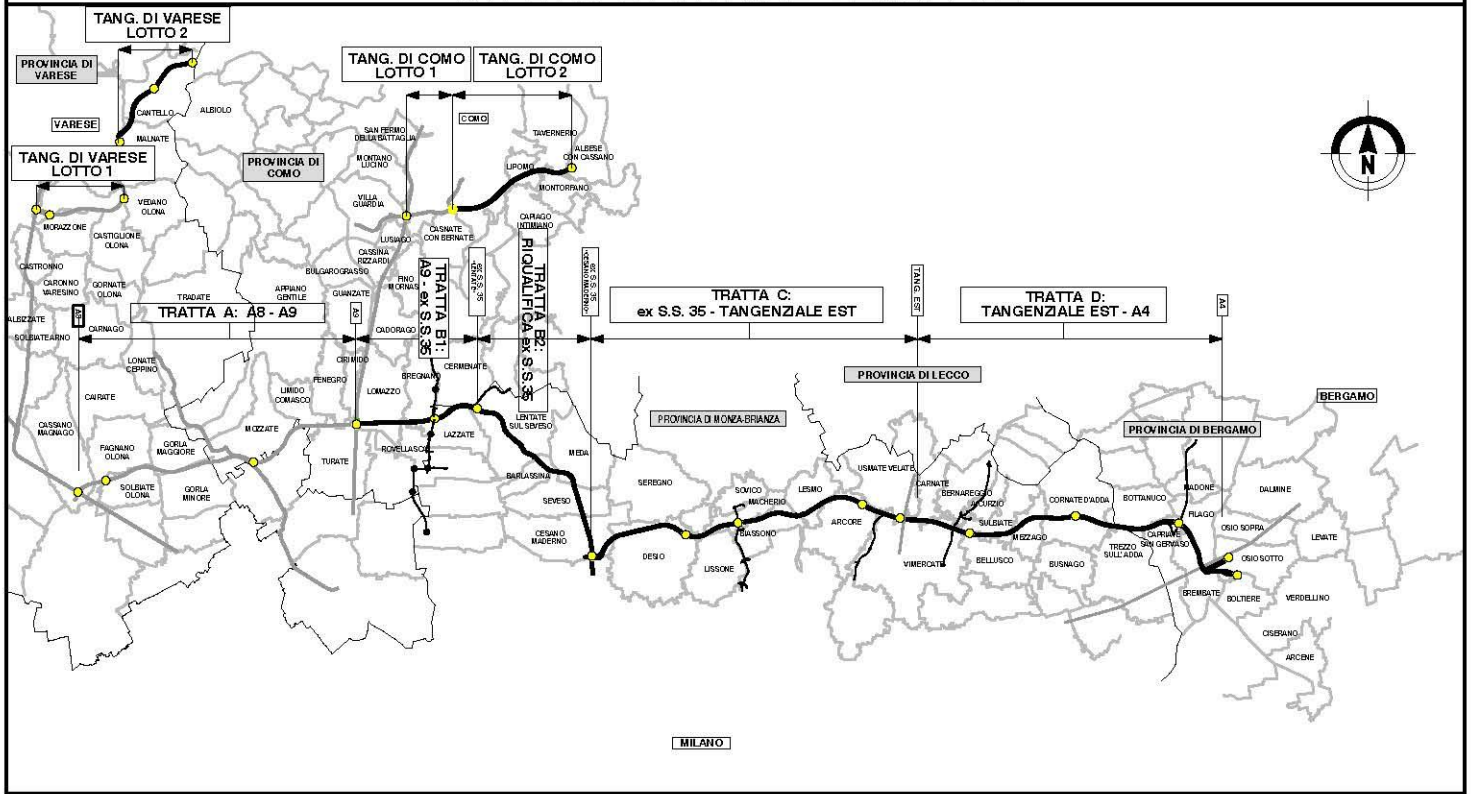


QUADRO DI UNIONE GENERALE



COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE

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

CODICE C.U.P. F11B08000270007

PROGETTO ESECUTIVO TRATTA C

RELAZIONE GEOLOGICA

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

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

DATA 31 Luglio 2023

SCALA

CONTRAENTE GENERALE

PEDELOMBARDA NUOVA S.c.p.A.

DATA

REVISIONE

18 Aprile 2023	Emissione in bozza	A01
9 Giugno 2023	Aggiornamento contenuti	A02
31 Luglio 2023	Revisione a seguito di RDV PLN	A03

ELABORAZIONE PROGETTUALE

PROGETTISTI

Ing. Enio Colasante



RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Carlo Listorti

Redatto
dott. Giorgio Brogioli

Vista
dott. Livia Evangelisti

Approvato
dott. Marco Sandrucci

CONCEDENTE



CONCESSIONARIO



PROGETTISTA





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

PROGETTO ESECUTIVO

TRATTE B2, C, TRMI10/TRMI17/TRCO06

TRATTA C

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	13
3.2.1 PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE	15
4. MODELLO CONCETTUALE GEOLOGICO	16
4.1 MODALITA' DI ELABORAZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO	16
4.2 DESCRIZIONE DEL PROFILO GEOLOGICO DI PROGETTO	18
4.3 SEZIONI GEOLOGICHE TRASVERSALI AL TRACCIATO	23
5 VALUTAZIONI QUALITATIVE SULLE CARATTERISTICHE LITOTECNICHE DELLE TERRE DA SCAVO	26
6 PROBLEMATICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO	32
6.1 IL FENOMENO DEGLI OCCHI POLLINI	32
6.1.1 GENERALITA' SUGLI OCCHI POLLINI	33
6.1.2 DIFFUSIONE DEL FENOMENO LUNGO IL TRACCIATO	34
6.1.3 ANALISI DI SUSCETTIBILITA' AGLI OCCHI POLLINI	43
6.1.4 STRATEGIE DI MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI E DEI RISCHI CONNESSI AGLI OCCHI POLLINI	44
BIBLIOGRAFIA	51
APPENDICE A – OCCHI POLLINI	52
a.1 CARATTERISTICHE GENERALI	52
a.2 CONDIZIONI INFLUENTI LA GENESI E LO SVILUPPO DELLE CAVITA' SOTTERRANEE	60
a.3 CASO DI STUDIO IN ZONA INTERESSATA DA CAVITÀ TRA DEPOSITI ALLUVIONALI E TRATTI CEMENTATI (CEPPO)	65

1. INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la relazione geologica di Progetto Esecutivo per la Tratta C e le viabilità connesse TRMI10 e TRMI17 dell'Autostrada Pedemontana Lombarda e riporta considerazioni circa l'assetto geologico locale sulla base la 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 EINCC000GE00000RS001 e EINCC000GE00000RS002), 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 preliminare di dettaglio del profilo geologico della tratta C, basato sui dati derivanti dalle indagini di PD, integrate con quelli acquisiti nel corso della campagna di indagine di P. 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 C si sviluppa dall'interconnessione con la SP35 (superstrada Milano-Meda), svincolo di Cesano Maderno, all'interconnessione con la Tangenziale Est di Milano (A51), per circa 16 km.

Il tracciato di progetto della tratta C, visualizzato in Figura 1, si sviluppa in direzione approssimativamente Ovest - Est attraversando i territori dei comuni di Cesano Maderno, Desio, Lissone, Macherio, Biassono, Lesmo, Arcore e Vimercate (Usmate viene lambito nel tratto finale). L'area interessata è situata nella media pianura Padana, a NNE della città di Milano. Dal punto di vista morfologico, il territorio risulta sub-pianeggiante, con quote comprese mediamente comprese tra 200 e 225 m s.l.m., con valori minimi in corrispondenza della valle del Lambro (180 m s.l.m.) e massimi sul pianalto di Lesmo/Arcore, con una pendenza media del 7‰ (Figura 1).

Gli elementi idrografici principali sono costituiti dal fiume Lambro, dal torrente Molgora, dal Rio Molgorana e dal rio Molgorana e tributari. Il reticolo idrografico minore è sviluppato in particolare nelle aree dei rilievi collinari morenici nel settore compreso tra i Comuni di Macherio, Biassono, Lesmo e Arcore.

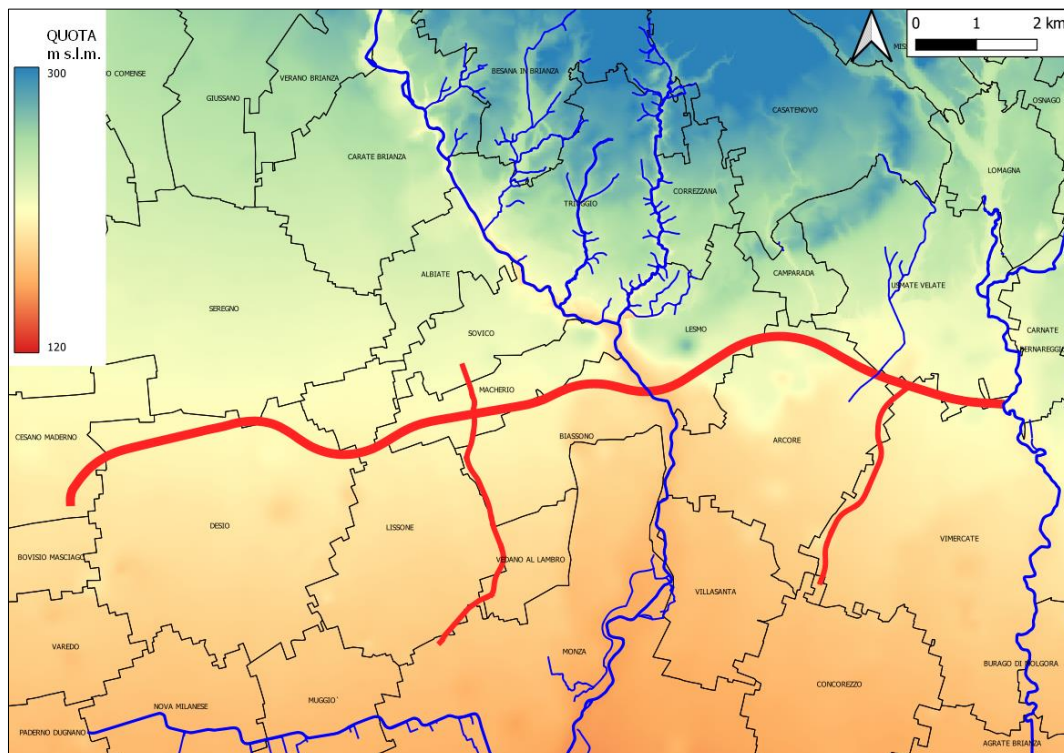


Figura 1 – inquadramento territoriale della tratta B2 e delle TRM10 e TRM17

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio interessato dalla tratta C si trova nel settore settentrionale dell'alta pianura Padana ed è caratterizzato dalla presenza di un'estesa piana connessa agli scaricatori fluvio-glaciali quaternari e più recentemente ai corsi d'acqua attuali.

Questo settore è stato caratterizzato nel Pleistocene da una neotettonica blanda, che ha portato a un lento sollevamento di questa porzione di territorio rispetto a quelle poste in prossimità del Po e di quelle ubicate ad Est del Fiume Oglio. Questo sollevamento ha preservato una rilevante porzione della pianura in esame dalla copertura di depositi dei corsi d'acqua che hanno inciso l'area in tempi successivi (Olocene); questi depositi più recenti rimangono in tal modo confinati in spazi relativamente ristretti disposti in fasce che si allargano progressivamente proseguendo verso Sud, saldandosi insieme a formare l'esteso deposito di alluvioni prevalentemente ghiaioso-sabbiose della pianura lombarda centrale.

I lembi dell'antica pianura costituiti prevalentemente da depositi fluvio-glaciali di età compresa tra il Pleistocene Inferiore e Superiore, risultano quindi rilevati di alcuni metri (sono detti per questo motivo "terrazzi") rispetto ai depositi più recenti, e i loro collegamenti con la piana sottostante sono costituiti da scarpate più o meno incise ed erose che ne consentono una delimitazione ragionevolmente precisa. Nelle aree maggiormente urbanizzate tuttavia, l'intensa attività antropica ha spesso sensibilmente modificato le caratteristiche morfologiche della zona, livellando le ondulazioni preesistenti e mascherando, talora, la presenza di alcune strutture a terrazzi presenti lungo il corso dei fiumi.

L'area entro cui si sviluppa le tratte C è compresa nei Fogli Geologici n. 96 Seregno e n. 96 Vimercate della nuova cartografia geologica ufficiale d'Italia a scala 1:50.000, di cui si riporta uno stralcio in Figura 2. Dal rilevamento del Foglio CARG n. 96 Seregno emerge l'evidenza di numerose superfici di discontinuità che separano i sedimenti provenienti dagli antichi bacini idrografici.

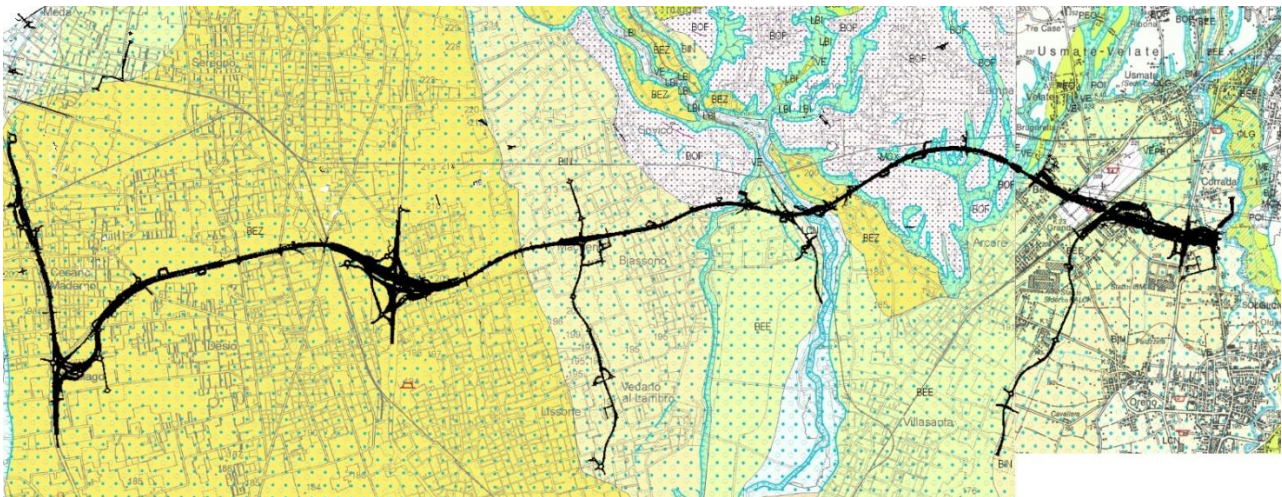


Figura 2 – stralcio della carta geologica 1:50000 (CARG) foglio 96 Seregno, lungo il tracciato della tratta C

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.

