7+850 (sondaggio ESB2_S27). Questo settore è caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Besnate, che poggia sui Conglomerati di Incerta Attribuzione presenti a profondità di 25-30 m da p.c.. L'andamento del tetto dell'unità si presenta relativamente regolare, con una locale risalita a circa 600 m a Sud-Ovest dell'asse principale fino a circa 15 m da p.c.. Le stratigrafie dei pozzi limitrofi al tracciato confermano anche in questo caso la notevole eterogeneità litologica e del grado di cementazione dei conglomerati, evidenziata da alternanze, sia in senso verticale che laterale, di bancate di conglomerati lapidee e depositi ghiaioso-sabbiosi sciolti o con presenza di interlivelli debolmente cementati. Lo spessore dell'unità conglomeratica è nell'ordine di 35 metri; le stratigrafie dei pozzi profondi intercettano il tetto della sottostante unità delle Argille di Castel di Sotto a profondità variabili tra 50 e 60 m da p.c.

5 VALUTAZIONI QUALITATIVE SULLE CARATTERISTICHE LITOTECNICHE DELLE TERRE DA SCAVO

Si riportano nel presente paragrafo alcune valutazioni qualitative inerenti alle caratteristiche litotecniche delle terre da scavo lungo il tracciato, in attesa delle quantificazioni volumetriche che verranno prodotte nel PUT. Le considerazioni riportate sono basate sulla classificazione delle terre secondo la norma UNI 11531 (basata sulla precedente CNR-UNI 10006), derivante dalle prove granulometriche di laboratorio, dalle prove SPT eseguite e da valutazioni qualitative circa lo stato di alterazione dei depositi alluvionali. Nel piano di indagine di PE sono state previste apposite analisi, tra cui analisi granulometriche, determinazione delle proprietà fisiche e dei limiti di Atterberg e Test Los Angeles, ancora in fase di completamento, per una più precisa definizione delle caratteristiche di resistenza all'usura dei clasti, funzionali alla valutazione del potenziale riutilizzo delle terre da scavo che sarà dettagliato nel documento del PUT.

Nelle figure seguenti si riporta una rappresentazione grafica della classificazione UNI 11531 lungo la tratta B2, definite sulla base delle prove granulometriche/limiti di Atterberg di PD e PE. Sono state in particolare distinte tre classi: ghiaie e sabbie con matrice fine non plastica inferiore al 35% (classi A1, A3, A2-4, A2-5, in verde), ghiaie e sabbie con matrice fine plastica tra il 25% e il 35% (classi A2-

6, A2-7, in giallo) e terreni prevalentemente limoso-argillosi (classi A4, A5, A6, A7, in rosso). Da un semplice esame visivo si nota infatti come i primi 3 km presentano scavi in terreni di qualità scadente fino a circa metà trincea. Un tratto nel quale ci si attende la presenza di terreni migliori è quello tra il km 3+000 e 4+000. Si rammenta che i volumi associati a questi tratti sono relativamente limitati poiché trattasi di sbancamenti laterali relativi al tracciato dell'attuale superstrada Milano-Meda-Lentate.

Gran parte del tracciato si sviluppa poi in rilevato, e dunque i terreni corticali sono attesi di scarsa qualità, con un tratto intermedio (tra il km 5+800 e 7+500) nel quale invece, al di sotto dello strato di terreno vegetale, è possibile la presenza di ghiaie complessivamente dalle buone caratteristiche. Da lì in poi il rilevato non consente il recupero di quantitativi consistenti di materiali, se non nell'ultimo tratto in trincea dal km 8+850 ca. fino a fine tratta, lungo il quale le ghiaie dovrebbero invece risultare piuttosto buone.

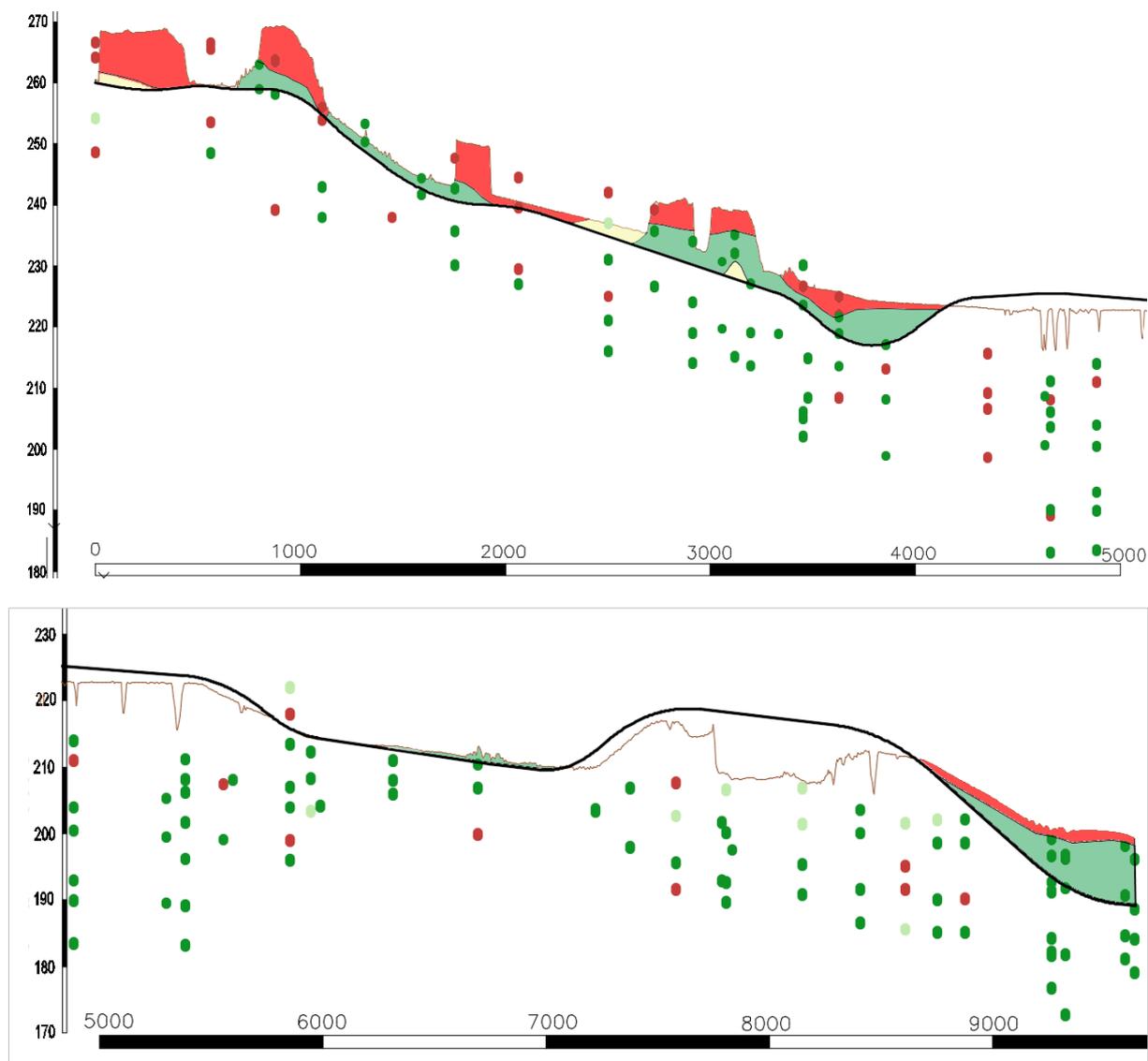


Figura 10: rappresentazione in sezione dei campioni sottoposti a classificazione UNI 11531 e correlazione geologicamente basata delle classi di qualità litotecnica per il potenziale riutilizzo delle terre (rosso: classi A4-A5-A6-A7, giallo/verde chiaro: classe A2-6; verde scuro, classi A1, A2, A2-4)

Di seguito si riporta una descrizione di dettaglio per i vari settori della tratta.

TRCO06

Il tracciato della viabilità connessa TRCO06 è caratterizzato dalla presenza di terreni appartenenti all'unità di Binago, costituiti in prevalenza da sabbie limose con ghiaia e ciottoli con grado di alterazione da medio ad alto. Localmente si rileva la presenza di limi sabbioso-ghiaiosi con elevato grado di alterazione fino a profondità di 15-20 m da p.c. La possibilità di reperimento di terreni con buone caratteristiche litotecniche appare pertanto in prima analisi piuttosto limitata.

SETTORE 1 (DA KM 0+000 A KM 3+800)

Il settore 1 è compreso tra l'inizio della tratta B2 (interconnessione con ex SS35) e la galleria artificiale Colombo (Km 3+800). Nella parte iniziale (galleria artificiale "Copreno Est") sono presenti depositi fluvioglaciali appartenenti all'allogruppo di Binago costituiti, come evidenziato dalle stratigrafie, da sabbie limoso-ghiaiose di colore marrone e rari ciottoli. In superficie è presente una coltre di alterazione limoso-argillosa con spessore consistente (fino a 5-6 m nei sondaggi SB2 01, SB2 02, BSE2 01) ed anche i sottostanti depositi sabbioso ghiaiosi evidenziano un sensibile stato di alterazione. Proseguendo verso SE, a partire dal km 0+375, il tracciato si sviluppa all'interno della più antica alloformazione del Bozzente caratterizzata da marcati caratteri di alterazione con fenomeni di decarbonatazione, argillificazione e arenizzazione dei clasti fino a circa 15 m da p.c. e dalla presenza di un livello di alterazione superficiale limoso-argilloso di spessore compreso tra 4 e 8 m. Le caratteristiche complessive dei terreni, all'interno dello spessore interessato dagli scavi appaiono pertanto da mediocri a scadenti. Dal Km 1+200 localmente si riscontrano condizioni più favorevoli per la comparsa di ghiaie e sabbie di colore grigio-nocciola con ridotta frazione limoso-argillosa, appartenenti all'unità di Besnate. Nel tratto prossimo al limite con l'unità del Bozzente i terreni presentano ancora un grado di alterazione medio-alto che tende a ridursi verso SE dove le caratteristiche litotecniche dei terreni si presentano discrete solo all'interno della più recente unità di Besnate, al di sotto dei livelli di alterazione superficiali e quindi per spessori piuttosto ridotti.

SETTORE 2 (DA KM 3+800 A KM 6+600)

Il settore 2, compreso tra la galleria artificiale Colombo e il km 6+660, è caratterizzato dalla presenza di estesi affioramenti dell'alloformazione di Cantù e dell'unità Postglaciale, che rappresentano le unità più recenti riscontrate lungo la tratta B2.