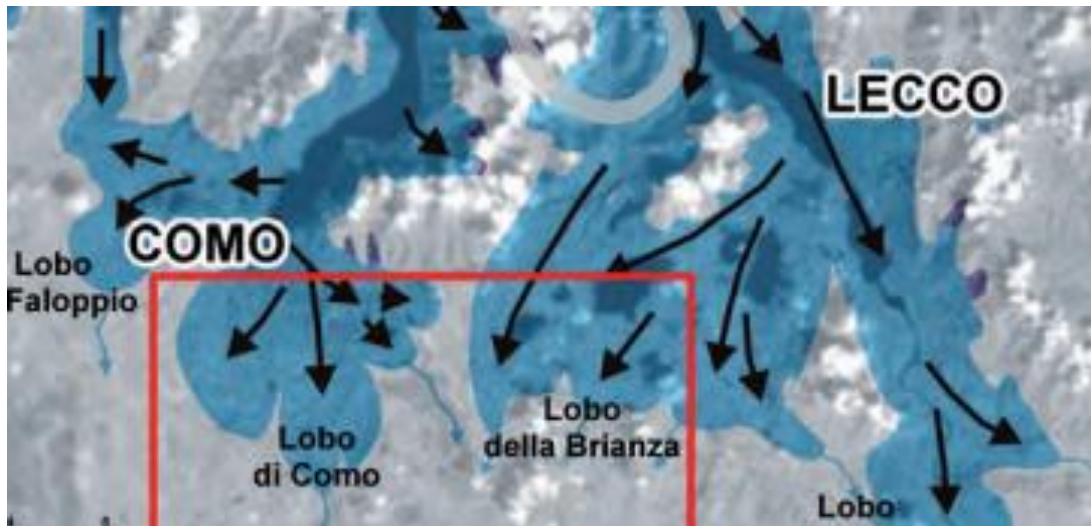


Figura 3 – Massima espansione dei ghiacciai nell'ultimo episodio glaciale (LGM), si evidenziano i diversi di alimentazione dei depositi fluvioglaciali presenti nell'area in oggetto (riquadro rosso). (dalle note illustrative del foglio CARG 96 Seregno)

La tratta C si sviluppa in direzione Ovest-Est e taglia le fasce di depositi fluvioglaciali che si estendono in direzione prevalente Nord-Sud, e pertanto la tratta presenta una spiccata eterogeneità delle caratteristiche litologiche e del grado di alterazione dei terreni lungo il tracciato (Figura 2).

Da inizio tratta fino al km 8+800 il tracciato corre all'interno di un ampio settore pianeggiante caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Besnate per entrare successivamente, nel comune di Macherio, nel terrazzo della più antica unità di Binago, con il quale il limite morfologico appare appena accennato e mascherato dalla forte urbanizzazione dell'area.

Tra il km 8+800 e 9+600, il tracciato attraversa la parte più meridionale del rilievo morenico mindeliano di Sovico/Villa Belvedere, caratterizzato dall'affioramento dell'unità di C.na Fontana (Allogruppo del Bozzente) costituita da depositi fortemente alterati in limi sabbioso-ghiaiosi fino a profondità di 15-20 m.

Il tracciato successivamente entra nella valle del Lambro dove sono presenti diversi ordini di terrazzi appartenenti all'unità di Besnate, del sistema di Cantù e dei depositi alluvionali attuali del Sistema del Po/unità Postglaciale, questi ultimi sviluppati prevalentemente nel settore in sinistra idrografica dove costituiscono un terrazzo con quote di circa 180 m s.l.m. soggetto periodicamente a fenomeni di esondazione.

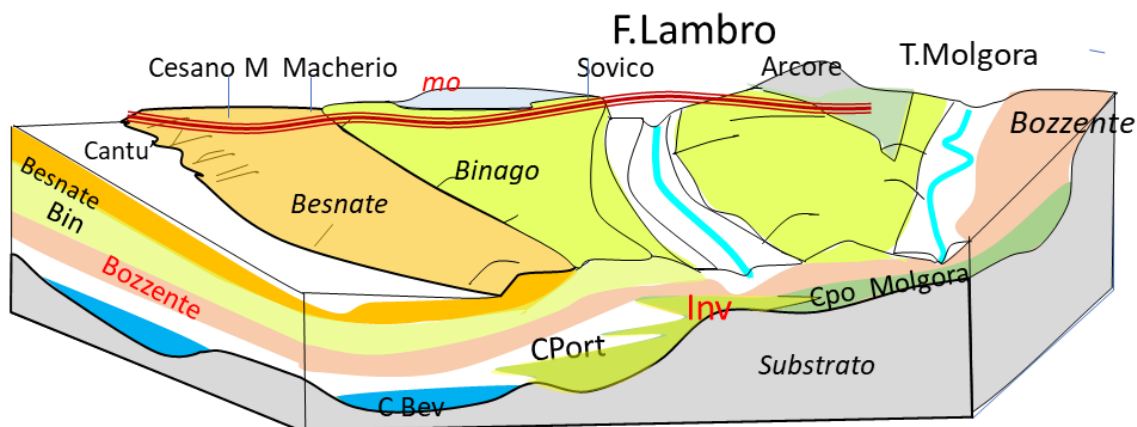
Il tratto compreso tra il km 11+050 e 14+00 si sviluppa nella parte più meridionale del pianalto ferrettizzato di Triuggio-Camparada, caratterizzato dall'affioramento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'unità di C.na Fontana costituiti da limi sabbioso-ghiaiosi profondamente alterati, dal caratteristico colore rosso mattone, ricoperte da uno strato superficiale di limi eolici.

Nella parte finale della tratta il tracciato sono presenti in affioramento le unità di Besnate (km 14+000 e 15+700) e di Binago (da km 15+700 – fine tratta) quest'ultima caratterizzata da ghiaie e sabbie con sensibile grado di alterazione e presenza di uno spesso orizzonte limoso-sabbioso superficiale.

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 variabili tra 30 e oltre 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 (Argille di Castel di Sotto) note

in letteratura come “argille sotto il Ceppo” (Villafranchiano Auct.). Il tetto dell’unità “Villafranchiana”, caratterizzato da un andamento spiccatamente irregolare e presenta un settore di alto a Est del limite comunale tra Lissone e Biassono, con quote massime in corrispondenza del pianalto mindeliano di Triuggio-Camparada; in questo settore i sondaggi di PE ne hanno raggiunto il tetto a profondità di 48-60 m da p.c. (quote assolute di circa 165-175 m s.l.m. Nella parte occidentale della tratta non l’unità non è stata intercettata dai sondaggi di PD e PE, sulla base delle sezioni geologiche del foglio CARG Seregno e delle stratigrafie di alcuni pozzi profondi limitrofi al tracciato, si colloca ad una profondità variabili tra a 60 e 110 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.



I CI (conglomerati indistinti) sono: Ceppo del Portichetto, Ceppo Bevera , Ceppo della Molgora e del paleoAdda e hanno grado di alterazione e composizione diversa

Figura 4: ricostruzione tridimensionale della geologia per la tratta C

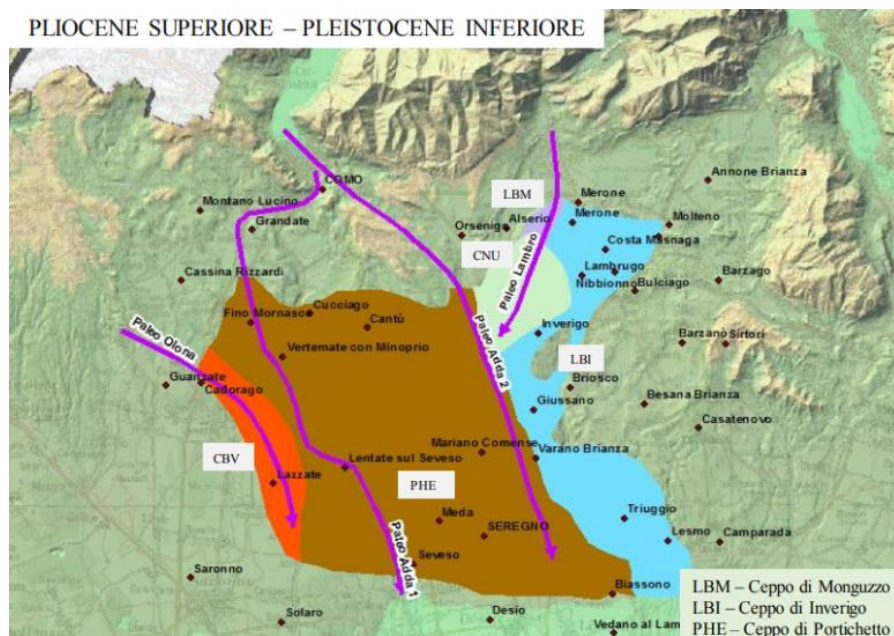
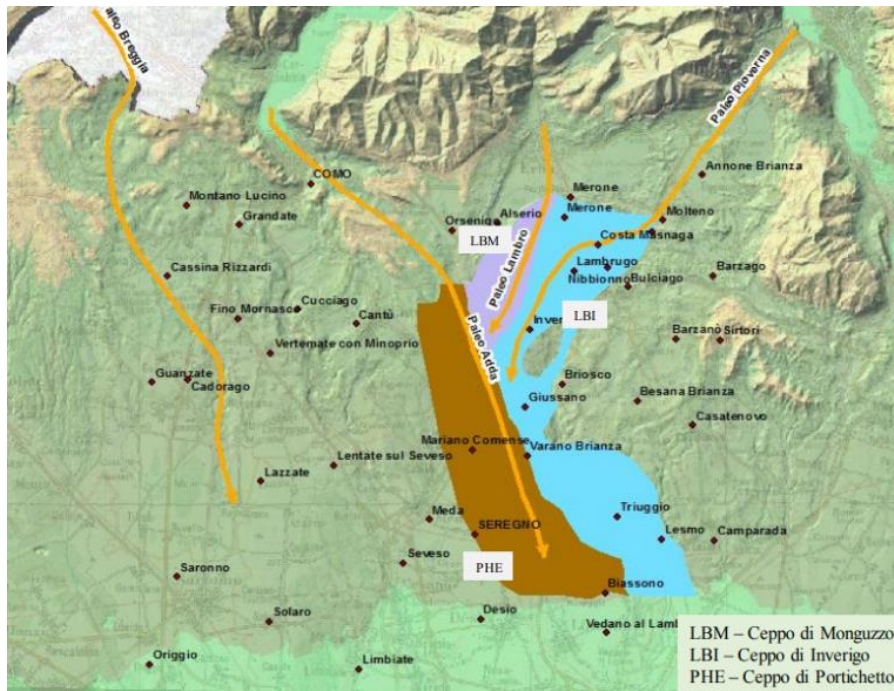


Figura 5: Rappresentazione delle aree di provenienza dei conglomerati più antichi dell'area brianza e dei solchi del Paleo-Olona e del Paleo Adda 1 e 2 (Da Tomasi e Strini, 2017)

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 Par. 2.3, a seconda degli autori verte su due sistemi di classificazioni diverse, le allonità (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 allonità.

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
ALLOFORMAZIONE DELLA SPECOLA/SINTEMA DELLA SPECOLA	RISS/MINDEL (Riva 1957)	PLEISTOCENE MEDIO
FORMAZIONE DI MONTE CARMELO	MINDEL (Riva 1957)	PLEISTOCENE MEDIO
SUPERSINTEMA DEL BOZZENTE	MINDEL (Riva 1957)	PLEISTOCENE MEDIO
CONGLOMERATI DI INCERTA ATTRIBUZIONE	CEPPO	PIACENZIANO-CALABRIANO
ARGILLE DI CASTEL DI SOTTO	VILLAFRANCHIANO	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 ad oggi disponibili 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/Sintema del Po (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. Superficie limite costituita 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.

Sintema della Specola (Spe)

Ghiaia a supporto di matrice con locali intercalazioni sabbiose. Superficie limite superiore caratterizzata da un profilo di alterazione evoluto con spessori che possono arrivare fino a 6-8 m. Carbonati argillificati, arenarie arenizzate, cristallini e metamorfici da superficialmente a totalmente arenizzati. Copertura loessica sempre presente. Caratteristiche litotecniche discrete in relazione alla granulometria e all'alterazione. Dove l'alterazione prevale le caratteristiche possono risultare decisamente più scadenti. Permeabilità, di tipo primario, da media a elevata.

Formazione di Monte Carmelo (MC)

Limo argilloso massivo: loess. Fortemente alterato, con patine e noduli Fe-Mn. Indurito. Spessori variabili da pluridecimetri a plurimetri (3 m circa). Caratteristiche litotecniche generalmente da discrete a mediocri. Permeabilità, di tipo primario, bassa.

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.

Alloformazione di Cascina Fontana (BoF)

Ghiaia a supporto di matrice e a supporto clastico con intercalazioni sabbiose. Superficie limite superiore caratterizzata da morene ben conservate. L'alterazione è marcata: interessa più del 90% dei ciottoli. Locale presenza di patine Fe-Mn. Caratteristiche litotecniche generalmente discrete-buone. Permeabilità, di tipo primario, da bassa a media.

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.

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.

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.