I depositi appartenenti all'unità postglaciale sono costituiti in prevalenza da ghiaie con sabbia limosa e ciottoli a spigoli da subarrotondati ad angolari di colore grigio-nocciola; i clasti appaiono generalmente ben conservati e buone caratteristiche litotecniche, con grado di alterazione basso o assente (classi WC1-WC2) che tende ad aumentare a profondità maggiori di 10-12 m da p.c. dove compaiono sabbie limose di colore marrone e ghiaia con ciottoli localmente degradati. I terreni dell'alloformazione di Cantù mostrano generalmente un grado di alterazione maggiore rispetto a quelli dell'unità Postglaciale, e localmente si rileva la presenza di un livello limoso superficiale con spessore fino a 4 m (sondaggio SB2_23).

Si segnala inoltre che nell'area dello svincolo di Meda sono localmente presenti spessori fino a 10 m di terreni di riporto.

SETTORE 3 (DA KM 6+600 A KM 9+600)

Nel settore 3, compreso tra il km 6+650 e la fine della tratta, affiorano unicamente terreni appartenenti all'allogruppo di Besnate costituiti in prevalenza da ghiaie in matrice sabbioso-limosa con un livello di alterazione superficiale di spessore generalmente ridotto (1-2 m). Lo stato di alterazione dell'unità risulta nel complesso moderato, con tendenza ad aumentare a partire da 6-7.5 m da p.c. Le condizioni più favorevoli per il reperimento di terreni di buona qualità si riscontrano nella parte finale del settore (galleria artificiale "Cesano Maderno"), dove sono presenti buoni spessori di ghiaie poco alterate con scarsa frazione limosa. Questo tratto appare il più promettente dell'intera tratta B2 per il riutilizzo delle terre e rocce da scavo, così come lo svincolo di Cesano Maderno che connette la tratta B2 alla C.

6 PROBLEMATICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO

In questo paragrafo vengono riportati in maniera sintetica, al fine di supportare la progettazione, le caratteristiche dei terreni di scavo e le principali criticità geologiche/geologico-tecnico attese lungo il tracciato di progetto.

Le principali criticità geologico-tecniche sono principalmente legate ai seguenti aspetti:

- presenza di terreni con alto grado di alterazione, con mediocri o scadenti caratteristiche di resistenza meccanica
- presenza di conglomerati ben cementati con tessitura vacuolare e la presenza di repentina alternanza sia verticale che laterale tra conglomerati lapidei e conglomerati fortemente alterati e degradati in ghiaie, sabbie e localmente limi sabbioso-argillosi, a profondità che possono interessare le fondazioni delle opere (gallerie, cavalcavia, ponti). Tali repentine variazioni delle caratteristiche di cementazione/alterazione, possono infatti determinare sensibili comportamenti differenziali delle caratteristiche meccaniche dei conglomerati che possono manifestare passaggi da resistenza buona a mediocre-scadente anche su brevi distanze.
- possibile presenza di cavità sotterranee (Occhi Pollini); quest'ultimo fenomeno in particolare, vista la rilevanza ai fini progettuali e realizzativi dell'opera, è stato approfondito al par. 6.1.
- possibili fenomeni di dissesto superficiale (soil slip) in corrispondenza delle scarpate di raccordo tra i terrazzi alluvionali (cfr. relazione geomorfologica EGGB2000GE00000RS004)
- rischio idraulico (esondazione, erosione spondale) lungo i corsi d'acqua principali (Seveso e Certesa, si rimanda alla Relazione Idraulica per dettagli)
- possibile interferenza tra falda acquifera e opere (riferita alla piezometria del 2014, assunta come falda di progetto) e/o possibile presenza di falde acquifere sospese localizzate, per tali aspetti si rimanda, per maggiori dettagli, alla Relazione Idrogeologica (elaborato EIGB2000GE00000RS001).

In Brianza assume rilevanza fondamentale nella realizzazione delle infrastrutture il fenomeno degli Occhi Pollini.

A tal riguardo si rammenta come la Provincia di Monza e della Brianza sia l'unica in Italia ad aver inserito nella pianificazione territoriale la valutazione della suscettibilità da Occhi Pollini nel sottosuolo, imponendo ai comuni ad essa appartenenti di inserire indicazioni circa la suscettibilità al fenomeno anche nei PGT comunali.

Si riporta di seguito un primo paragrafo relativo alle cavità sotterranee in termini generali e poi in relazione allo sviluppo dell'autostrada in tratta B2.

A chiusura del capitolo, invece, si riportano schede di sintesi che riportano le principali informazioni geologico-tecniche a supporto della progettazione, per tratte omogenee.

6.1 IL FENOMENO DEGLI OCCHI POLLINI

Rimandando all'appendice A per una trattazione esaustiva del tema, si riporta qui una rapida sintesi che consenta di tratteggiare brevemente il fenomeno degli Occhi Pollini.

6.1.1 GENERALITA' SUGLI OCCHI POLLINI

La zona dell'alta pianura lombarda è caratterizzata dalla presenza di un fenomeno peculiare, noto con il termine informale di "Occhi Pollini" o "nespolini".

Gli Occhi Pollini si presentano generalmente come cavità del sottosuolo che, sulla base delle attuali conoscenze, risulterebbero dalla dissoluzione della componente carbonatica dei depositi alluvionali, e dall'asportazione di particelle fini da parte delle acque circolanti nel sottosuolo. Il fenomeno (piping, suffosione, erosione sotterranea), che può portare a frane lungo le ripe di corsi d'acqua o delle strade e a cedimenti di edifici, si innesca in presenza di particolari condizioni geologiche legate alla morfologia, granulometria, composizione litologica, storia geologica e climatica ed è particolarmente diffuso nell'Alta Pianura Lombarda, in particolare in Brianza (figura 10).

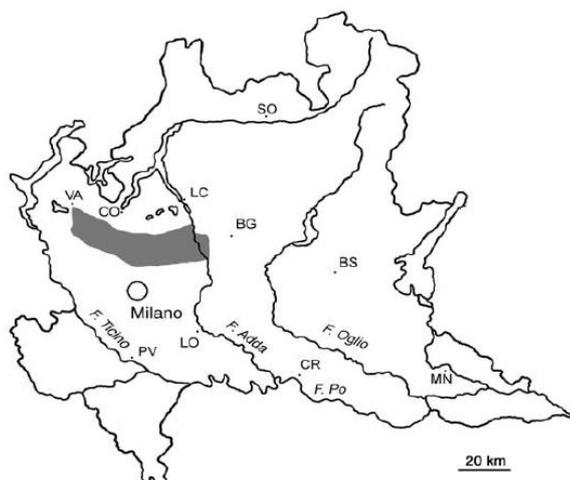


Figura 11 – in grigio, area di maggiore diffusione degli Occhi Pollini (da Strini, 2001)

Gli Occhi Pollini si rinvencono tipicamente all'interno dei depositi fluvioglaciali con elevato grado di alterazione appartenenti all'Allogruppo di Binago (Riss Auct.) e all'Allogruppo del Bozzente (Mindel Auct.), ma localmente possono presentarsi anche all'interno di unità più recenti (Allogruppo di Besnate). Sono localizzati normalmente al di sopra della falda acquifera, a profondità variabili da pochi decimetri fino a 10-20 m. La loro origine in questo caso è legata a processi di piping, mentre la frazione argillosa derivante dall'alterazione fornisce la coesione necessaria al mantenimento della cavità. Molto diffuse anche le cavità in conglomerato (Ceppo auct.), dove il limo e l'argilla vengono asportati insieme a una parte del cemento carbonatico. Le cavità, che singolarmente possono avere dimensioni di diversi metri cubi, possono essere interpretate come un sistema di vuoti interconnessi lungo i quali l'acqua si sposta fino a un recapito che può consistere nella falda o in una risorgenza o in un corpo idrico superficiale. Questo schema di circolazione è emerso in seguito all'analisi delle prospezioni geognostiche eseguite in sede progettuale, e non risultava in precedenza noto se non in termini generali. Il reperimento di questo complesso sistema di cavità si distingue infatti soprattutto per la profondità da esse raggiunta (fino a circa 30 m in alcuni casi) e per la sua grande estensione.

La presenza degli Occhi Pollini nel sottosuolo viene generalmente rilevata grazie alla scarsa resistenza all'avanzamento delle sonde penetrometriche, solitamente le cavità sono distinguibili per una resistenza nulla o quasi nulla. Si nota frequentemente che anche al di sopra delle cavità i terreni presentano cadute di resistenza, fino quasi alla superficie. La riduzione delle caratteristiche meccaniche dei terreni non è quindi limitata alla sola cavità, come viene spiegato dalla ricostruzione della loro genesi. I tratti in cui sono stati riscontrati sia Occhi Pollini che cavità vacuolari, capaci di produrre importanti fenomeni di detensionamento anche nel terreno circostante a diversi metri di distanza dai vuoti stessi.

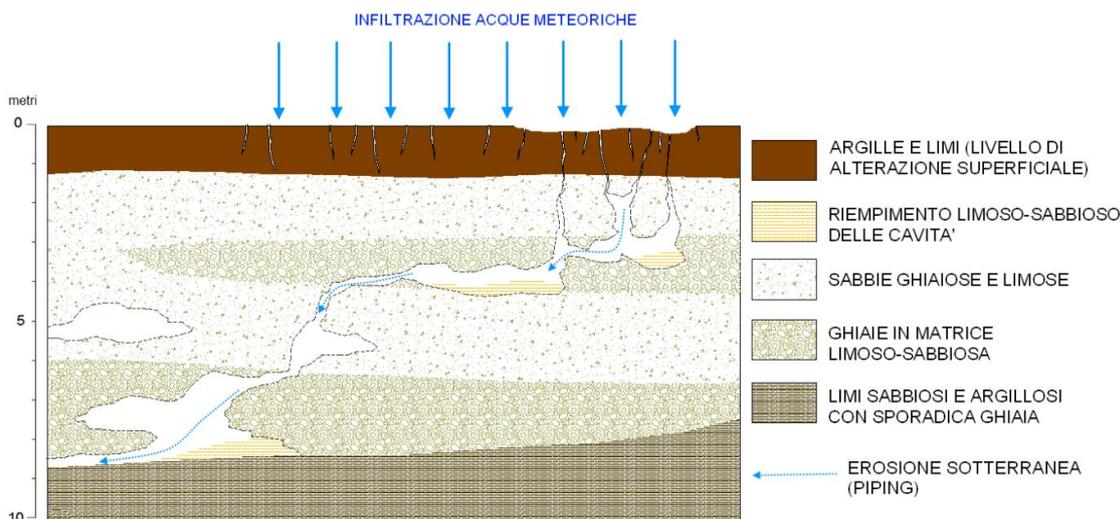


Figura 12 – Rappresentazione schematica in sezione di gallerie e cavità (Occhi Pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione