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. 9 registrazioni;
- l’area è caratterizzata da risentimenti connessi ad eventi sismici di intensità epicentrale massima rilevata dell’ordine del VII-VIII grado della scala Mercalli;
- le località epicentrali per gli eventi che hanno prodotto i maggiori risentimenti al sito (osservazioni macrosismiche) provengono da settori territoriali decentrati rispetto all’area comunale, nello specifico nell’area bergamasca-bresciana, Valle d’Aosta, Parmense, Lodigiano, in Svizzera (Grigioni), in Piemonte (Monferrato)
- 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	Io	Mw
NF	1905	Haute-Savoie, Vallorcine	46.016	7.011	7-8	5.1
D	1951	Lodigiano	45.226	9.62	6-7	5.17
NF	1960	Valli Giudicarie	45.806	10.625	6	4.81
3	1968	Valle d’Aosta	45.684	7.768	6	4.86
5	1979	Bergamasco	45.637	9.555	6	4.78
5	1991	Grigioni, Vaz	46.731	9.527	6	4.7
NF	2000	Monferrato	44.911	8.38	6	4.94
4	2002	Franciacorta	45.65	10.141	5	4.21
3	2008	Parmense	44.544	10.345	6-7	5.36

Infine, per il dettaglio delle aree interessate, considerando le “Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani”, valutate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT 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).

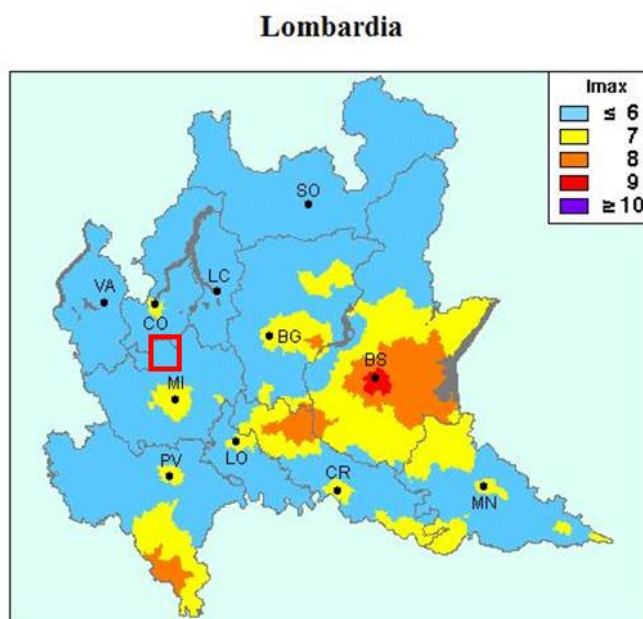


Figura 6 - massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani, in rosso l'area interessata dal tracciato della tratta C

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. 3.3.0), si evince come l'area di interesse sia esterna a dette sorgenti sismogenetiche; la parte occidentale del tracciato risulta ubicata a breve distanza dal limite orientale della sorgente sismogenetica identificata come “ITCS010 - Western S-Alps internal thrust” (Figura 7).

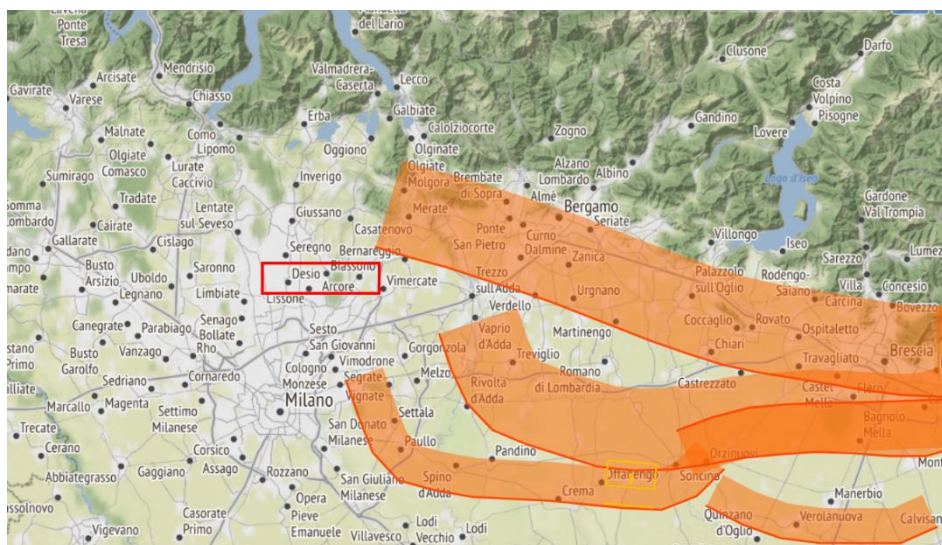


Figura 7 – ubicazione delle sorgenti sismogenetiche, in rosso l'area interessata dal tracciato della tratta C

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 gran parte dell'asse principale della tratta C la possibile sussistenza di "Amplificazioni litologiche e geometriche".l'attribuzione, con attribuzione alla classe Z4A, "Zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi" ad eccezione dei settori dei pianalti morenici di Macherio-Biassono e Lesmo-Arcore caratterizzati da attribuzione alle classi Z4B "Zona pedemontana di falda di detrito, conoide alluvionale e conoide deltizio-lacustre", Z4C "Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi(compresi le coltri loessiche" e Z4D "Zone con presenza di argille residuali e terre rosse di origine eluvio-colluviale". Si osserva inoltre che:

- Nelle aree caratterizzate da spessori consistenti di materiali di riporto (ex cave, discariche) nei pressi degli svincoli di Cesano Maderno, Desio e Arcore, è stata attribuita la classe Z2A "Zone con terreni di fondazione saturi particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc.)" con possibili effetti indotti di cedimenti. Tale classe risulta attribuita anche al settore occidentale dei comuni di Biassono e Veduggio al Lambro, lungo il tracciato dell'opera connessa TRMI10.
- Gli orli delle scarpate dei corsi d'acqua del reticolo minore nel settore di Lesmo e Arcore sono caratterizzati da una classe di pericolosità Z3A "Zona di ciglio $H > 10$ m e pendio sottostante" con possibili fenomeni di amplificazione topografica.

¹ Per il comune di Desio, 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". Si osserva inoltre che talora sussistono differenze nell'attribuzione delle classi di PSL tra comuni limitrofi.

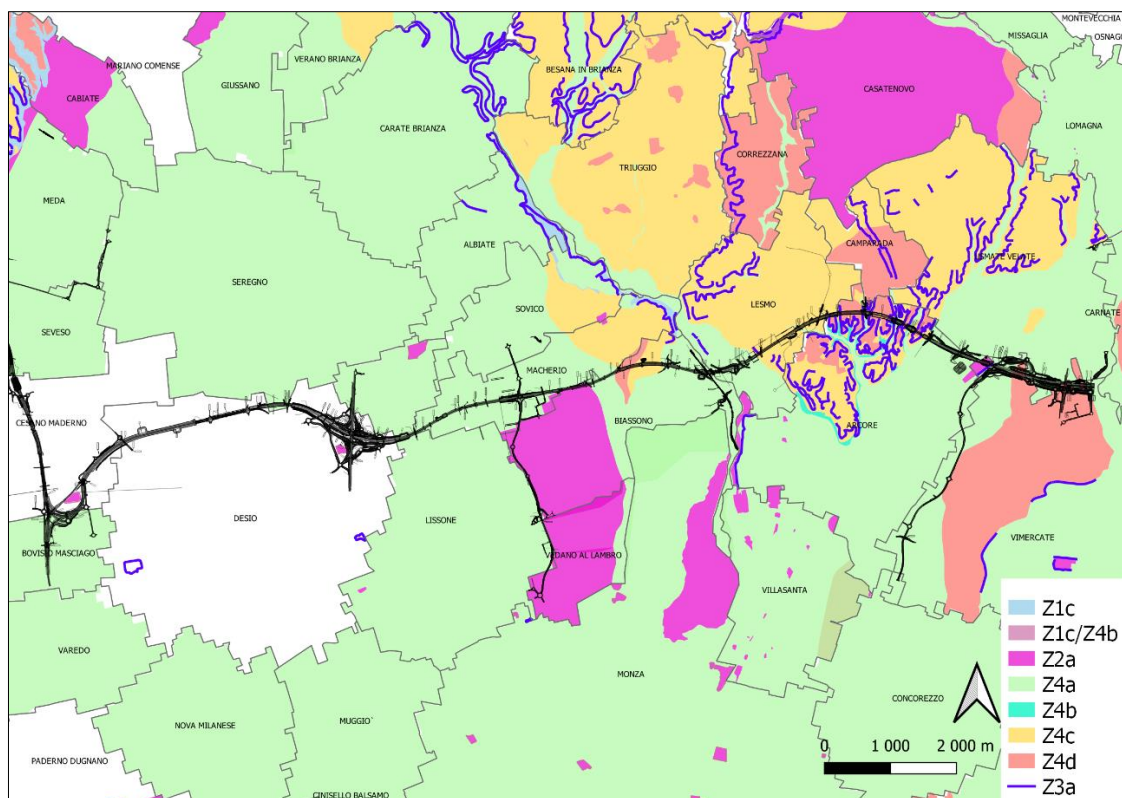


Figura 8 – classi di pericolosità sismica locale lungo il tracciato della tratta C (fonte: PGT comunali)

4. MODELLO CONCETTUALE GEOLOGICO

Di seguito si riporta la descrizione dell’assetto geologico e geologico-tecnico ricostruito lungo i profili longitudinali della tratta C e delle viabilità connesse TRMI10 e TRMI17, riportati rispettivamente negli elaborati EGGB2A00GE00000GL001 - EGGCCH01GE00000GL001 e EGGCCH02GE00000GL001, realizzati a partire dalle stratigrafie e delle prove di laboratorio acquisite nel corso delle campagne di indagine di PD e di PE. A completamento dell’analisi della struttura geologica lungo il tracciato autostradale sono state inoltre eseguite 6 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, si veda la relazione di dettaglio) 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 e analisi delle diagrafie dei DAC test eseguiti sui sondaggi a distruzione di nucleo. 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. Come premesso, 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 C può essere suddiviso in sei settori complessivamente omogenei (in aggiunta alle opere connesse TRMI10 e 17). Di seguito si riporta la descrizione del profilo per ciascuno di questi settori ed una descrizione generale delle caratteristiche geologiche lungo le opere connesse summenzionate.

SVINCOLO DI CESANO MADERNO

Questo settore, che costituisce il raccordo tra la tratta B2 e la tratta C è caratterizzato dalla presenza di depositi ghiaioso-sabbiosi appartenenti all’unità di Besnate, localmente con presenza di lenti a granulometria prevalentemente sabbiosa in matrice limoso-ghiaiosa (ESB2_S33, SB2_60); sporadicamente si evidenziano tracce di debole cementazione (SB2_70). La componente sabbioso-limosa diviene prevalente più in profondità, a partire da circa 20 m da p.c. (SB2_69), probabilmente

connessa con il passaggio ad unità più antiche (es. Sintema di Binago). Complessivamente lo spessore dei depositi ghiaioso sabbiosi risulta superiore a 30 metri nella parte settentrionale e centrale e si riduce a 15-17 verso Sud (SB2_66, SB2_67). Alla base sono presenti conglomerati che si presentano da mediamente a ben cementati nel settore nord (ESB2_S33 a partire da 32 m da p.c.), mentre verso sud risultano caratterizzati da interlivelli a debole cementazione arenacea intercalati all'interno di ghiaie in matrice sabbioso limosa (SB2_66).

SETTORE 1 - DA KM 0+000 A KM 6+450

La parte iniziale del tracciato si sviluppa all'interno di un ampio terrazzo fluvio-glaciale con morfologia pressoché pianeggiante, contraddistinto dalla presenza in affioramento dell'unità di Besnate costituita da ghiaie in matrice sabbiosa, localmente da debolmente limosa a limosa, con presenza di ciottoli. Nel primo tratto, fino al km 3+700 il profilo di alterazione superficiale, costituito da limi sabbiosi presenta uno spessore ridotto, generalmente non superiore a 2 metri; i sottostanti depositi ghiaioso-sabbiosi presentano un grado di alterazione generalmente basso, localmente medio (cfr. Cap. 5).

A profondità variabili tra 2-3 m e 12-15 m da p.c. le stratigrafie dei sondaggi evidenziano la presenza di ghiaie con tracce di debole cementazione e interlivelli centimetrici di conglomerato, localmente alterato, ascrivibili all'unità dei Conglomerati di Incerta Attribuzione. La profondità di comparsa dei livelli cementati è molto variabile ed è prossima al piano campagna in corrispondenza nei tratti tra i sondaggi SC03-SC04 e SC06-SC08; il grado di alterazione risulta medio e complessivamente superiore a quello dei soprastanti depositi ghiaioso-sabbiosi attribuiti all'unità di Besnate. In corrispondenza di uno di questi settori di alto del tetto dell'unità conglomeratica è stata individuata la presenza di cavità sotterranee (Occhi Pollini) a profondità comprese tra 6.5 e 13 m e dimensioni tra 3 e 5.5 m (Cfr. Par. 6.1.2).

La presenza di conglomerati lapidei ben cementati in questo primo tratto appare sporadicamente nelle stratigrafie dei sondaggi a profondità variabili tra circa 27 m a inizio tratta (sondaggio ESC_S03) e circa 17-20 m nel tratto tra i sondaggi SC10-SC12 (km 3+000-3+500); si tratta in generale di livelli di spessore nell'ordine di 2-3 metri da mediamente a ben cementati (valori di RQD attorno a 50) e struttura vacuolare. Tali livelli risultano intercalati all'interno di depositi ghiaiosi in matrice sabbioso-limosa e sabbie limose con ghiaia e ciottoli, che in parte potrebbero derivare dall'alterazione e dalla degradazione dei conglomerati stessi, laddove presentano un grado di cementazione minore.

Tra il km 3+700 e 4+600 sia i sondaggi di PD che di PE mostrano la presenza di depositi ghiaioso-sabbiosi con grado di alterazione da basso a medio, localmente passanti in profondità a sabbie limose con ghiaia e ciottoli con alto grado di alterazione, fino alla profondità di almeno 37 m; i dati disponibili non rilevano la presenza di livelli cementati/conglomeratici in questo tratto. L'approfondimento del tetto dei conglomerati e il maggiore spessore dei depositi ghiaioso-sabbiosi potrebbero essere connessi alla presenza di un'antica struttura di paleoalveo.

Nel tratto successivo si osserva una nuova risalita del tetto dell'unità conglomeratica fino a 9-10 m da p.c.. Al tetto sono contraddistinti da una presenza di ghiaie e sabbie con tracce diffuse di debole cementazione e interlivelli centimetrici a maggiore cementazione. In questo tratto si evidenzia una maggiore presenza di livelli di conglomerato lapideo, con grado di cementazione variabile da debole ad alto, in particolare nei tratti compresi tra i sondaggi SC30-SC28, SC32-SC35 (km 5+000-5+200 e 5+750-5+950) dove sono presenti con spessori fino a 15-20 m, a profondità variabili tra 9 m a oltre 35 m da p.c..

I soprastanti depositi dell'unità di Besnate appaiono mediamente più alterati rispetto alla prima parte della tratta e caratterizzati da spessori maggiori della coltre di alterazione limoso-sabbiosa superficiale.

SETTORE 2 - (DA KM 6+450 A KM 8+800)

A partire dal km 6+450 circa, il tracciato entra in un settore contraddistinto dalla presenza in superficie della più antica unità di Binago, nel territorio comunale di Macherio; il limite morfologico con il terrazzo dell'unità di Besnate è solo accennato e in gran parte mascherato dalla forte urbanizzazione dell'area.

I depositi dell'unità di Binago, come risulta dalle stratigrafie, sono costituiti in prevalenza da sabbie con ghiaia e ciottoli e frazione limoso-argillosa localmente anche abbondante. Il grado di alterazione è generalmente da medio ad alto; in superficie è presente un livello di alterazione limoso-sabbioso con spessori mediamente di 4-5 m che localmente possono arrivare a 7-8 m. Localmente si registra la presenza di aree con debole cementazione o presenza di lenti e intercalazioni centimetriche di conglomerato.

La sottostante unità conglomeratica è caratterizzata, ancora più che nel precedente tratto, da una marcata eterogeneità geometrica e litologica. L'andamento del tetto varia da profondità minime di 8-10 m nel tratto tra il km 6+450 e 7+400 per poi approfondirsi verso Est fino a 20 m da p.c. Litologicamente è costituita da repentine alternanze/giustapposizioni di ghiaie e sabbie con interlivelli centimetrici di conglomerato, settori con cementazione debole o nulla, probabilmente in parte derivanti dall'alterazione e degradazione spinta dei conglomerati, e bancate di conglomerati lapidei. Questi ultimi sono stati riscontrati in particolare nel tratto compreso tra i sondaggi SC41-42 (km 6+500 – 6+800) a partire da 9-10 m fino a 19-20 m da p.c. con spessori fino a 7-8 m, e tra i sondaggi SC47 e ESC_S38, dove, in un tratto di oltre un km, a profondità variabili tra 15-20 m (km 7400-7600) e circa 30 m (km 7900-8950), la presenza di bancate discontinue di conglomerati ben cementati con spessori variabili tra 3 e 8 m ed estensione tra 100 e 300 m. I conglomerati lapidei presentano in quest'area un sensibile grado di alterazione, con presenza di numerosi vacuoli.

A partire dal km 7+900 (sondaggio ESC_S34) alla base dei depositi sabbioso-ghiaiosi e superiormente ai conglomerati, è presente un livello di limi sabbiosi e limi argillosi con spessore massimo di 6-8 m, attribuito, sulla base delle caratteristiche litologiche e della posizione stratigrafiche, al più antico Allogruppo del Bozzente (unità di C.na Fontana).

Tutto il settore in oggetto è caratterizzato dalla diffusa presenza di cavità sotterranee (Occhi Pollini), rinvenute a profondità variabili tra 3 e 27 m da p.c., sia all'interno dei depositi sabbioso-ghiaiosi dell'unità di Binago, sia nella sottostante unità conglomeratica alterata. Le cavità, che spesso presentano un parziale riempimento di limi sabbioso-argillosi con ciottoli sparsi, hanno dimensioni (intese come sviluppo lineare sulla verticale di sondaggio mediamente di 7 m fino a massimi di 14 m). Per una descrizione più dettagliata del fenomeno si rimanda al Par. 6.1.

SETTORE 3 (DA KM 8+800 A KM 9+600)

In questo settore il tracciato attraversa la parte più meridionale del rilievo morenico mindeliano di Sovico/Villa Belvedere, caratterizzato dall'affioramento dell'unità di C.na Fontana (Allogruppo del Bozzente) costituita da depositi fortemente alterati in limi sabbioso-ghiaiosi e localmente argille sabbiose e limose fino a profondità di 23-28 m da p.c.

Al di sotto di questi depositi è presente l'unità conglomeratica con presenza locale di livelli lapidei ben cementati a partire da 23-30 m da p.c. fino a profondità di almeno 40 m da p.c.

SETTORE 4 (DA KM 9+600 A KM 11+050)

Il tracciato successivamente entra nella valle del Lambro dove sono presenti diversi ordini di terrazzi appartenenti all'unità di Besnate, del sistema di Cantù e dei depositi alluvionali attuali del Sistema del Po/unità Postglaciale, questi ultimi sviluppati prevalentemente nel settore in sinistra idrografica dove costituiscono un terrazzo con quote di circa 180 m s.l.m. soggetto periodicamente a fenomeni di esondazione.

Sui terrazzi di ordine superiore, lo spessore dei depositi dell'unità di Besnate appare ridotto, nell'ordine di 4-5 m e sono caratterizzati da ghiaie e sabbie con grado di alterazione da medio ad alto e presenza in superficie di livelli sabbioso-limosi con spessore di 2-3 m.

Alla base è presente l'unità conglomeratica, contraddistinta, come nei settori precedenti da marcata eterogeneità e variabilità del grado di cementazione. La presenza di livelli lapidei ben cementati, con spessori di 5-6 m è rivenuta a partire da 6-10 m di profondità, in particolare in prossimità della sponda in destra idrografica del Lambro (sondaggio SC60); in sinistra idrografica si evidenzia la presenza di livelli metrici di conglomerato lapideo a partire da circa 15 m da p.c.

L'incisione valliva attuale del Lambro è contraddistinta da spessori massimi di 20-23 m di depositi fluvioglaciali e alluvionali appartenenti alle unità di Cantù e Postglaciale, costituiti da ghiaie in matrice sabbiosa localmente limosa, passanti in profondità a sabbie limose con ghiaia. Localmente sono rilevate tracce di debole cementazione o sottili intercalazioni centimetriche di conglomerato. Il grado di alterazione è generalmente basso, localmente medio, in particolare in corrispondenza delle sabbie limose più in profondità.

Alla base sono presenti conglomerati alterati e degradati in ghiaie e sabbie in matrice limosa con locali livelli di spessore plurimetrico di conglomerati lapidei ben cementati a struttura vacuolare (ESC_52, 53, 54) a partire da profondità di circa 30 m.

A profondità comprese tra 27 e 34 m circa, si evidenziano intercalazioni di limi argillosi debolmente sabbiosi di colore marrone rossastro e grigio intercalate a livelli di conglomerati alterati e degradati in sabbie limose e argillose.

SETTORE 5 (DA KM 11+050 A KM 14+000)

Il settore compreso tra il km 11+050 e 14+000 attraversa la parte più meridionale del pianalto ferrettizzato di Triuggio-Camparada, caratterizzato dall'affioramento dei depositi glaciali e fluvioglaciali dell'unità di C.na Fontana (Allogruppo del Bozzente) costituiti da limi sabbioso-ghiaiosi profondamente alterati, dal caratteristico colore rosso mattone, ricoperte da uno strato superficiale di limi eolici. Nel primo tratto che interessa il pianalto lungo la sponda idrografica sinistra, si osserva con una certa continuità la presenza di limi sabbiosi e argillosi fino anche a 15-18 m di profondità, interessando dunque la g.a. Lesmo 1. Le stratigrafie dei sondaggi più profondi, spinti fino a circa 60 m di profondità (ESC_56, 57, 58, presso la GA Lesmo 2) evidenziano nei primi 15-20 m la presenza di limi debolmente argillosi, localmente sabbiosi e con rara ghiaia, di colore marrone-rossastro e elevato grado di alterazione, con evidenze di argillificazione dei clasti.

A profondità maggiore si registra il passaggio a sabbie medio-fini localmente limose con ghiaia eterometrica di colore marrone-grigio, con grado di alterazione medio.

A partire da circa 26-27 m di profondità sono presenti livelli con spessore di 3-5 m di conglomerati lapidei da debolmente a ben cementati, con struttura vacuolare e grado di alterazione medio, con locali fenomeni di arenizzazione dei clasti. Verso Est (dal km circa 12+700) i livelli di conglomerato lapideo risultano più vicini alla superficie (15-18 m da p.c.).

I livelli di conglomerato appaiono alternati a livelli di sabbie limose e limi sabbiosi di colore da marrone-arancio a grigiastro. A profondità variabili tra 49 e 61 m i sondaggi hanno intercettato livelli di argille limose consistenti di colore grigio nerastro con locale presenza di torba che potrebbero plausibilmente rappresentare il tetto della sottostante unità delle Argille di Castel di Sotto ("Argille sotto il ceppo", Villafranchiano Auct).

In questo settore il pianalto ferrettizzato è solcato da profonde incisioni, che costituiscono la rete drenante dell'altopiano e comprendono varie vallecicole, relativamente strette e incise, delimitate da orli di terrazzo in genere molto marcati e con altezze mediamente nell'ordine della decina di metri, che in qualche caso raggiungono anche i 20 metri. I versanti e le aree vallive sono ricoperti da limi

sabbiosi e argillosi con bassa consistenza che, in particolare durante eventi piovosi particolarmente intensi possono essere soggetti a fenomeni di instabilità (erosione accelerata, soliflusso, soil slip, Cfr. elaborato EGGCC000GE00000RS004 – relazione geomorfologica).

SETTORE 6 (DA KM 14+000 A KM 16+600)

Nella parte finale della tratta C sono presenti in affioramento le unità di Besnate (km 14+000 e 15+700) e successivamente di Binago (da km 15+700 – fine tratta). quest'ultima caratterizzata da ghiaie e sabbie con sensibile grado di alterazione e presenza di uno spesso orizzonte limoso-sabbioso superficiale.

I depositi dell'unità di Besnate hanno in questo tratto spessori di 8-13 m circa e sono costituiti da ghiaie in matrice sabbiosa localmente limosa con grado di alterazione generalmente basso; più a ovest si evidenziano intercalazioni di sabbie limose con ghiaia e un incremento contestuale del grado di alterazione.

Tra il km 14+500 e 15+050 sono presenti spessori consistenti (localmente fino a 12 m, sondaggio SC90) di terreni di riporto eterogenei costituiti in prevalenza da ghiaie con locali frammenti e resti di laterizi).

Il tratto finale, dal km 15+700 è contraddistinta dall'affioramento dei terreni dell'unità di Binago, caratterizzata da sabbie limose con ghiaia con elevato grado di alterazione e presenza di livelli limoso-argillosi superficiali con spessori fino a 5 m. In questo tratto si evidenzia la diffusa presenza di cavità sotterranee (Occhi Pollini) a profondità comprese tra 3 e 13.5 m, localizzate in genere al limite tra i depositi dell'unità di Binago e i sottostanti conglomerati. Le dimensioni delle cavità sono mediamente inferiori rispetto al settore di Macherio-Biassono, con uno spessore medio di 2.8 m (Cfr. Par. 6.1.2).

Alla base dei depositi fluvioglaciali delle unità di Besnate e Binago è presente l'unità conglomeratica a profondità mediamente compresa tra 5 e 15 m da p.c., contraddistinta dalla medesima eterogeneità riscontrata nei settori precedenti. Livelli di conglomerato lapideo cementato sono evidenziati a partire da profondità di circa 15 m all'inizio del settore in oggetto (SC84-85) e di 9-11 m dal km 15+000 (ESC_S75, S94) e presenti, in livelli di spessore da metrico a plurimetrico, fino ad almeno 35 m da p.c. Nella parte terminale della tratta (ESC_S83) risultano localmente alternati a livelli di argilla limoso-sabbiosa marrone chiaro con tracce di ossidazione.

VIABILITÀ CONNESSE TRMI 10 E TRMI17

La viabilità connessa TRMI 10 si sviluppa in direzione N-S per circa 3.5 Km nei territori comunali di Biassono e Macherio. Il tracciato è interamente compreso nei depositi appartenenti all'Allogruppo di Binago, costituiti da sabbie e ghiaie con grado di alterazione medio-alto e presenza di un livello superficiale di alterazione limoso-sabbioso con spessore fino a 5 m. Il sondaggio ESC_S31, realizzato in corrispondenza del tratto previsto per la galleria artificiale TRMI10 evidenzia la presenza di sabbie limose con ghiaia e ciottoli alterate, con fenomeni di arenizzazione e argillificazione dei clasti fino a 18-20 di profondità. Il sondaggio evidenzia una cavità tra 10 e 11.5 m seguita, fino a 16.5 m da sabbie limoso-argillose prive di consistenza e sciolte (Nspt 1 colpo/45 cm) che potrebbe rappresentare il riempimento della cavità stessa.

La viabilità connessa TRMI 17 è ubicata tra i comuni di Vimercate ed Arcore con una lunghezza complessiva di circa 2 Km. Non sono stati eseguiti sondaggi geognostici lungo il tracciato, per cui le considerazioni riportate di seguito derivano dalle stratigrafie disponibili più a nord lungo l'asse principale. Il primo tratto è compreso entro l'Allogruppo di Binago, caratterizzato da ghiaie e sabbie fortemente alterate. Il tratto successivo, fino allo svincolo di Arcore, attraversa i depositi dell'Allogruppo di Besnate che in quest'area presentano anch'essi grado di alterazione medio e alto.

4.3 SEZIONI GEOLOGICHE TRASVERSALI AL TRACCIATO

Come premesso, oltre al profilo geologico di progetto lungo l'asse autostradale, sono state redatte 6 sezioni geologiche trasversali al tracciato (più una presso lo svincolo di Cesano Maderno, raccordo tra le tratte B2 e C), con direzione circa N-S, 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 congruamente, 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 EGGCC000GE00000SZ001 e EGGCC000GE00000SZ002, dei quali nel seguito se ne riporta la descrizione.