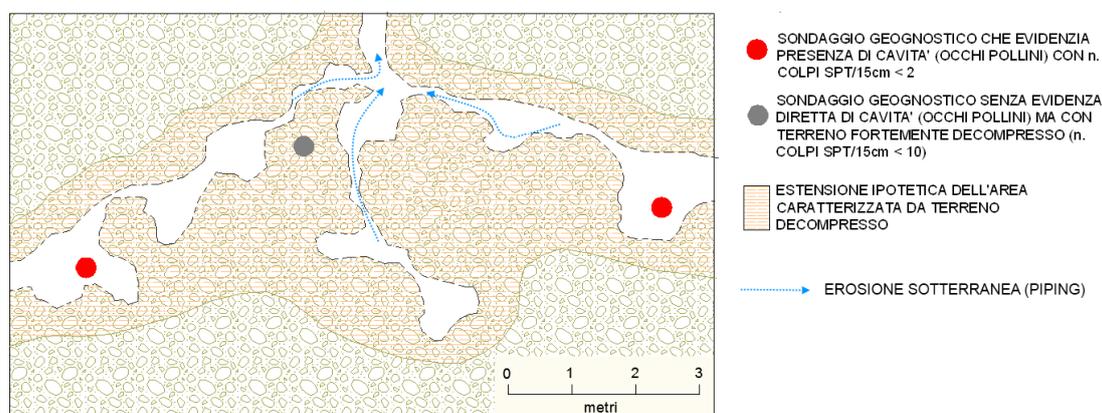


Figura 13 – Rappresentazione schematica in pianta di una rete di cavità (Occhi Pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione, che determinano la formazione di una fascia di decompressione dei terreni circostanti (retinatura in rosso)

Con il termine Occhi Pollini si intendono in realtà più fenomeni diversi. Da un punto di vista scientifico, gli Occhi Pollini (Strini, 2004) possono essere divisi in 4 tipologie differenti, in parte collegate tra esse: gallerie superficiali, cavità vere e proprie, cavità in conglomerato, zone a bassa resistenza. Per una descrizione di dettaglio delle diverse tipologie si rimanda alla letteratura specifica una migliore trattazione e all'Appendice A, ove viene fornita una descrizione più precisa delle varie forme assunte dal fenomeno.

6.1.2 DIFFUSIONE DEL FENOMENO LUNGO IL TRACCIATO

Al fine di determinare la diffusione del fenomeno degli Occhi Pollini nell'area di progetto, sono state ricercate le evidenze all'interno delle stratigrafie e fotografie delle cassette catalogatrici relative ai sondaggi disponibili, sia riconducibili alla campagna di Progetto, sia a fonti bibliografiche, identificando porzioni di sottosuolo caratterizzate da cavità conclamate (mancato recupero di materiale nei sondaggi), oppure associate ad un numero di colpi delle prove SPT o SCPT <2 per almeno mezzo metro.

Lungo la tratta B2, i sondaggi realizzati nelle campagne di indagine di PD e PE hanno rilevato la presenza di due possibili cavità di dimensioni metriche in corrispondenza del sondaggio SB2_33 (km 6+200) a profondità di 9 m e 13.5 m, evidenziate da valori di SPT inferiori a 2 (in particolare a 13.5 m, con 1 solo colpo per 45 cm di avanzamento).

Una cavità superficiale di dimensioni ridotte (da 2.25 a 3.75 m) è stata inoltre individuata in corrispondenza del sondaggio SB2_06.

Le stratigrafie dei sondaggi SB2_16, SB2_18, SB2_20 hanno registrato il mancato recupero di materiale, all'interno di conglomerati lapidei vacuolari da mediamente a ben cementati, a profondità comprese tra 19 e 35 m da p.c. Nella descrizione stratigrafica non sono riportati dettagli relativi alla natura e alle cause del mancato recupero segnalato ma le indicazioni di altri fattori emersi dall'analisi di dettaglio dei dati raccolti nell'intorno di questi tratti non fanno propendere per la loro esistenza. Pur tuttavia l'evenienza che si tratti di cavità non può del tutto essere esclusa. Gli approfondimenti legati alla realizzazione dei nuovi sondaggi relativi alla campagna di indagine di PE non hanno comunque individuato cavità lungo l'intera tratta B2 cavità sotterranee. Questo risultato rafforzerebbe l'ipotesi di mancati recuperi legati a problemi tecnici di manovra, più che all'esistenza di Occhi Pollini nei casi summenzionati.

6.1.3 ANALISI DI SUSCETTIBILITA' AGLI OCCHI POLLINI

L'analisi della suscettibilità associata al fenomeno degli Occhi Pollini elaborata per la tratta B2 (si rimanda per maggiori dettagli all'elaborato specifico EGGB2000GE00000RS001 – Relazione analisi suscettibilità agli Occhi Pollini), come appare dallo stralcio della tavola (elaborato EGGB2000GE00000MP001) in figura 13 evidenzia una suscettibilità al potenziale sviluppo di Occhi Pollini complessivamente bassa, in particolare nella parte finale della tratta, e localmente media nella parte centrale e settentrionale.

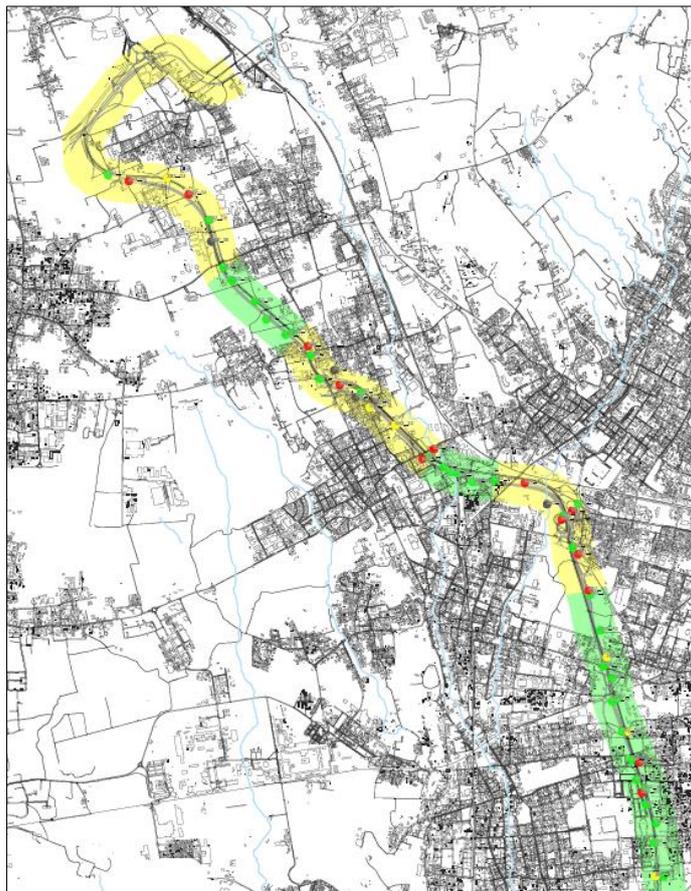


Figura 14 – mappa della suscettibilità associata al fenomeno degli Occhi Pollini lungo la tratta B2, si evidenzia complessivamente una bassa suscettibilità, con locali tratti a suscettibilità media nella parte centrale e settentrionale del tracciato

6.1.4 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI E DEI RISCHI CONNESSI AGLI OCCHI POLLINI

Per i tratti caratterizzati da alta suscettibilità al fenomeno degli Occhi Pollini, si prevede di adottare in fase di realizzazione dell'opera una serie di azioni ed interventi volti prevenire e minimizzare gli impatti sulla prestazionalità delle opere, nonché a garantire la sicurezza per maestranze e macchinari e degli edifici interferenti. Il dettaglio delle azioni previste è oggetto di uno specifico documento in fase di redazione.

6.2 SCHEDE DI SINTESI PER TRATTE OMOGENEE

Di seguito sono riportate, riassunte in schede di sintesi, le principali criticità geologiche e geologico-tecniche evidenziate nei diversi settori omogenei del tracciato di progetto, indicando le distanze progressive e le opere principali per ciascuna tratto.

TRCO06

| | |
|---|---|
| Opere principali | Viadotto Novedratese |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni limoso-argillosi e/o ghiaioso-sabbiosi molto alterati, localmente con mediocri caratteristiche di resistenza fino ad una profondità massima localmente di 20-25 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | In corrispondenza del Viadotto Novedratese, presenza di livelli plurimetrici di conglomerati lapidei da mediamente a ben cementati, con tessitura vacuolare e fenomeni di dissoluzione a partire da 12-17m da p.c. alternati a depositi ghiaioso-sabbiosi alterati. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Media |
| Presenza Occhi Pollini | Non rilevati da indagini PD e PE |
| Dissesti idrogeologici | Possibili fenomeni di dissesto in corrispondenza del raccordo tra terrazzi alluvionali, su scarpate a medio-alta acclività caratterizzati dalla presenza di depositi eluvio-colluviali limoso-argillosi |
| Idrogeologia/falda | Assenza di interferenza tra falda e opere |
| Rischio Idraulico | Assente- |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Scadenti per presenza di sabbie e ghiaie con grado di alterazione medio-alto e localmente limi sabbioso-ghiaiosi con elevato grado di alterazione fino a profondità di 15-20 m da p.c |

Da km 0 a km 1050

| | |
|---|--|
| Opere principali | G.A. Copreno Ovest; C.V. Industrie Ovest |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni limoso-argillosi e/o ghiaioso-sabbiosi molto alterati con mediocri caratteristiche di resistenza fino ad una profondità massima localmente di 8-15 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Non rivenuti alla massima profondità di indagine (35 m) |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Media |
| Presenza Occhi Pollini | Non rilevati da indagini PD e PE |
| Dissesti idrogeologici | Non attesi |
| Idrogeologia/falda | Possibile presenza locale di falde sospese; Assenza di interferenza tra falda e opere |
| Rischio Idraulico | - |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Da mediocri a scadenti per elevato grado di alterazione con diffusi fenomeni di decarbonatazione e argillificazione dei clasti fino a circa 15 m di profondità |

Da km 1050 a km 1700

| | |
|---|---|
| Opere principali | G.A. Oberdan; G.A. Manzoni |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni limoso-argillosi e/o ghiaioso-sabbiosi con mediocri caratteristiche di resistenza fino ad una profondità massima localmente di 6-8 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Non rivenuti alla massima profondità di indagine (25 m) |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Media |
| Presenza Occhi Pollini | Locale presenza di Occhi Pollini di ridotte dimensioni a profondità di 3-5 m da p.c. (SB2_06) |
| Dissesti idrogeologici | Possibili fenomeni di dissesto in corrispondenza del raccordo tra terrazzi alluvionali, su scarpate a medio-alta acclività caratterizzati dalla presenza di depositi eluvio-colluviali limoso-argillosi |
| Idrogeologia/falda | Possibile presenza locale di falde sospese; assenza di interferenza tra falda e opere |
| Rischio Idraulico | Assente |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Discrete solo all'interno della più recente unità di Besnate, al di sotto dei livelli di alterazione superficiali, e quindi per spessori piuttosto ridotti |

Da km 1700 a km 3500

| | |
|---|---|
| Opere principali | G.A. Mirabello / G.A. Montegrappa Ovest /G.A. Lentate |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati con mediocri caratteristiche geotecniche localmente fino a 5-6 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Dal km 3+300, presenza di conglomerati lapidei da mediamente a ben cementati, con tessitura vacuolare e fenomeni di dissoluzione localmente a partire da 12-13 m da p.c.; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose e sabbie limoso-ghiaiose. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Bassa (km 1700-3600) Media (km 2500-3500) |
| Presenza Occhi Pollini | Mancato recupero di materiale durante i sondaggi di PD probabilmente non legato alla presenza di cavità all'interno dei conglomerati lapidei a profondità comprese tra 19 e 28 m da p.c. |
| Dissesti idrogeologici | Assenti |
| Idrogeologia/falda | Assenza di interferenza tra falda e opere |
| Rischio Idraulico | Assente |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Discrete solo all'interno della più recente unità di Besnate, al di sotto dei livelli di alterazione superficiali, e quindi per spessori piuttosto ridotti |

Da km 3500 a km 4400

| | |
|---|---|
| Opere principali | G.A. Colombo / Ponte V. Marconi |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni limosi con mediocri caratteristiche geotecniche localmente fino a 5-6 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Presenza di livelli di conglomerato lapideo apparentemente più continui che negli altri tratti, da mediamente a ben cementati, con tessitura vacuolare e fenomeni di dissoluzione a partire da 20-22 m da p.c.; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose e sabbie limoso-ghiaiose. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Media |
| Presenza Occhi Pollini | Mancato recupero di materiale durante i sondaggi di PD probabilmente non legato alla presenza di cavità all'interno dei conglomerati lapidei a profondità comprese tra 19 e 28 m da p.c. |
| Dissesti idrogeologici | Assenti |
| Idrogeologia/falda | Assenza di interferenza tra falda e opere |
| Rischio Idraulico | Rischio idraulico legato a possibili esondazioni dei fiumi Seveso e Certesa |

| | |
|---|--|
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Complessivamente buone, con grado di alterazione basso o assente nei primi 10-12 m, ad eccezione della locale presenza di livelli limoso-sabbiosi superficiali con spessore fino a 4 m |
|---|--|

Da km 4400 a km 5500

| | |
|---|---|
| Opere principali | Ponti Seveso, Vinci, FNM1, Milano, FNM2, svincolo di Meda |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di spessori rilevanti (fino a 15 m) di terreni di riporto di origine antropica |
| Presenza di conglomerati lapidei | Presenza di conglomerati lapidei da mediamente a ben a partire da 16-18 m da p.c.; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose, sabbie limoso-ghiaiose. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Bassa |
| Presenza Occhi Pollini | Non rilevati da indagini PD e PE |
| Dissesti idrogeologici | Eventualmente legato all'erosione spondale/scalzamento al piede del f. Seveso |
| Idrogeologia/falda | Assenza di interferenza tra falda e opere ma vicinanza entro 5 m della falda di progetto (9-2014) con le fondazioni delle opere |
| Rischio Idraulico | Rischio idraulico legato a possibili esondazioni del fiume Seveso |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Presenza di consistenti spessori fino a 10 m di terreni di riporto; caratteristiche litotecniche dei sottostanti depositi alluvionali e fluvioglaciali complessivamente buone |

Da km 5500 a km 6+000

| | |
|---|--|
| Opere principali | Ponte Certesa 1, C.V. Meda |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Locale presenza di materiali di riporto scarsamente addensati con spessore fino a 10 m/Terreni sabbioso-limosi alterati fino a 10-15 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Presenza di conglomerati lapidei da mediamente a ben cementati, con tessitura vacuolare e fenomeni di dissoluzione a partire localmente da 13-15 m da p.c.; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose, sabbie limoso-ghiaiose. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Media |
| Presenza Occhi Pollini | Isolata presenza di Occhi Pollini di ridotte dimensioni fino a 15 m di profondità (SB2_33) |
| Dissesti idrogeologici | Eventualmente legato all'erosione spondale/scalzamento al piede del t. Certesa |
| Idrogeologia/falda | Assenza di interferenza tra falda e opere ma vicinanza entro 5 m della falda di progetto (9-2014) con le fondazioni delle opere |
| Rischio Idraulico | Rischio idraulico legato a possibili esondazioni del t. Certesa |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Complessivamente discrete/buone, con grado di alterazione medio-basso fino a circa 7 m di profondità. Aumento dell'alterazione della frazione fine a profondità maggiori. |

Da km 6000 a km 6600

| | |
|---|---|
| Opere principali | C.V. Vignazzola |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni ghiaiosi relativamente recenti e mediamente addensati per 13-15 m da p.c. |
| Presenza di conglomerati lapidei | Presenza di conglomerati lapidei da mediamente a ben cementati, con tessitura vacuolare e fenomeni di dissoluzione a partire da 12-13 m da p.c.; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose, sabbie limoso-ghiaiose. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Medio-bassa |
| Presenza Occhi Pollini | Non rilevati da indagini PD e PE |

| | |
|---|--|
| Dissesti idrogeologici | Assenti |
| Idrogeologia/falda | Vicinanza tra falda di progetto (9-2014) e fondazioni delle opere |
| Rischio Idraulico | Rischio idraulico legato a possibili esondazioni del t. Certesa |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Complessivamente buone, con grado di alterazione basso o assente e scarsa frazione fine fino a 13-15 m di profondità |

Da km 6600 a km 9600 (fine tratta B2)

| | |
|---|--|
| Opere principali | G.A. Seveso/G.A. Barruccanetta/ Ponte V. De Medici/G.A. Cesano Maderno; |
| Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni | Presenza di terreni ghiaiosi da poco a moderatamente addensati nei primi 4-5 m da p.c. al km 7350 e km 8100-8400, localmente (sondaggi SB_60-61, km 9+600, fino a 10-15 m da p.c.) |
| Presenza di conglomerati lapidei | Sporadica presenza di conglomerati lapidei da mediamente a ben cementati a rilevante profondità; alternanza sia verticale che laterale con livelli di conglomerato alterato e degradato in ghiaie sabbiose, sabbie limoso-ghiaiose, localmente interferenti con le fondazioni delle opere. Solamente tra le km 7400 e 7800 vengono rilevate da profondità di 12-13 m da p.c. I conglomerati si approfondiscono poi a fine tratta fino a 30 m da p.c. |
| Suscettibilità Occhi Pollini | Bassa |
| Presenza Occhi Pollini | Non rilevati da indagini PD e PE |
| Dissesti idrogeologici | Assenti |
| Idrogeologia/falda | Vicinanza tra falda di progetto (9-2014) e fondazioni delle opere (cvf Stuzo-de Medici e G.A. Cesano Maderno. |
| Rischio Idraulico | Assente |
| Caratteristiche litotecniche terre di scavo | Generalmente buone, in particolare nella parte finale della tratta dal km 8900, con tratti discreti alternati a tratti buoni altrove |

BIBLIOGRAFIA

- Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, foglio 096 Seregno – Servizio Geologico D'Italia
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Lentate sul Seveso
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Barlassina
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Meda
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Seveso
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Cesano Maderno
- Lorenzo C., Consonni M., Colombo L., Gattinoni P. - Problemi di stabilità per le infrastrutture nelle aree interessate da cavità (Occhi Pollini) nei sedimenti pleistocenici della pianura lombarda; Mem. Descr. Carta Geol. D'It. XCIX (2015), pp. 315 - 326
- Strini A. (2001) - Gli Occhi Pollini della Brianza orientale. Genesi ed evoluzione del fenomeno nel quadro geologico regionale. Tesi di dottorato di ricerca, Università degli Studi di Milano.
- Strini A. (2004) - Erosione sotterranea e sprofondamenti nell'alta pianura lombarda: gli Occhi Pollini
- Tomasi F., Strini A. (2017) – Il territorio di Milano nella nuova cartografia geologica, la storia geologica recente; presentazione dei fogli 118 Milano e 096 Seregno, Milano 17/05/2017

APPENDICE A – OCCHI POLLINI

a.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La zona dell'alta pianura lombarda è caratterizzata dalla presenza di un fenomeno peculiare, noto con il termine informale di "Occhi Pollini" o "nespolini".

Questi termini, di chiara derivazione dialettale, indicavano all'origine vere e proprie cavità che si ritrovavano in sedimenti sciolti, e/o sprofondamenti legati anch'essi a cavità, presenti in una fascia di territorio compresa nell'alto milanese. Caratteristica peculiare rispetto ad altre tipologie di cavità è che essi si formano e si evolvono in sedimenti sciolti (sabbie, ghiaie, limi) e non in materiale lapideo come avviene per le grotte carsiche e/o le grotte laviche.

Con il tempo, e con il miglioramento delle tecniche di indagine, non più limitate alla mera osservazione durante gli scavi, il termine ha assunto un significato più ampio. Infatti, da un lato è stato possibile riconoscere gli Occhi Pollini anche in profondità sia grazie a indagini dirette (carotaggi), sia tramite indagini indirette (es. prove penetrometriche, che è la tecnica più usata), dall'altro sono confluiti nel termine Occhi Pollini situazioni che portano a scadimenti delle caratteristiche geotecniche analoghe a quelle degli Occhi Pollini "classici" anche in assenza di vere e proprie cavità.

Con il termine Occhi Pollini si intendono in realtà più fenomeni diversi. Da un punto di vista scientifico, gli Occhi Pollini (Strini, 2004) possono essere divisi in 4 tipologie differenti, in parte collegate tra esse: gallerie superficiali, cavità vere e proprie, cavità in conglomerato, zone a bassa resistenza. Di seguito viene data una breve descrizione delle tipologie, rimandando alla letteratura specifica una migliore trattazione.