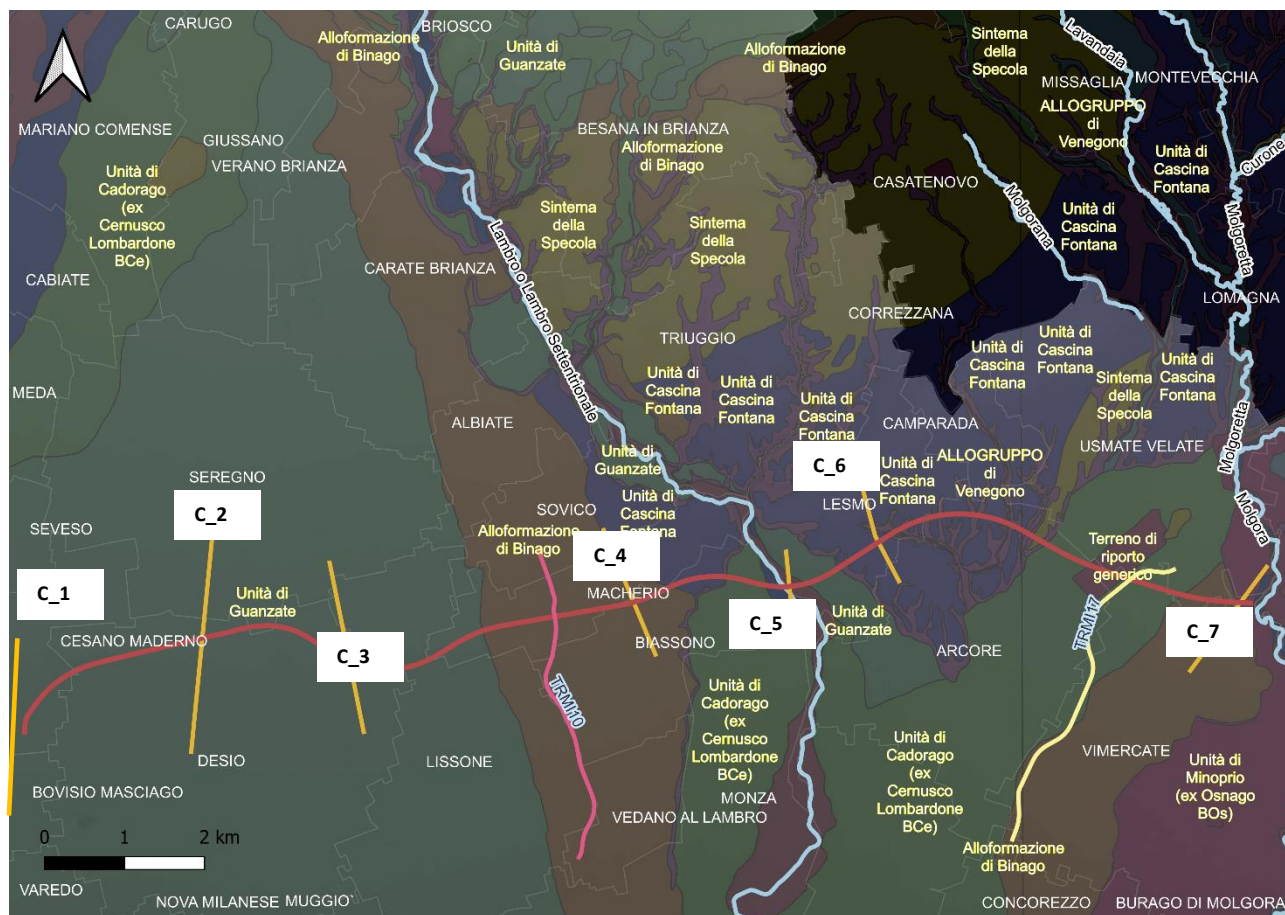


Figura 9 – ubicazione delle sezioni trasversali per la tratta C (la C_1 rappresenta lo svincolo di Cesano Maderno, raccordo tra tratta B2 e C).

SEZIONE C 1

La sezione si sviluppa in direzione N-S in corrispondenza dello svincolo di Cesano Maderno, che raccorda la tratta B2 e la tratta C ed è pertanto rappresentativa delle condizioni geologiche del sottosuolo dell'area interessata dalle opere dello svincolo. L'assetto geologico dell'area appare infatti sostanzialmente simile a quello della parte finale della tratta B2, con la presenza di depositi ghiaioso-

sabbiosi appartenenti all'unità di Besnate, localmente con presenza di lenti a granulometria prevalentemente sabbiosa in matrice limoso-ghiaiosa (ESB2_S33, SB2_60); localmente si evidenziano tracce di debole cementazione (SB2_70). La componente sabbioso-limosa diviene prevalente più in profondità, a partire da circa 20 m da p.c. (SB2_69), probabilmente connessa con il passaggio ad unità più antiche (es. Sintema di Binago). Complessivamente lo spessore dei depositi ghiaioso sabbiosi risulta superiore a 30 metri nella parte settentrionale e centrale e si riduce a 15-17 verso Sud (SB2_66, SB2_67). Alla base sono presenti conglomerati che si presentano da mediamente a ben cementati nel settore nord (ESB2_S33 a partire da 32 m da p.c.), mentre verso sud risultano caratterizzati da interlivelli a debole cementazione arenacea intercalati all'interno di ghiaie in matrice sabbioso limosa (SB2_66).

SEZIONE C 2

La sezione interseca l'asse principale al km circa 2+650 (G.A. Desio). La sezione non evidenzia variazioni litologiche rilevanti rispetto alla situazione presente lungo il tracciato dell'asse principale, con presenza di depositi ghiaioso-sabbiosi appartenenti all'unità di Besnate con spessore di circa 10 metri, poggianti sull'unità dei Conglomerati di Incerta Attribuzione. Questi ultimi presentano uno spessore complessivo superiore a 50 metri e caratteristiche di cementazione molto eterogenee con alternanza di banchi e livelli ben cementati e livelli costituiti da ghiaie e sabbie debolmente o non cementate: l'andamento del tetto appare regolare sia a S che a N dell'asse principale. Le stratigrafie dei pozzi ubicati a S e N rispetto al tracciato, evidenziano la possibilità di rinvenire livelli di conglomerato cementato anche al tetto dell'unità, a profondità di 10-15 m da p.c. Le stratigrafie dei pozzi profondi intercettano il tetto delle Argille di Castel di Sotto, alla base dell'unità conglomeratica, ad una profondità media di 65 m da p.c.

SEZIONE C 3

La traccia della sezione si sviluppa in corrispondenza dello svincolo di Desio, attraversandolo in direzione N-S (km circa 4+700). La sezione conferma la presenza di una depressione all'interno dell'unità conglomeratica, riempita da depositi ghiaioso-sabbiosi fino ad almeno 35 m da p.c., già individuata anche lungo l'asse principale e connessa con ogni probabilità ad un'antica struttura di paleovalle. Ai margini di tale depressione si osserva una rapida risalita del tetto dell'unità conglomeratica fino a 6 m da p.c. a S dell'asse principale e circa 15 m a N. A N del tracciato le stratigrafie profonde intercettano il tetto delle sottostanti Argille di Castel di Sotto ad una profondità di circa 50 m da p.c.; verso Sud il tetto non viene intercettato fino ad almeno 65 m da p.c., in questo settore l'unità conglomeratica presenta spessori superiori a 60 m ed appare caratterizzata da un maggiore grado di cementazione, seppure con grado variabile ed eterogeneo, nella parte superiore (fino a circa 35 m da p.c.), mentre in profondità sono prevalenti depositi ghiaioso-sabbiosi debolmente o non cementati.

SEZIONE C 4

La sezione attraversa il territorio comunale di Macherio e in parte di Biassono, intersecando l'asse principale circa al km 8+400 (G.A. Biassono 1). La maggior parte della sezione è caratterizzata dalla presenza in affioramento dell'unità di Binago, costituita da ghiaie e sabbie in matrice limoso-sabbiosa localmente abbondante e grado di alterazione medio-alto; localmente sono presenti livelli con fenomeni di debole cementazione. Lo spessore dell'unità è nell'ordine dei 15-18 m e si assottiglia progressivamente a N dell'asse principale chiudendosi in corrispondenza del rilievo morenico di Villa Belvedere, dove affiorano i depositi di origine glaciale dell'unità di Cascina Fontana (Allogruppo del Bozzente). L'unità del Bozzente, costituita da sabbie limose e ghiaie limoso-argillose fortemente alterate, viene identificata anche più a sud alla base dei terreni dell'unità di Binago, con spessori variabili tra un massimo di 30 m a Nord, in corrispondenza della struttura morenica, e un minimo di 5-6 m procedendo verso Sud. La sottostante unità conglomeratica viene identificata in tutte le stratigrafie a profondità di circa 20-22 m in corrispondenza dell'asse principale e nel settore a S

rispetto ad esso. Verso N, a circa 500 m dall'asse principale, le stratigrafie dei pozzi disponibili evidenziano una zona di alto del tetto dell'unità conglomeratica che risale fino a circa 10 m da p.c. Il grado di cementazione dei conglomerati, sulla base dei dati stratigrafici disponibili, sembra ridursi procedendo verso Sud e verso la base dell'unità, dove prevalgono depositi sabbioso limosi. La sottostante unità delle Argille di Castel di Sotto è individuata a profondità variabili tra 52 e 65 m da p.c., in aumento verso Sud.

SEZIONE C 5

La sezione è stata realizzata in corrispondenza dell'attraversamento del fiume Lambro (km circa 10+500) ed include l'area interessata dal Ponte Cascina Grugagna. Come già evidenziato dal profilo geologico longitudinale di progetto, tale area risulta molto articolata dal punto di vista stratigrafico, con la presenza di diversi ordini di terrazzi alluvionali e fluvioglaciali legati al Lambro ed appartenenti alle unità di Besnate, cantù e Postglaciale. Lo spessore massimo dei depositi alluvionali recenti ghiaioso-sabbiosi (unità Postglaciale e Cantù) in corrispondenza dell'incisione valliva del Lambro è nell'ordine dei 10 m, mentre i terrazzi di ordine superiore (unità di Besnate) presentano spessori variabili tra un massimo di 13 m in sinistra idrografica mentre in destra idrografica, si assottigliano progressivamente verso S fino a meno di 5 m. Alla base è presente l'unità conglomeratica, con spessori complessivi di almeno 40 metri e grado di cementazione molto eterogeneo, come già osservato anche nelle altre porzioni del tracciato. La sottostante unità delle Argille di Castel di Sotto è rinvenuta nelle stratigrafie in destra idrografica a profondità di 43-45 m da p.c. In corrispondenza del Ponte Cascina Grugagna, le stratigrafie evidenziano la presenza di depositi prevalentemente sabbiosi con spessore di circa 12 m, passanti in profondità, fino a 30 m da p.c., a livelli di conglomerato alterato e degradato in sabbia limoso-ghiaiosa con cementazione debole o assente, alternata a livelli plurimetrici di ghiaie e sabbie con interlivelli centimetrici/decimetrici di conglomerato cementato; non sono evidenziate, fino alla profondità massima di indagine, livelli marcatamente lapidei.

SEZIONE C 6

La sezione interseca l'asse principale circa al km 11+700 (G.A. Lesmo 2). Questo settore è caratterizzato dalla presenza in affioramento dell'unità di Cascina Fontana (Allogruppo del Bozzente) costituita da limi sabbioso-ghiaiosi fortemente alterati con spessore di circa 17-20 m in corrispondenza del tracciato autostradale, in aumento fino a oltre 40 m verso Nord, in corrispondenza dei rilievi morenici di Lesmo/Camparada. Alla base è presente l'unità conglomeratica il cui tetto mostra un andamento piuttosto regolare, ad una quota di circa 210 m s.l.m. ad eccezione del settore più a Sud, dove si osserva un innalzamento fino a circa 5 m da p.c. Lo spessore complessivo dell'unità è nell'ordine di 30-45 m, nel settore Sud si osserva una maggiore presenza di livelli limoso-sabbiosi intercalati ai conglomerati. Alla base sono presenti le Argille di Castel di Sotto a profondità variabili tra 65 m a Nord e 35-40 m a Sud.

SEZIONE C 7

La sezione si sviluppa in direzione NE-SW in corrispondenza della parte finale della tratta. L'assetto stratigrafico non presenta variazioni significative rispetto a quello evidenziato lungo l'asse principale, con presenza in affioramento di terreni appartenenti all'unità di Binago, caratterizzati da marcata alterazione e abbondanza di frazione limoso-argillosa nei primi metri. Lo spessore complessivo di tali depositi è di circa 10-15 m e poggiano sull'unità conglomeratica che in questo settore mostra la presenza di un'intercalazione limoso-argillosa piuttosto continua, con spessore di circa 6-7 m a partire da circa 25 m da p.c. Lo spessore complessivo dell'unità conglomeratica è di circa 40 m; alla base è stata intercettata l'unità delle Argille di Castel di Sotto a profondità di circa 55 m.

5 VALUTAZIONI QUALITATIVE SULLE CARATTERISTICHE LITOTECNICHE DELLE TERRE DA SCAVO

Si riportano nel presente paragrafo alcune valutazioni qualitative inerenti le 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 C, definite sulla base delle prove granulometriche/limiti di Atterberg di PD e PE. Sono state in particolare distinte le seguenti classi: terreni prevalentemente limoso-argillosi (classi A4, A5, A6, A7, in rosso), ghiaie e sabbie con matrice fine plastica tra il 25% e il 35% (classi A2-6, A2-7, in giallo) e ghiaie e sabbie con matrice fine non plastica inferiore al 35% (classi A1, A3, A2-4, A2-5, in verde); nell'ambito di quest'ultima classe, è stata operata, dove possibile, un'ulteriore suddivisione, indicando i tratti in cui sono attesi i terreni con le qualità litotecniche migliori ai fini del potenziale riutilizzo sulla base dei test Los Angeles ad oggi completati (coefficiente <30%, in azzurro) o sulla base, in via preliminare, di valutazioni qualitative basate sull'osservazione diretta dei terreni nel corso dei sondaggi (caratteristiche litologiche, grado di alterazione ecc., retinatura barrata verde/azzurra); l'effettiva presenza di terreni di qualità idonea in questi ultimi settori dovrà in ogni caso essere verificata tramite esecuzione di prove dirette di laboratorio (test Los Angeles).

Come si evince facilmente dalle sezioni lungo profilo dell'asse principale, nella prima metà della tratta C si possono rinvenire terreni con le caratteristiche litotecniche migliori ai fini del potenziale riutilizzo. Questi sono attesi in 3-4 bancate comprese tra inizio tratta (appena dopo lo svincolo di Cesano Maderno – anch'esso potenzialmente caratterizzato da terreni ottimali) e il km 5+000. I test Los Angeles eseguiti nel corso della campagna di indagine di PE ha evidenziato la presenza di terreni potenzialmente dalle ottime caratteristiche litotecniche anche nei tratti compresi tra i km 14+050 e 14+200 e tra il km 15+100 e 15+300 (in azzurro in Figura 10 – non a caso in quest'area era presente un'attività estrattiva).

È comunque necessario annotare come tali considerazioni saranno valutate, come premesso, in maggior dettaglio all'interno del PUT considerando tutti gli aspetti quali valutazioni di tipo granulometrico, prove Los Angeles, e analisi mineralogiche per determinare se la matrice fine, che può essere presente in misura più o meno rilevante, possa rendere antieconomico il loro riutilizzo, a causa delle necessarie operazioni di preparazione delle terre che si rendano necessarie (ad es. lavaggio).

Dal km 8+750 in poi, invece, il quadro geologico muta radicalmente.

Il profilo di alterazione dell'allogruppo di Binago è infatti ben superiore a quello dell'unità di Besnate, presente in maggiore misura nei primi 8 km più occidentali. Come si evince dagli stralci delle sezioni qui riportate, sono comunque presenti alcuni brevi tratti (km 8+750 a 9+650, 14+300 a 15+750) nei quali è invece possibile rinvenire terre di discreta qualità (in verde), fermo restando le considerazioni inerenti il profilo di alterazione e la presenza di depositi fini.

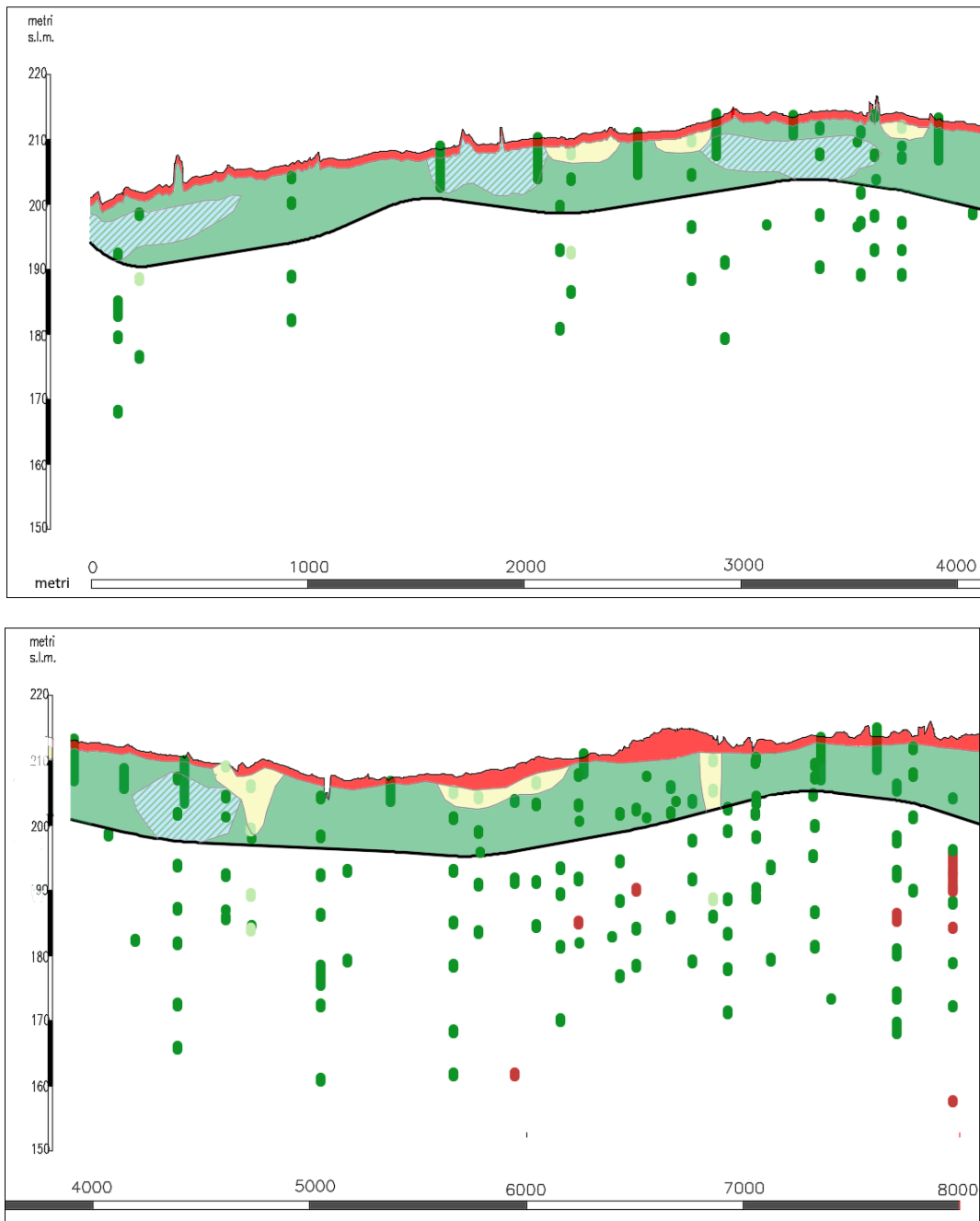


Figura 10: rappresentazione in sezione dei campioni sottoposti a classificazione UNI 11531 e correlazione geologicamente basata delle classi, per un'analisi realistica della qualità dei terreni di scavo lungo progetto fino a circa metà tratta C, ove sono presenti i materiali di migliore qualità geotecnica, anche potenzialmente pregiati per inerti (rosso: classi A4-A5-A6-A7, giallo/verde chiaro: classe A2-6; verde scuro, classi A1, A2, A2-4; con il barrato verde-azzurro sono indicati i terreni con le caratteristiche litotecniche ottimali sulla base dell'osservazione qualitativa degli stessi)

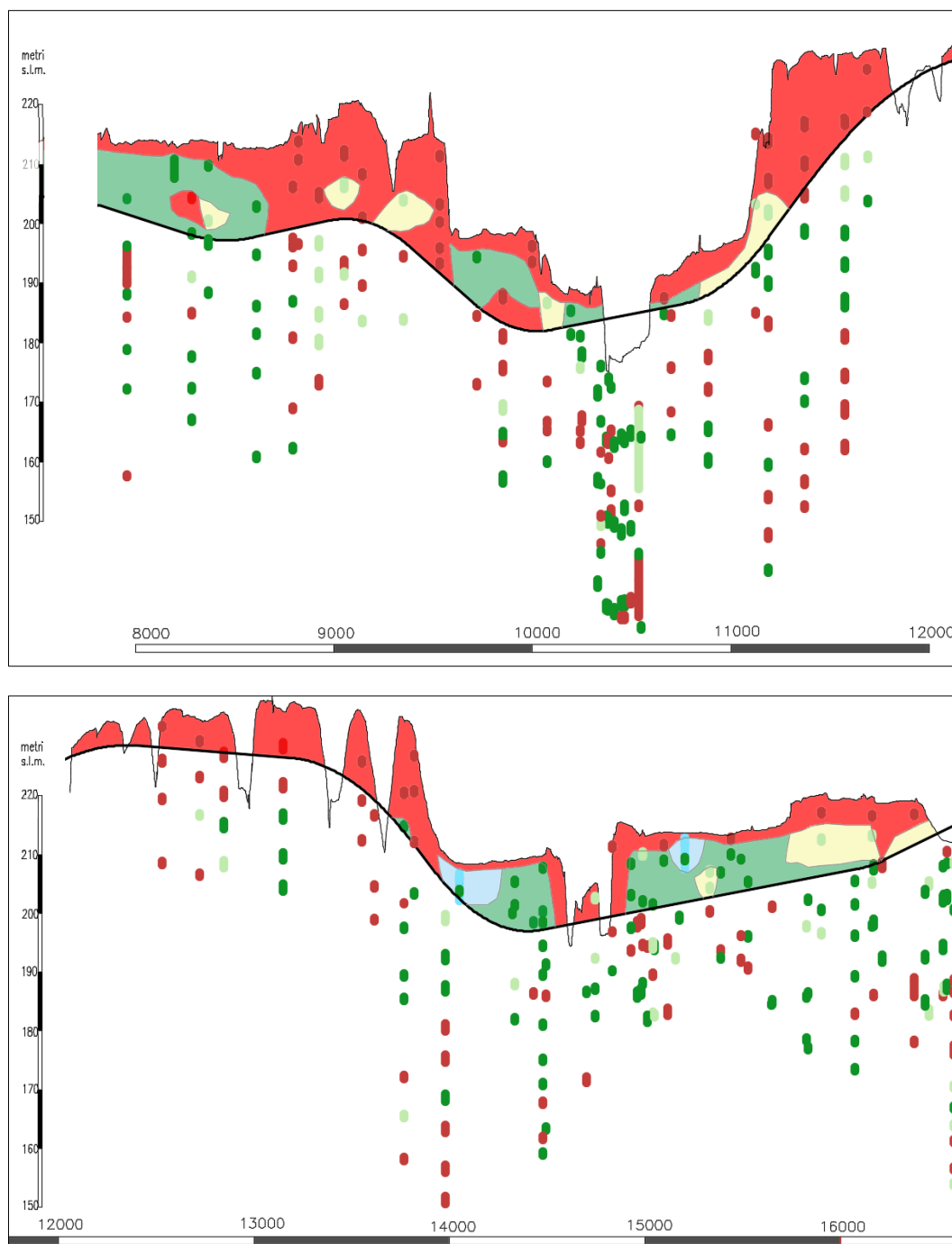


Figura 11: rappresentazione in sezione dei campioni sottoposti a classificazione UNI 11531 e correlazione geologicamente basata delle classi, per un'analisi realistica della qualità dei terreni di scavo lungo progetto fino a circa metà tratta C, ove sono presenti i materiali di migliore qualità geotecnica, anche pregiati per inerti (rosso: classi A4-A5-A6-A7, giallo/verde chiaro: classe A2-6; verde scuro, classi A1, A2, A2-4, ; in azzurro sono indicati i terreni con le caratteristiche litotecniche ottimali confermate dai test Los Angeles ad oggi disponibili – coefficiente <30%)

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

SETTORE 1 (SVINCOLO CESANO MADERNO)

Questo settore comprende l'area dello svincolo di Cesano Maderno, che raccorda la tratta B2 e la tratta C tra di loro. In generale questo tratto presenta terre dalle buone caratteristiche, al pari dei corrispondenti tratti lungo gli assi principali ad esso afferenti (porzione finale della tratta B2 e iniziale della C). Le stratigrafie evidenziano la presenza di un livello superficiale di alterazione di spessore generalmente compreso tra 1 e 2.5 m. La porzione più orientale dell'area è caratterizzata da ghiaie

in matrice limoso-sabbiosa di colore grigio o nocciola con basso grado di alterazione e buona resistenza (n. colpi SPT generalmente >30) fino a circa 7.5-8.5 m da p.c. Lo spessore di tale livello grossolano si riduce spostandosi verso ovest (SB2_64) dove compaiono sabbie con livelletti cementati degradati a partire da 6 m da p.c.. Si segnala inoltre la presenza diffusa di consistenti spessori di materiali di riporto nella maggior parte dei sondaggi (SB2_64, SB2_65, SB2_66, SB2_68, SB2_71) con spessori variabili tra 2 m e 14 m (SB2_68). Per le ragioni sopra esposte la possibilità di reperire materiali di buona qualità è maggiormente probabile nella parte più orientale, nei pressi dell'inizio della tratta C. È però opportuno rammentare l'esistenza di una discarica/sito contaminato (ex cava Girardi a Cesano Maderno), oggetto di caratterizzazione ambientale da parte degli Enti Competenti, tra i rami dello svincolo a NE, da tenere in debita considerazione sia per la realizzazione dell'opera, sia per questioni inerenti il riutilizzo.

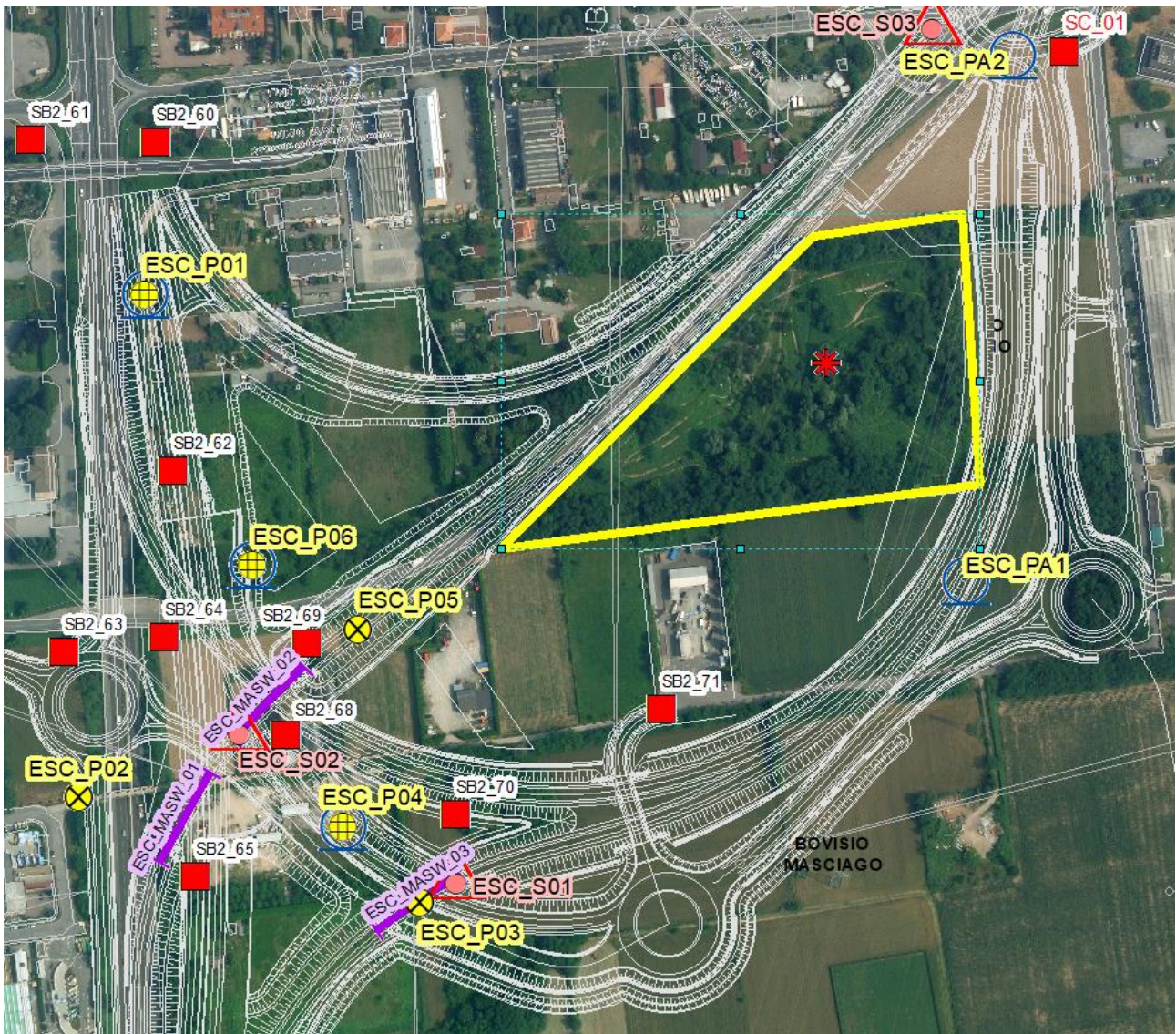


Figura 12: area di discarica presso lo svincolo di Cesano Maderno (ex cava Girardi – in riquadro giallo).