Cavità

Si tratta del fenomeno più tipico con cui si manifestano gli Occhi Pollini. Sono cavità di dimensione variabile da pochi decimetri cubi a molti metri cubi. Esse sono presenti da poco sotto la superficie fino a oltre 20 m di profondità; nei casi in cui sono state viste direttamente esse presentano generalmente una volta a cupola e possono essere presenti cunicoli e piccole gallerie che si dipartono dalla base. Le cavità possono essere vuote o riempite da materiale di crollo o da sedimenti fini. Il fatto di rinvenire materiale fine lungo le pareti e, talora, la presenza al fondo di sedimenti laminati testimonia la circolazione e stagnazione di acqua nelle cavità; queste, inoltre, possono essere collegate tra loro, formando veri e propri reticoli.

Una caratteristica fondamentale è che le cavità non costituiscono un fenomeno statico, ma possono evolvere sia per crollo, con il materiale che dalla volta si accumula alla base portando di fatto a una risalita del materiale stesso, sia per erosione causata dall'acqua di infiltrazione o dall'acqua circolante nel sistema.

Altra caratteristica importante è che gli Occhi Pollini non hanno effetti apprezzabili in superficie se non nel momento parossistico finale, con la formazione di una dolina (o sinkhole), o nel momento in cui esse interferiscono con le strutture e infrastrutture, creando cedimenti e fessurazioni.



Figura 15 - Esempio di cavità rinvenuta durante gli scavi in un cantiere presso Novedrate, a sx; a dx sezione di un occhio pollino presso Bernareggio formatosi in ghiaie alterate; si notano alcune caratteristiche tipiche quali la volta emisferica e il materiale di crollo alla base (fonte: dott.Andrea Strini)



Figura 16 - Particolare delle pareti di una cavità: si nota il rivestimento di materiale fine lungo le pareti con locale accumulo, testimoniante il fatto di una intensa circolazione d'acqua che porta in sospensione sedimenti. (fonte: dott.Andrea Strini)



Figura 17 – OP nei depositi alluvionali; si nota molto bene la presenza di cavità di dimensioni diverse a breve distanza, come si vedrà nelle immagini seguenti, si intuiscono zone di interconnessione tra le cavità vere e proprie. (fonte: dott. Fabio Baio)



Figura 18 – OP nei depositi alluvionali; cavità nei depositi sciolti di dimensioni ragguardevoli; si notano canali di interconnessione tra le diverse cavità, aventi forma lineare e non ellittica come le cavità principali. (fonte: dott. Fabio Baio)

Cavità nel conglomerato

Le cavità nel conglomerato, intendendo con questo termine principalmente i "Ceppi" lombardi, sono strettamente legate agli Occhi Pollini. Da un lato i vuoti di dimensioni cospicue sono indicati talora come Occhi Pollini, dall'altro i diversi tipi di vuoti sono una delle cause di generazione degli Occhi Pollini stessi.

Uno dei meccanismi per la formazione di cavità nei conglomerati è la dissoluzione carsica in senso stretto, in quanto il cemento dei conglomerati lombardi è a componente carbonatica e in genere si ha una forte componente carbonatica nei ciottoli che li costituiscono. Altro meccanismo che porta ad avere cavità di dimensioni ragguardevoli nel conglomerato è l'asportazione del materiale successiva all'alterazione del conglomerato stesso. L'asportazione può avvenire per processi di piping (o ravelling) che sono all'origine anche degli Occhi Pollini precedentemente descritti. L'alterazione dei conglomerati può essere anche molto spinta, raggiungendo lo spessore plurimetrico e spesso si caratterizza per avere uno sviluppo molto variabile con la profondità, dando origine a un profilo ad organi geologici; a zone di conglomerato ancora bene cementato e compatto, si giustappungono zone con il conglomerato totalmente alterato.



Figura 19 - Esempio di conglomerato a organi geologici; si nota il profilo estremamente irregolare del tetto del conglomerato dovuto al fronte di alterazione che ha una geometria irregolare. (fonte: dott.Andrea Strini)



Figura 20 - Camino dovuto a organi geologici in conglomerato in cui la parte alterata è stata asportata. In questo caso il tetto della cavità è in superficie, ma queste situazioni possono verificarsi anche in sottosuolo con svotamento della cavità sotterranee (fonte: dott.Andrea Strini)

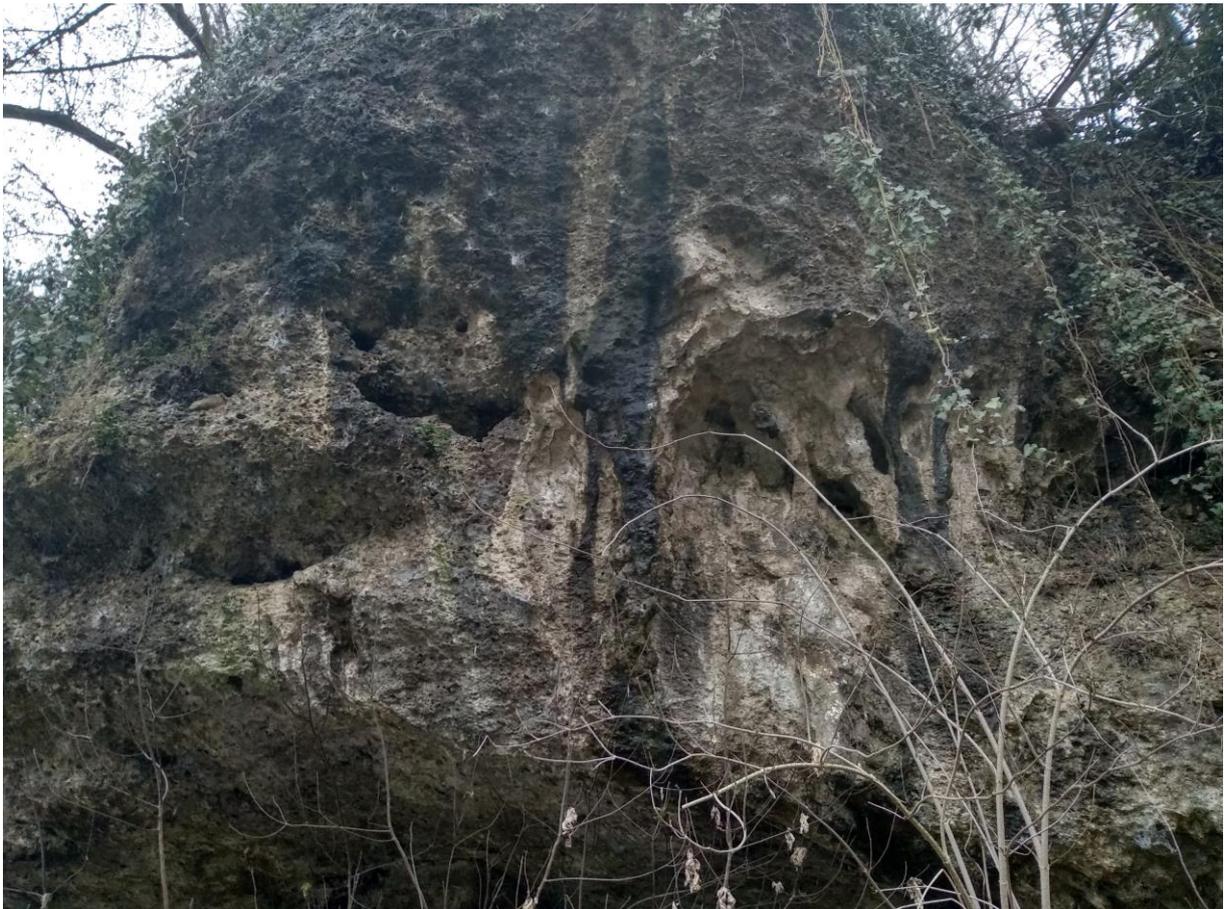


Figura 21 – cavità nel Ceppo (Trezzo sull'Adda), che evidenzia forme di carsismo evidente (fonte: ing Cesareo Lorenzo)



Figura 22 – cavità nel Ceppo vacuolare (Trezzo sull'Adda - fonte: ing Cesareo Lorenzo)



Figura 23 – cavità nel Ceppo vacuolare (Trezzo sull'Adda - fonte: ing Cesareo Lorenzo)

Considerazioni generali

La presenza di cavità costituisce un elemento di debolezza, in quanto il terreno di fianco o sopra una cavità si trova meno confinato rispetto a un terreno nelle medesime condizioni geologiche distante da una cavità.

Esse possono essere anche tra loro interconnesse, dando vita ad un vero e proprio reticolo dalle scadenti proprietà meccaniche o vuoti veri e propri di estensione anche molto rilevante (diverse decine di metri).

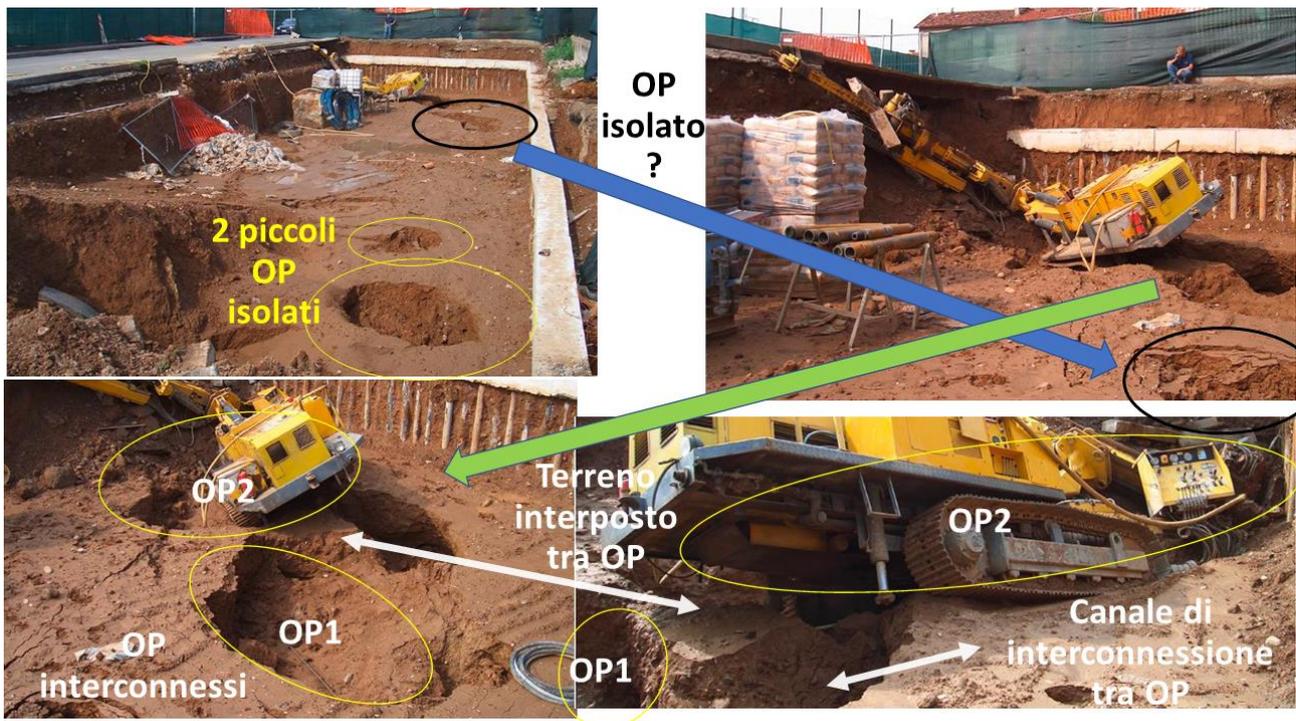


Figura 24 – gli Occhi Pollini possono essere tra loro interconnessi, creando reticoli vuoti o dalle scadenti proprietà meccaniche anche molto estesi, per decine di metri (foto: dott. Fabio Baio)