SETTORE 2 (da km 0+000 a km 6+450)

Nel settore iniziale, in Comune di Cesano Maderno, la tratta C si sviluppa sui terreni dell'Allogruppo di Besnate caratterizzata da modesti spessori di suolo alterato (meno di 2 metri), e che al di sotto di esso sono presenti ghiaie e sabbie con alterazione bassa o assente fra le quali vi sono buone possibilità di reperimento di materiali con buone/ottime caratteristiche litotecniche (la c.d. ghiaia

“grigia”). A profondità maggiori di 7-8 m si osserva localmente un aumento della frazione limosa e una maggiore presenza di clasti e ciottoli con grado di alterazione medio.

Un graduale peggioramento si evidenzia procedendo verso est, dove sono presenti evidenze di una maggiore alterazione dei terreni. Dal punto di vista geologico questo si spiega con la presenza a profondità progressivamente minori di depositi argilloso-limosi che potrebbero costituire una copertura eluviale (ghiaie e sabbie alterate) di unità più antiche.

Migliori condizioni si riscontrano nel tratto compreso tra il Km 1+500 e 2+000, dove le caratteristiche dei materiali fra 2 e 5 m sono simili a quelle favorevoli presenti nel primo tratto descritto con presenza di ghiaie e ciottoli con grado di alterazione assente o basso fino ad almeno 8 m da p.c.

Tra il km 2+000 e 4+240 le condizioni dei terreni risultano a tratti favorevoli, ma solo su ridotte estensioni di terreno sono possibili previsioni certe, in quanto i depositi dell'unità di Besnate hanno spessore molto ridotto, e presentano in alcune parti del tracciato (in particolare fra SC17/18) marcate condizioni di alterazione, (grado di alterazione medio-elevato – WC3-WC4). Terreni di buona qualità si riscontrano in particolare nel tratto compreso tra SC09 e SC15/16, dove a partire da 3-5 m da p.c. si trovano depositi prevalentemente ghiaiosi con basso grado di alterazione e buona resistenza.

In corrispondenza dello svincolo di Desio i primi metri del sottosuolo sono caratterizzati da terreni con caratteristiche litotecniche mediocri, data la presenza di spessori consistenti (localmente superiori a 5 m) di materiali di riporto poco addensati di incerte caratteristiche, con possibile presenza di rifiuti.

Il tracciato attraversa successivamente terreni da mediocri a molto mediocri nei primi 5-7 m ma discreti a profondità maggiori. Tali condizioni già non ottimali, mostrano un ulteriore peggioramento verso est in alcuni casi come, ad esempio, nei sondaggi SC_28, 28bis e SC_31. Tale riduzione della qualità dei terreni prosegue avanzando verso l'affioramento della formazione di Binago. I ciottoli e i frammenti detritici di varia origine (clasti) si presentano quasi sempre alterati e i livelli limosi sono frequenti soprattutto in prossimità della superficie, dove i suoli presentano uno spessore che supera talora i due metri. Possibilità di rinvenimento di terreni con buone caratteristiche, è evidenziata in corrispondenza SC33/33bis e in SC35/35bis. A est del sondaggio SC35bis le condizioni nei primi metri sono nettamente peggiori, e vedono prevalere limi argilloso-sabbiosi fino a oltre 4 m di profondità, e di materiali ghiaiosi di scarsa qualità a profondità maggiori.

SETTORE 3 (da km 6+450 a km 9+600)

Questo settore è caratterizzato dalla presenza di ghiaie localmente con livelli a debole cementazione, attribuite dalla cartografia ufficiale alla formazione di Binago, di cui rappresentano spesso la parte inferiore. Nel primo tratto che attraversa il territorio comunale di Macherio le possibilità di reperimento di terreni di ottima qualità, ai fini di un eventuale utilizzo per aggregati e calcestruzzi, risultano basse o nulle a causa dell'elevato spessore della coltre limosa di alterazione superficiale (localmente superiore a 3 m, SC42, SC47) e presenza di terreni sabbioso-ghiaiosi con grado di alterazione da medio a elevato che tende ulteriormente ad aumentare procedendo verso est. In questo tratto è comunque presente una buona disponibilità di materiale di discreta qualità, sebbene vi sia una diffusa presenza di cavità (Occhi Pollini) che localmente può ridurre il volume di materiale disponibile. Proseguendo verso Est, nel territorio comunale di Biassono, il tracciato si sviluppa in galleria all'interno dei depositi dell'Allogruppo del Bozzente, costituiti in prevalenza da limi e argille fino a profondità di 15-20 m.

SETTORE 4 da km 9+600 a km 11+050

In questo settore il tracciato attraversa per un breve tratto i depositi glaciali limosi appartenenti all'Allogruppo del Bozzente (unità di C.na Fontana), per svilupparsi successivamente in sedimenti fluvioglaciali ghiaioso-sabbiosi appartenenti all'Allogruppo di Besnate, caratterizzati tuttavia da

ridotto spessore e presenza di un livello limoso-sabbioso superficiale con spessore nell'ordine di 2 metri. Terreni di qualità discreta sono presenti più a Est (km circa 10+000) per un breve tratto dove lo spessore dei depositi ghiaioso-sabbiosi aumenta e i test Los Angeles eseguiti sul pozzetto ESC_P44 fornisce coefficienti del 33-35.

Successivamente fino al km 10+300, i depositi ghiaioso-sabbiosi dell'unità di Cantù sul terrazzo fluvioglaciale in fregio al Lambro risultano caratterizzati da abbondanza di matrice fine e qualità di resistenza inferiori rispetto a tratto precedente (coefficienti Los Angeles pari a circa 39 sui campioni prelevati nel pozzetto ESC_P46).

Tali condizioni poco favorevoli al reperimento di materiali di buona/ottima qualità persistono anche in sinistra idrografica del Lambro fino al termine del settore in oggetto, per la presenza di suoli di alterazione superficiale di oltre due metri di spessore, sormontanti ghiaie scarsamente addensate e con grado di alterazione medio-alto, come confermato dalle prove Los Angeles sui campioni del pozzetto ESC_P49 (coefficienti pari a 37.5-38).

SETTORE 5 da km 11+050 a km 14+000

In questo settore è presente in affioramento l'unità di Cascina Fontana (appartenente all'Allogruppo del Bozzente) costituita in prevalenza da limi sabbioso-ghiaiosi fortemente alterati fino a profondità variabili tra 8 e 18-20 m da piano campagna. Il quantitativo di terreni con buone caratteristiche litotecniche è molto scarso a causa della natura prevalentemente limosa dei sedimenti attraversati. Si evidenziano buone possibilità solo per brevi tratti (SC70-SC72; SC82-SC83), dove la profondità di scavo si spinge oltre il livello di alterazione superficiale, all'interno dei sottostanti depositi sabbioso-ghiaiosi.

SETTORE 6 da km 14+000 a km 16+610

La prima parte di questo settore, fino al km 15+700 è caratterizzata in superficie e fino alla profondità di scavo da terreni ghiaioso-sabbiosi appartenenti all'Allogruppo di Besnate con grado di alterazione basso e solo localmente medio, in particolare nella parte più superficiale. Pertanto, i terreni in questo tratto risultano nel complesso favorevoli per il reperimento di terreni di qualità discreta/buona. I test Los Angeles eseguiti nel corso delle indagini di PE indicano che i tratti maggiormente favorevoli al reperimento di materiali con buone/ottime caratteristiche, fino ad almeno 5 m da p.c., anche per un potenziale utilizzo come inerti, sono localizzati indicativamente tra il km 14+050 e 14+200 (valori del coefficiente Los Angeles di 28,54 e 27,78 nei due campioni prelevati nel pozzetto ESC_P56) e tra il km 15+100 e 15+300 (valori del coefficiente Los Angeles di 28,84 e 29,39 nei due campioni prelevati nel pozzetto ESC_P59 e valori di 31-32 nel pozzetto ESC_P58). I test Los Angeles confermano la presenza di terreni con buone caratteristiche, seppur di qualità leggermente inferiore, anche nel tratto successivo (km 15+300 – 15+700) con valori del coefficiente nell'ordine di 32-33.5 nel pozzetto ESC_P61.

Nel tratto compreso tra il km 14+500 e 15+100 il tracciato interessa una vecchia cava ritombata, caratterizzata da spessori di materiali di riporto antropici eterogenei fino alla profondità di fondo scavo, il cui eventuale riutilizzo dovrà essere oggetto di apposite valutazioni di tipo litologico e ambientale (si rimanda agli specifici elaborati per i dettagli).

Dal km 15+700 sino a fine tratta l'unità di Besnate si assottiglia e viene sostituita in affioramento da depositi prevalentemente limosi e sabbioso-limosi dell'unità di Binago, e successivamente (a est di SC104), da ghiaie e sabbie anch'esse assoggettate a forte alterazione fino a diversi m di profondità e pertanto con caratteristiche litotecniche nel complesso mediocri.

VIABILITÀ CONNESSE TRMI 10 E TRMI17

Premesso che gli scavi previsti per le viabilità connesse in oggetto risultano estremamente limitati e concentrati, si rammenta come la viabilità connessa TRMI 10 si sviluppa in direzione N-S per circa

3.5 Km nei territori comunali di Biassono e Macherio. Il tracciato è interamente compreso nei depositi appartenenti all'Allogruppo di Binago, costituiti da sabbie e ghiaie con grado di alterazione medio-alto e presenza di un livello superficiale di alterazione limoso-sabbioso con spessore fino a 5 m. Le caratteristiche litotecniche dei terreni sono analoghe a quelle del settore 3, generalmente mediocri o scadenti.

La viabilità connessa TRMI 17 si sviluppa tra i comuni di Vimercate ed Arcore con una lunghezza complessiva di circa 2 Km. Non sono stati eseguiti sondaggi geognostici lungo il tracciato, per cui le considerazioni riportate di seguito derivano dalle stratigrafie disponibili più a nord lungo l'asse principale e dall'esame della cartografia geologica/geomorfologica e dei dati bibliografici al contorno. Il primo tratto è compreso entro l'Allogruppo di Binago, caratterizzato da ghiaie e sabbie fortemente alterate che rendono poco idonei al reperimento di materiali di buona qualità. Il tratto successivo, fino allo svincolo di Arcore, attraversa i depositi dell'Allogruppo di Besnate che tuttavia in questo settore si presenta fortemente alterata, e di conseguenza con caratteristiche litotecniche mediocri.

6 PROBLEMATICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO

In questo paragrafo vengono riportati, 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.
- presenza di cavità sotterranee (Occhi Pollini), particolarmente diffusa in alcuni settori della tratta in oggetto; quest'ultimo fenomeno in particolare, vista la rilevanza ai fini progettuali e realizzativi dell'opera, è stato approfondito al paragrafo 6.1.
- possibili fenomeni di dissesto superficiale (soil slip) in corrispondenza delle scarpate di raccordo tra i terrazzi alluvionali e lungo le incisioni vallive del reticolo idrico minore nelle zone di affioramento dei depositi glaciali e fluvioglaciali più antichi (Unità di C.na Fontana, Sintema della Specola; cfr. relazione geomorfologica EGGCC000GE00000RS004)
- rischio idraulico (esondazione, erosione spondale) lungo i corsi d'acqua principali (Lambro, Molgora/Molgoretta e Roggia Molgorana, si rimanda alla Relazione Idraulica per dettagli)
- possibile interferenza tra falda acquifera e opere (basata sulla piezometria del 2014 assunta come livello piezometrico di progetto) e/o possibile presenza di falde acquifere sopsese localizzate, per tali aspetti si rimanda, per maggiori dettagli, alla Relazione Idrogeologica (elaborato EIGCC000GE00000RS005)

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 13).

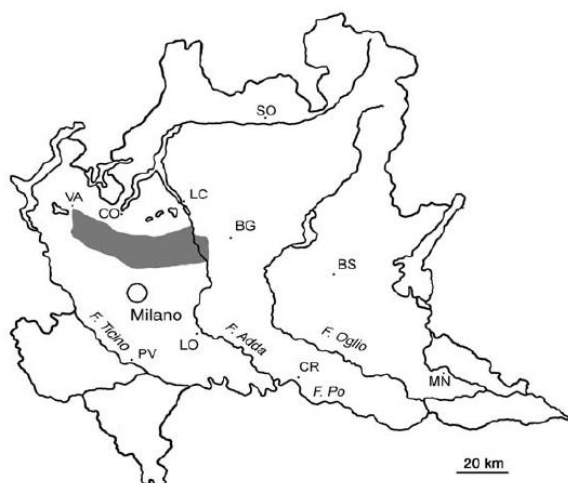


Figura 13 – in grigio, area di maggiore diffusione degli Occhi Pollini (da Strini, 2001)

Gli Occhi Pollini si rinvencono tipicamente all'interno dei depositi fluvio-glaciali 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.