Si possono quindi immaginare le cavità come "ammantellate" da una fascia di terreno di larghezza variabile in cui le risposte alle prove penetrometriche non è nulla, ma è più bassa rispetto a un terreno che non presenza cavità. Questa fascia di terreno indebolita viene definita come zona di "detensionamento" da Lorenzo et al (2015)

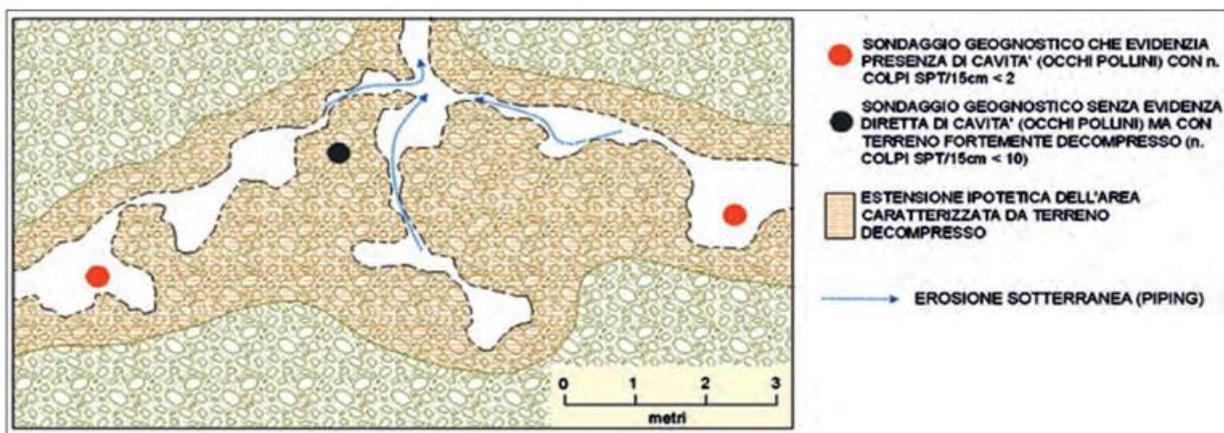


Figura 25 - Occhi Pollini identificati tramite prove penetrometriche in foro e fascia di decompressione. Da Lorenzo et al. 2015.

È possibile, quindi, che alcuni dei livelli o zone con ridotta resistenza siano dovuti non già all'intercettazione di cavità vere e proprie, ma del fatto che, nelle vicinanze, siano presenti Occhi Pollini.

Livelli con resistenza ridotta possono rinvenirsi anche perché una parte del materiale, in genere la più fine, è stata asportata per piping. Si ha quindi uno scadimento delle caratteristiche del terreno per asportazione di una frazione del terreno da parte delle acque circolanti nel sottosuolo.

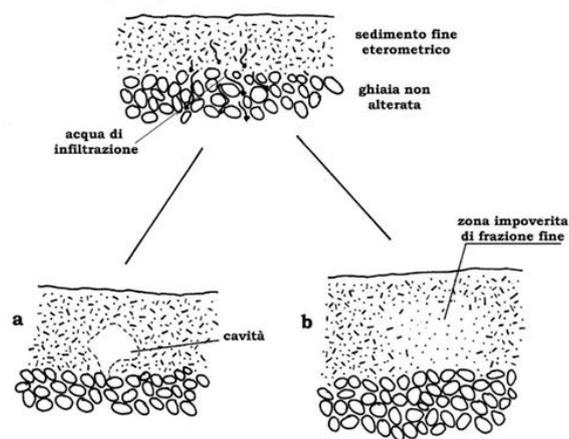


Figura 26 - Effetto dell'asportazione della frazione più fine in una successione data da ghiaie e, superiormente una materiale più fine. Nelle giuste condizioni il materiale fine viene trasportato all'interno delle ghiaie; nello strato superiore si possono avere due casi; o si forma una cavità vera propria o si ha asportazione parziale del materiale rendendo con scadimento delle caratteristiche.

La geometria di questi livelli e delle cavità, in mancanza di evidenze dirette non può essere definita in modo certo, ma solo desunta dalla correlazione tra le prove e, solo in certi casi, ipotizzata nel caso di risposta positiva a indagini geofisiche. Risulta però evidente come una delle caratteristiche del fenomeno sia proprio l'estrema variazione laterale e verticale.

È importante osservare che, al di là delle cause effettive spesso non determinabili, questi livelli, così come gli Occhi Pollini dati da cavità vere e proprio nel contesto geologico brianteo, possono evolvere in modo parossistico creando cedimenti improvvisi.

a.2 CONDIZIONI INFLUENTI LA GENESI E LO SVILUPPO DELLE CAVITA' SOTTERRANEE

I fattori e le condizioni che influiscono sulla genesi delle cavità sotterranee sono molteplici, spesso tra loro sovrapposti, e possono cambiare a seconda del fenomeno considerato (ad esempio le cavità nel conglomerato possono avere genesi diversa dalle cavità nei sedimenti alterati). È importante sottolineare che le cavità si sviluppano per un insieme di fattori e che i diversi fattori hanno anche essi una variabilità intrinseca.

La genesi è tutt'ora in studio e non esiste un modello fisico che indichi valori certi di determinati parametri che possano determinare la presenza o la possibilità che si inneschino fenomeni subsuperficiali; non è quindi possibile affrontare il problema in modo deterministico.

Benché lo sviluppo delle cavità derivi da un insieme di fattori che possono agire singolarmente e/o in sinergia, di seguito i diversi fattori vengono suddivisi in tre grandi categorie con il solo scopo descrittivo.

Si fa presente inoltre che i fattori elencati di seguito si basano su un modello sviluppato nell'area Briantea a Est del fiume Lambro e che ha comunque avuto riscontri anche al di fuori di quest'area. La zona di Monza, nella quale gli Occhi Pollini sono un fenomeno diffuso (come testimoniato anche dalle indagini geotecniche analizzate in questo lavoro e diffuse nell'intorno dell'opera) si discosta leggermente dalle condizioni più classiche. È possibile quindi che esistano anche altri fattori che possono influire sulla genesi e sviluppo degli Occhi Pollini.

Fattori geologici – Alterazione dei terreni

Per la genesi delle cavità vere e proprie, ovverosia dei vuoti ben identificati all'interno di sedimenti sciolti, è necessaria una certa coesione del terreno, in quanto essa consente il mantenimento della cavità stessa che altrimenti non avrebbe modo di formarsi generando semplicemente una dolina da subsidenza.

La coesione di un terreno è data sostanzialmente dalle frazioni più fini; considerando il contesto geologico in esame, caratterizzato da sedimenti fluvioglaciali, dominati da ghiaie e sabbie, la frazione più fine è da relazionarsi soprattutto all'alterazione e quindi all'età dei depositi. Infatti, maggiore è l'età del deposito, maggiore è, teoricamente, lo spessore della coltre alterata e maggiore è l'evoluzione dell'alterazione con produzione di minerali delle argille a scapito della frazione minerale più grossolana; questo è rilevante anche nel conglomerato.

Ovviamente in una successione sedimentaria continentale vi sono altre origini per il materiale coesivo; una frazione fine è spesso presente nelle normali successioni (come testimoniato dalle analisi granulometriche condotte nella presente campagna di indagine). Particolari arricchimenti possono esservi in corrispondenza di livelli e lenti di ambienti a bassa energia (es. lacustri o lanche), o da coltri di loess. Anche in quest'ultimo caso a tetto dei terrazzi più antichi le coltri di loess sono più spesse e più pedogenizzate favorendo le condizioni per la generazione di Occhi Pollini.

L'alterazione procede dall'alto verso il basso e quindi, teoricamente, in una successione si ha una diminuzione costante dell'alterazione (e quindi del materiale fine di origine pedogenetica) a partire dalla superficie e muovendosi verso il basso. Tuttavia, la pianura è costituita dalla giustapposizione e sovrapposizione di sedimenti di età diversa e quindi sedimenti più giovani (meno alterati) possono aver coperto sedimenti più vecchi e più alterati. È quindi possibile rinvenire anche in profondità livelli con alterazione maggiore dei sedimenti sovrastanti. La presenza, lo spessore e l'entità di eventuali livelli alterati profondi deriva non soltanto dalle caratteristiche dei sedimenti più vecchi, ma anche dall'entità dell'erosione dovuta alle fasi successive.

L'alterazione, inoltre, può interessare anche il conglomerato, di fatto eliminando la cementazione ed alterando i clasti e quindi predisponendo l'eventuale asportazione di materiale in un sedimento altrimenti lapideo.

Fattori geologici – Cementazione

La cementazione è un fattore che può agire in diversi modi nella generazione degli Occhi Pollini.

La cementazione debolmente espressa può essere un fattore che favorisce la presenza di Occhi Pollini in quanto permette alle cavità di sostenersi senza crollare prematuramente in quanto lega le particelle del terreno senza però costituire un reticolo tale da ostacolare la circolazione dell'acqua e l'asportazione del materiale più fine. Tracce di debole cementazione sono riportate nelle stratigrafie derivanti da bibliografie e nelle stratigrafie dei sondaggi realizzati nelle campagne di indagine specifiche per l'opera in esame. In un caso (Dell'Oca, 1957) era stata osservata cementazione recente sulle pareti di una cavità apertasi nel paese di Concorezzo; data l'origine probabilmente antropica della cavità, legata alla presenza di un pozzo per acqua, si può osservare come la cementazione possa svilupparsi su tempi relativamente ridotti.

Le variazioni nella distribuzione della cementazione, specie intesa come lenti e livelli cementati di estensione e spessore ridotto, inoltre contribuiscono all'eterogeneità del materiale con variazioni significative su brevi distanze delle caratteristiche del sedimento, che sono uno dei motivi che possono portare l'innescò degli Occhi Pollini in quanto modificano localmente la circolazione delle acque e il gradiente idraulico locale.

La cementazione, in forma di conglomerato (ceppi) è un altro fattore fortemente predisponente, in un conglomerato, infatti, possono generarsi cavità per carsismo, che costituiscono uno dei tipi di Occhi Pollini o può essere presente una porosità primaria.

Le cavità nei conglomerati, intese sia come cavità vere e proprie che, come fratture allargate, possono avere diverse implicazioni. Innanzi a tutto esse funzionano da via di fuga e recapito per il materiale asportato nel sedimento sovrastante, consentendo quindi lo smaltimento del sedimento "eroso" e consentendo al fenomeno Occhi Pollini di continuare a progredire.

Inoltre, le discontinuità costituiscono delle singolarità in cui, in un contesto di materiale impermeabile (il conglomerato "lapideo") si hanno dei punti con permeabilità elevatissima (il vuoto). Localmente, questi punti possono innescare il fenomeno di erosione, analogo a quello visto per le gallerie superficiali che, una volta innescato, si autoalimenta. La cavità si ingrandisce ad ogni venuta d'acqua e più si ingrandisce più richiama acqua. Il materiale viene trasportato e allontanato lungo le cavità nel conglomerato e disperso in ampi volumi di roccia e/o sedimento.

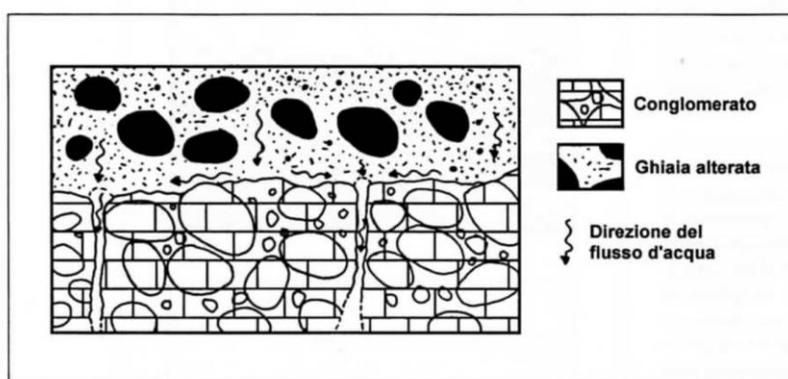


Figura 27 - Effetto della presenza delle fratture in un conglomerato sovrastato da ghiaia alterata (o altro sedimento leggermente coesivo). Al contatto con il conglomerato, l'acqua di filtrazione si dirige verso le fratture, rimaste aperte perchè il materiale sovrastante è coesivo. In quel punto può generarsi erosione che, a sua volta, genera una cavità. Da Strini (2004).

Fattori idrogeologici

Gli Occhi Pollini si formano ed evolvono per circolazione di acqua nel sottosuolo; ad oggi essi sono sempre stati rinvenuti al di sopra della falda. Risultano quindi fondamentali i fattori che governano la circolazione delle acque e in particolare le variazioni di queste. Questo meccanismo può ripetersi ad ogni oscillazione della tavola d'acqua.

Un occhio pollino si forma quando le condizioni locali consentono all'acqua circolante nel sottosuolo di asportare localmente le particelle più fini del terreno. A parità di altre condizioni, è quindi necessario e/o comunque influente il fatto che vi sia un incremento locale del gradiente idraulico o che questo, localmente, sia sufficiente per asportare il terreno.

Assume quindi una rilevanza particolare l'oscillazione della falda. La fig. 4.11 illustra questo effetto.

Si consideri una situazione in cui si ha un livello conglomeratico interessato da cavità e ad esso sia sovrapposto un sedimento almeno parzialmente coesivo e la superficie freatica sia nel materiale sovrastante; in questa situazione le eventuali cavità sono riempite dall'acqua e il materiale non frana nelle cavità in quanto dotato di coesione. Un abbassamento della falda ha due effetti; da un lato fa mancare ai sedimenti alterati la spinta di galleggiamento, con l'effetto di un sovraccarico, dall'altro induce una filtrazione verso il basso dell'acqua con possibile asportazione del materiale in corrispondenza delle fratture/cavità.

Nel caso in cui il materiale sovrastante sia sufficiente poco permeabile, può generarsi una falda sospesa con proseguimento della filtrazione nella cavità sottostante.

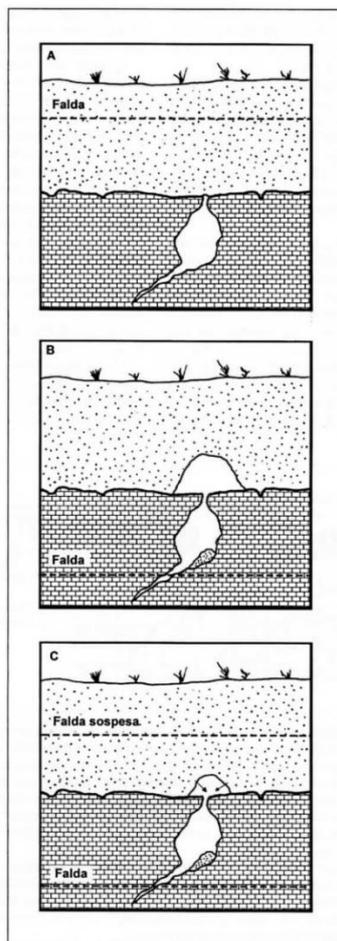


Figura 28 - Possibile genesi di una cavità a contatto con il conglomerato, dovuta ad abbassamento della falda. La spiegazione è nel testo. Da Strini, 2004.

Questo meccanismo può ripetersi ad ogni oscillazione della tavola d'acqua.

In una situazione analoga (materiale sovrastante meno permeabile del materiale sottostante) può essere valido anche il meccanismo opposto; la generazione degli Occhi Pollini può avvenire anche per risalita della falda. Se la falda inizialmente presente nel materiale sottostante (più permeabile) risale, incontra il sedimento impermeabile, comportandosi come una falda in pressione; questo porta all'imbibizione del sedimento, che favorisce i processi di piping durante una successiva fase di abbassamento della falda e può portare a locali indebolimenti della copertura per erosione meccanica.

Questo modello non si applica solamente a successioni in cui vi è un conglomerato, ma anche a quelle in cui vi è un possibile contrasto di permeabilità tra sedimenti sovrapposti e possibili discontinuità nel sedimento sottostante.

Anche la formazione di falde sospese, con accumuli di acqua temporanei possono favorire fenomeni di erosione localizzata.

In una prospettiva geologica, dato che gli Occhi Pollini non sono un fenomeno solo recente, bisogna evidenziare che questo meccanismo può aver agito non solo in corrispondenza delle attuali variazioni della falda, ma anche in corrispondenza degli antichi livelli di falda, oggi non più identificabili.

Fattori Antropici

Gli Occhi Pollini sono un fenomeno naturale, dimostrato dal fatto che essi si osservano anche in aree dove l'impatto dell'uomo è limitato o assente; tuttavia, la loro evoluzione e genesi può essere accelerata da fattori antropici.

In particolare, si possono riconoscere due fattori importanti; le variazioni di carico e la modifica della circolazione di acqua.

L'aumento del carico su una cavità, ad esempio la posa di un plinto, può portare al collasso della cavità stessa, in quanto la resistenza del terreno sovrastante un occhio pollino è inferiore rispetto a quella di un terreno senza cavità.

La diminuzione dei carichi, per esempio dovuta a uno scavo, può del resto generare il crollo di porzioni di terreno indebolite sovrapposte e/o giustapposte allo scavo.

Entrambe le situazioni possono verificarsi sia che ci si trovi in presenza di cavità vere e proprie, sia che ci si trovi in presenza di zone a debole resistenza.

Considerando i livelli a bassa resistenza, costituiti probabilmente da materiale poco addensato e non cavità vere e proprie, eventuali vibrazioni potrebbero favorire l'addensamento del materiale stesso creando quindi dei vuoti o favorendo l'instaurarsi di fenomeni di subsidenza. Sono noti recentemente legati a perdite fognarie/di acquedotto (Bernareggio, via Dante 2018).

Tali situazioni risultano particolarmente insidiose proprio perché gli Occhi Pollini sono di difficile individuazione

Si è visto che la modifica della circolazione idrica sotterranea è altro fattore fondamentale nella generazione ed evoluzione degli Occhi Pollini; essa può essere dovuta non solo a fenomeni naturali, ma anche a cause antropiche.

L'emungimento di acqua da pozzi può portare ad un abbassamento locale della falda all'interno del cono di depressione con le conseguenze illustrate precedentemente. Inoltre, l'abbassamento antropico non è costante nel tempo, ma subisce oscillazioni in genere più rapide e di entità maggiori di quanto avviene naturalmente. L'emungimento, inoltre, può portare a gradienti tali da generare innescare locali fenomeni di erosione; una volta innescato il fenomeno poi si autoalimenta.

Dell'Oca (1957) ha ipotizzato una relazione tra due doline formatesi in Concorezzo e la presenza di pozzi per acqua posti in prossimità delle doline stesse.

L'immissione concentrata di acqua è un altro fattore che può portare ad avere asportazione del materiale oppure, in un contesto già interessato da Occhi Pollini, favorire il fenomeno, in quanto viene immessa acqua in un sistema di vuoti già esistente. Tipico caso è l'immissione di acqua dovuta alla presenza di pozzi perdenti che concentra in volumi ridotti la pioggia che interessa superfici molto ampie. L'immissione di acqua concentrata può favorire anche il "rammollimento" di sedimenti con caratteristiche geotecniche già scarse.

Possibili effetti si hanno anche per le modifiche al regime delle acque sotterranee dopo la costruzione delle opere, in quanto potrebbero raggiungersi gradienti tali da rompere l'equilibrio precedente.

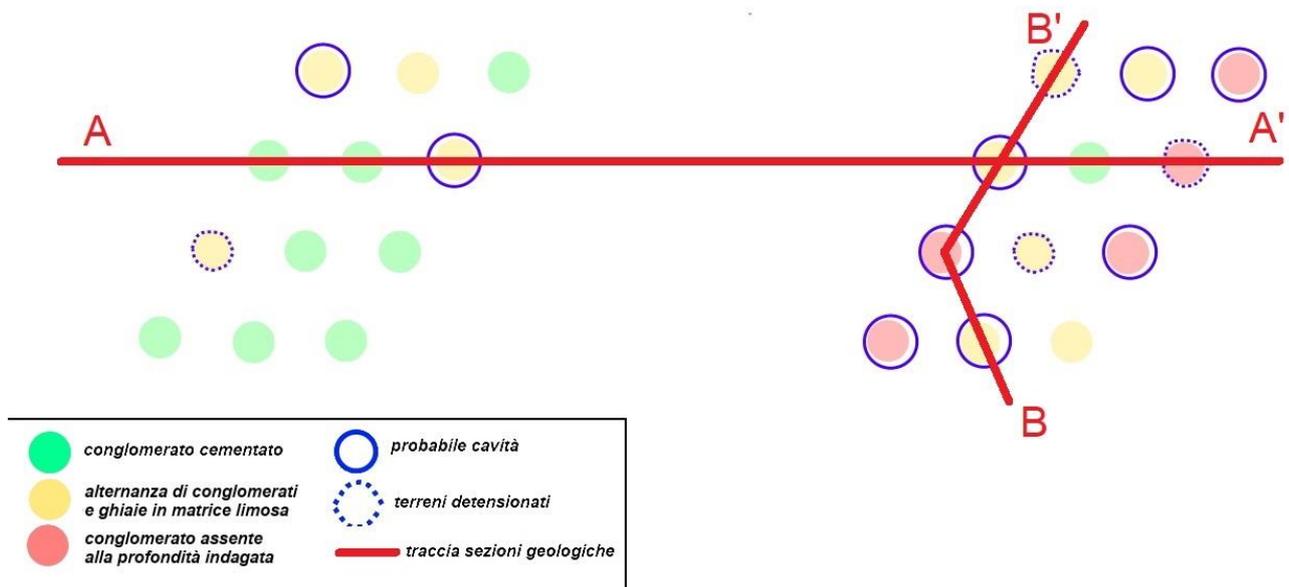
Non va neanche sottovalutato l'eventuale impatto durante la costruzione; è stato riportato oralmente che, a seguito di forti precipitazioni, si siano avuti allagamenti in scavi (specie se il sedimento è alterato e quindi tendenzialmente impermeabile) che sono evoluti nell'apertura di Occhi Pollini. Queste testimonianze sono credibili in quanto l'accumulo di un battente d'acqua, che non si avrebbe in condizioni naturali senza l'effetto piscina indotto dallo scavo, può aumentare la filtrazione e quindi accelerare l'evoluzione degli Occhi Pollini fino alla fase di crollo.

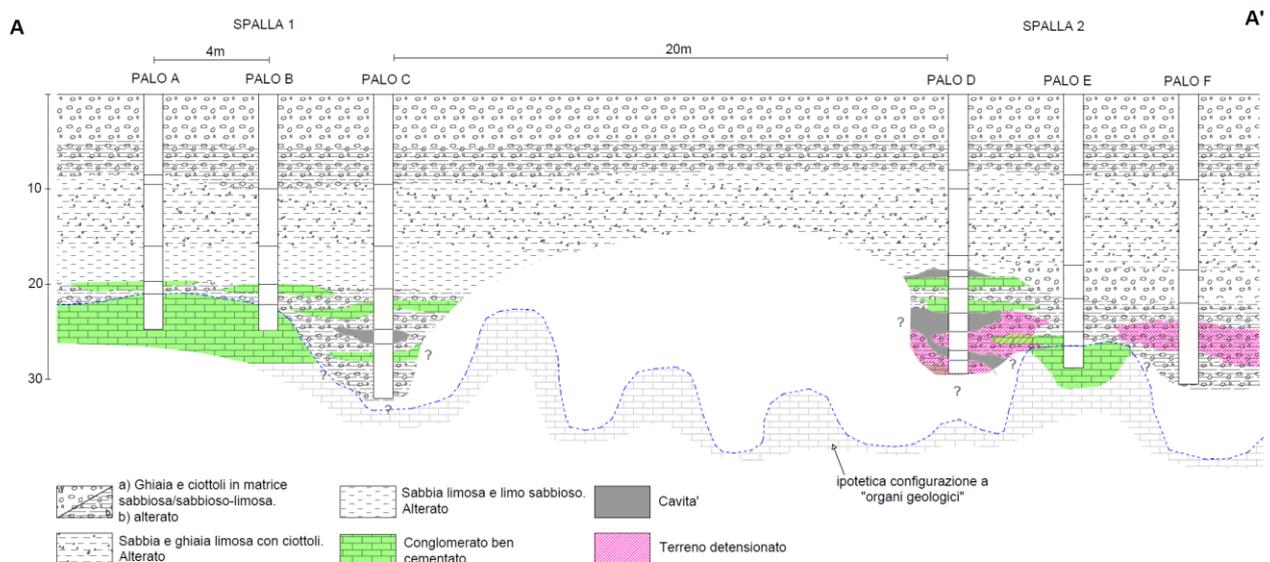
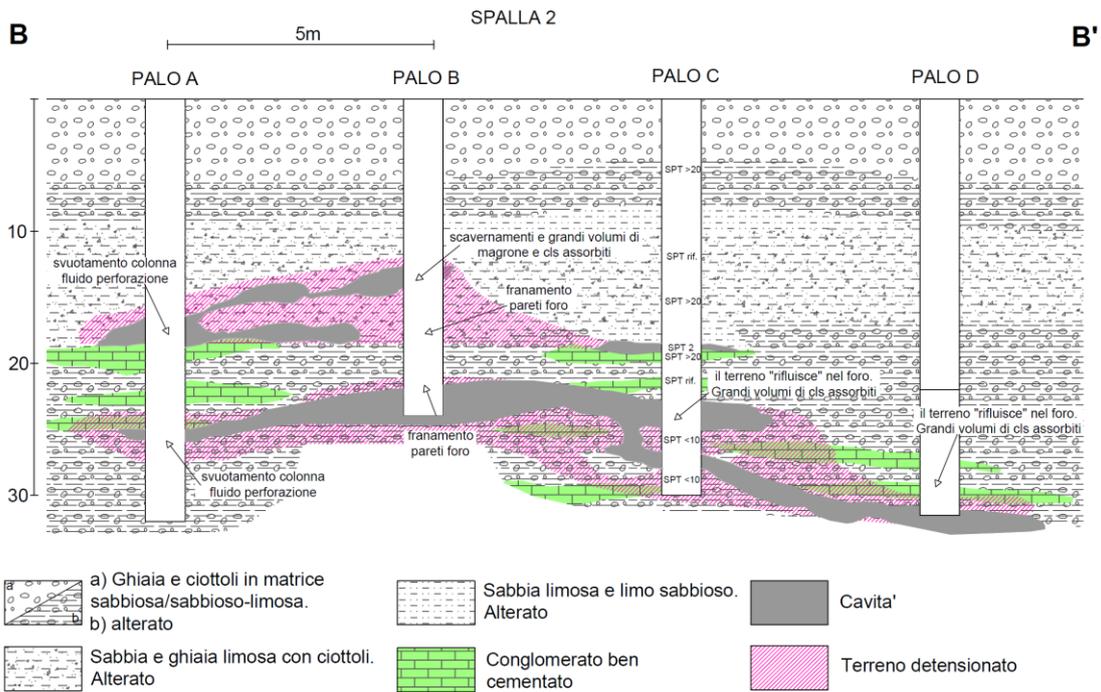
È ovvio che tutti questi fattori non hanno sempre lo stesso effetto ma dipendono sia dall'entità (carichi più o meno elevati, immissione più o meno concentrata e rapida etc) sia dalla condizione locale e quindi non sono modellabili a priori.

a.3 CASO DI STUDIO IN ZONA INTERESSATA DA CAVITÀ TRA DEPOSITI ALLUVIONALI E TRATTI CEMENTATI (CEPPO)

Durante la realizzazione di un cavalcavia con pali ad interdistanza 4 m, sono state intercettate cavità che hanno reso molti difficili le condizioni di lavorazione, con ingenti perdite di materiali e allungamenti dei tempi.

Le due spalle del cavalcavia presentavano infatti condizioni estremamente variabili e differenti e una delle due spalle ancora più imprevedibili. Si riporta la ricostruzione in planimetria degli esiti delle perforazioni, una ipotesi di ricostruzione dell'andamento delle cavità, tra loro interconnesse, e un tabulato finale che riporta palo per palo le criticità incontrate.





| | Palo | Profondità realizzata rispetto al progetto [%] | Conglomerato | Occhio pollino (spessore) | | Magrone aggiuntivo per stabilizzare foro [%] | CLS utilizzato rispetto al progetto [%] | Causa interruzione perforazione |
|----------|------|--|---------------------------|----------------------------------|---------------------------|--|---|---|
| | | | spessore | Cavità | franamenti/sgottamenti | | | |
| SPALLA 1 | A | 100% | 3,5m - discontinuo | 0,7m | | | 110% | |
| | B | 100% | | ND | | | 110% | |
| | C | 75% | plurimetrico - fondo foro | | | | 85% | Presenza di conglomerato cementato |
| | D | 75% | plurimetrico - fondo foro | | | | 85% | Presenza di conglomerato cementato |
| | E | 75% | plurimetrico - fondo foro | | | | 85% | Presenza di conglomerato cementato |
| | F | 100% | 4m - discontinuo | 1,5m | | | 110% | |
| | G | 100% | plurimetrico - fondo foro | | 1m | | 140% | |
| | H | 100% | | ND | | | 110% | |
| | I | 100% | | ND | | | 110% | |
| | J | 100% | | ND | | | 110% | |
| | K | 100% | | ND | | | 110% | |
| | L | 100% | | ND | | | 110% | |
| SPALLA 2 | M | 100% | plurimetrico - fondo foro | | 1,5m | | 160% | |
| | N | 90% | plurimetrico - fondo foro | 3m | | | 140% | Presenza di conglomerato cementato |
| | O | 90% | ASSENTE | 1m | | | 170% | Continui franamenti |
| | P | 90% | plurimetrico - fondo foro | più cavità metriche, discontinue | | | 140% | Continui franamenti |
| | Q | 85% | plurimetrico - fondo foro | | | | 110% | Presenza di conglomerato cementato |
| | R | 95% | ASSENTE | | 4m | | 140% | |
| | S | 60% | ASSENTE | | 10m - discontinuo | 140%vol. palo | 120% | Continui franamenti |
| | T | 95% | 5m - discontinuo | | 1,7m | | 140% | |
| | U | 95% | ASSENTE | 1m | | | 140% | |
| | V | 75% | ASSENTE | 1m | plurimetrico - fondo foro | 100%vol. palo | 140% | Continui franamenti |
| | W | 90% | 6,5m - discontinuo | più cavità metriche, discontinue | | | 120% | Continui franamenti |
| | X | 95% | 5m - discontinuo | | | | 130% | |