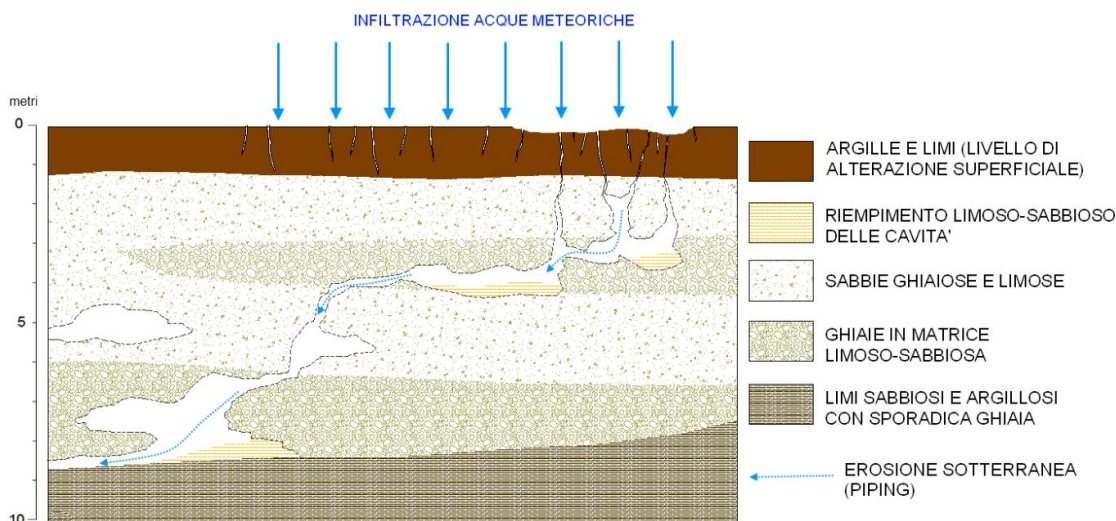


Figura 14– Rappresentazione schematica in sezione di gallerie e cavità (Occhi Pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione

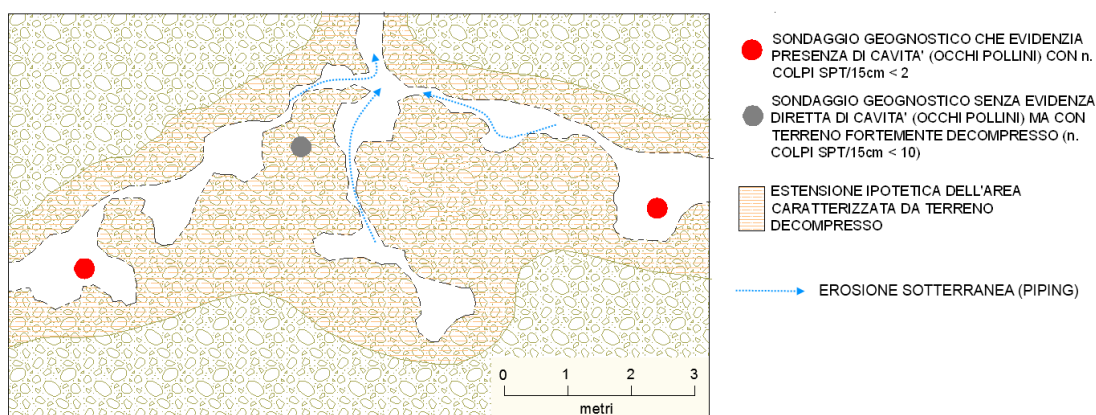


Figura 15– Rappresentazione schematica in pianta di una rete di cavità (Occhi Pollini) generati da fenomeni di erosione sotterranea ad opera delle acque di infiltrazione, che determinano la formazione di una fascia di decompressione dei terreni circostanti (retinatura in rosso)

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.

Gli Occhi Pollini individuati nel corso della perforazione dei sondaggi geognostici a carotaggio continuo delle campagne di indagine di PD e di PE sono riportati in Tabella 3. Durante la campagna di indagine di PE è stata inoltre prevista, appositamente per l'individuazione di potenziali cavità o

terreni fortemente detensionati, la realizzazione di sondaggi a distruzione di nucleo con esecuzione di DAC test.

Tabella 3 – Occhi Pollini individuati dai sondaggi a carotaggio continuo di PD e PE

ID	Fase	Opera	Descrizione	da [m]	a [m]	spessore [m]
SC07	PD	GA DESIO	Cavità riempita di limo-argilloso e sabbia limosa molto sciolta	7.5	13	5.5
SC09	PD	GA DESIO	Cavità riempita di ghiaia limosa sciolta	8.5	11.5	3
ESC_S09	PE	GA DESIO	Cavità	6.5	10	3.5
SC38	PD	GA MACHERIO 2	Cavità riempita di ghiaia sabbioso-limosa sciolta e umida	6.5	10.5	4
SC39	PD	GA MACHERIO 2	Cavità parz. riempita di limo-argilloso estremamente tenero e soffice	13.5	20	6.5
SC40	PD	GA MACHERIO 2	Cavità parz. riempita di limo-argilloso estremamente tenero e soffice	13.5	19	5.5
SC43	PD	GA MACHERIO 2	Cavità riempita di ghiaia limosa sciolta da molto umida a satura	9	20	11
SC44	PD	GA MACHERIO 2	Cavità riempita di ghiaia limosa molto sciolta, umida	3	8.5	5.5
SC47	PD	CV MACHERIO 2	Cavità parz. riempita di limo-argilloso estremamente tenero e soffice	18	28	10
SC49	PD	GA MACHERIO 3	Cavità parz. riempita di sabbia limosa con ghiaia; vuoto da 3 a 4 m	3	17.8	14.8
SC50	PD	GA BIASSONO 1	Cavità riempita di sabbia-limosa con ghiaia e livelli di argilla; materiale molto sciolto	12.5	18	5.5
SC51	PD	GA BIASSONO 1	Cavità	6	15	9
ESC_S25	PE	GA MACHERIO 2	Cavità	22.2	24.3	2.1
ESC_S28	PE	GA MACHERIO 2	Cavità riempita di limo sabbioso-argilloso privo di consistenza/sciolto	4.5	5	0.5
ESC_S28	PE	GA MACHERIO 2	Cavità parz. riempita di limo-sabbioso molto unico e sporadici clasti alterati	10.6	17.9	7.3
ESC_S30	PE	CV MACHERIO 1	Cavità parz. riempita di limo-sabbioso molto unico e sporadici clasti alterati	7.5	14	6.5
ESC_S31	PE	GA TRMI10	Cavità parz. Riempita di sabbia limoso-argillosa con ghiaia priva di consistenza/sciolta; vuoto da 10 a 11.5 m	10	16.5	6.5
SC94	PD	VIMERCATE	Cavità	11.5	13.5	2
SC99	PD	VIMERCATE	Cavità riempita di sabbia-limosa umida e molto sciolta; presenza di ciottoli sul fondo	3	9.5	6.5
SC102	PD	VIMERCATE	Cavità riempita di sabbia limosa umida	7.5	10.5	3
SC104	PD	VIMERCATE	Cavità in conglomerato alterato e degradato	8.7	9.7	1
ESC_S70	PE	CV ARCORE 3	Probabile presenza di cavità	34.7	35	0.3
ESC_S71	PE	VIMERCATE	Cavità	34	34.3	0.3
ESC_S72	PE	VIMERCATE	Cavità	20	21	1
ESC_S77	PE	VIMERCATE	Cavità parz. Riempita di limo sabbioso-ghiaioso; vuoti tra 10-10,8 m e 12-13 m	10	13	3
ESC_82	PE	VIMERCATE	Cavità riempita di limo argilloso molto sciolto	6	6.5	0.5

Complessivamente, lungo la tratta C sono stati individuati 28 Occhi Pollini (di cui 1 lungo la viabilità connessa TRMI10), dei quali 11 nel corso dei sondaggi di PE, a profondità comprese tra un minimo di 3 m e un massimo di 35 m e dimensioni, intese come sviluppo lineare lungo rilevato lungo la verticale del sondaggio, variabili tra 0.5 m e 14.5 m.

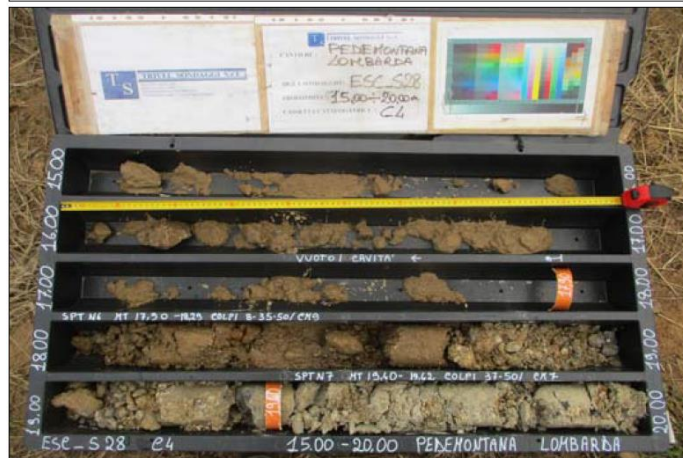
Le cavità vengono evidenziate nel corso della perforazione dei sondaggi come tratti con rapido avanzamento delle aste sotto il proprio peso e recupero di terreno nullo o molto scarso; come premesso, vengono identificati come Occhi Pollini anche i tratti caratterizzati da bassissimi valori di Nspt (inferiore a 2), che non siano entro i primi 2-3 m da p.c.. Frequentemente in corrispondenza degli Occhi Pollini si osserva un avanzamento di 45 centimetri con un solo colpo, anche per molti metri consecutivi (ad esempio SC49, con 4 SPT consecutive con 1 colpo/45 cm tra 4 e 13.5 m di profondità).

Le cavità lungo la tratta sono per la maggior parte state individuate all'interno di depositi ghiaioso-sabbiosi molto alterati, con abbondante frazione limoso-argillosa e locali fenomeni di debole cementazione. Sono state individuate anche cavità all'interno di conglomerati fortemente alterati e degradati; si riporta in Figura 16 a titolo di esempio la cavità individuata nel sondaggio di PE ESC_S25 (G.A. Macherio 2) tra 22.3 e 24.3 m di profondità, al di sotto di livelli decimetrici il conglomerato da debolmente a ben cementato.

Le cavità evidenziate, direttamente osservate nel corso della campagna di indagine di PE o come risultato dalle descrizioni stratigrafiche dei sondaggi di PD si presentano in genere parzialmente riempite di materiale costituito da limi sabbioso-argillosi e sabbie limose con presenza di clasti e ciottoli sparsi. Il riempimento deriva da materiale esso stesso generato dai fenomeni di erosione sotterranea all'origine del fenomeno, come la circolazione delle acque nel sottosuolo o il crollo parziale della volta delle cavità (Cfr. Appendice A). In ogni caso l'eventuale riempimento è sempre caratterizzato da elevato indice dei vuoti, scarsissimo addensamento ed alto grado di umidità, e dà origine nel corso della perforazione ad una bassissima percentuale di recupero (si veda ad esempio la cavità evidenziata nel sondaggio di PE ESC_S28 tra 10.8 e 17.9 m in Figura 16. In alcuni casi le cavità appaiono vuote, con totale assenza di recupero di terreno (ESC_S09, ESC_S25 in Figura 17); sebbene anche in questi casi non si possa escludere la presenza parziale di materiale di riempimento non recuperato a causa del grado di consistenza/addensamento pressoché nullo.



Cassetta n° 3 - profondità da m 10,00 a m 15,00



Cassetta n° 4 - profondità da m 15,00 a m 20,00

Figura 16 – sondaggio ESC_S28, si evidenzia un tratto da 10.8 a 17.9 m con avanzamento delle aste per il proprio peso e scarsissimo recupero di terreno costituito da limo argilloso estremamente soffice e bagnato, con sporadica presenza di clasti e ciottoli sparsi.

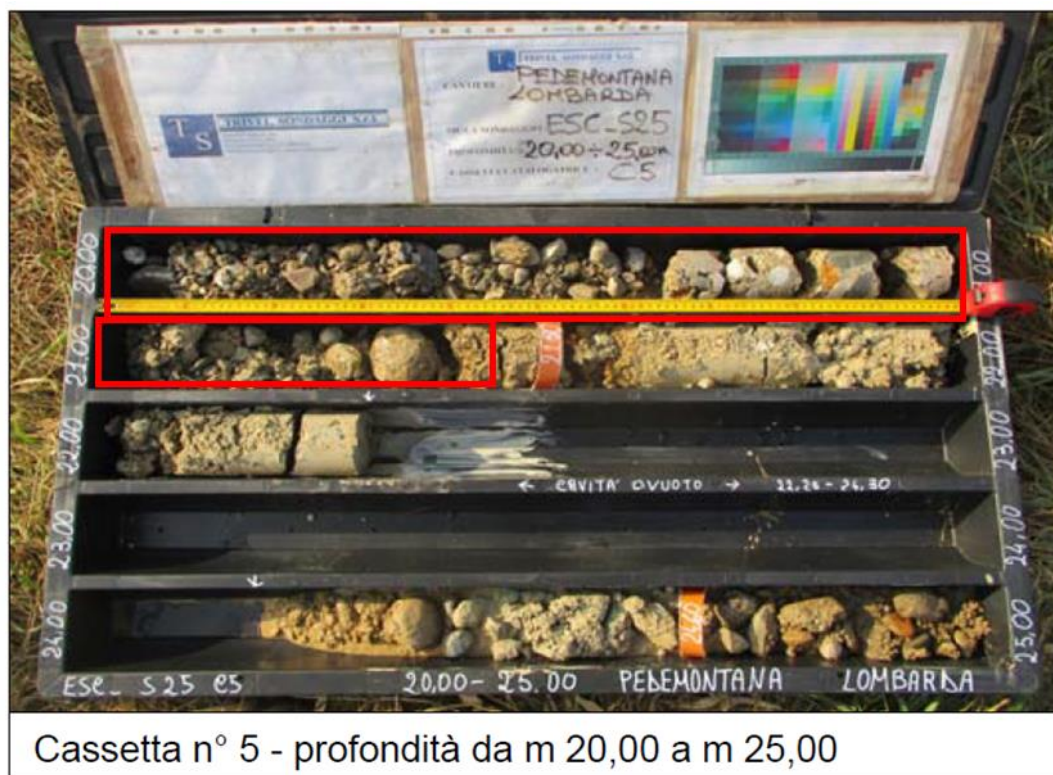


Figura 17 – sondaggio ESC_S25, presenza di una cavità (avanzamento delle aste sotto il proprio peso e recupero assente) a profondità di 22.3 m, al di sotto di livelli decimetrici di conglomerato ben cementato (evidenziato in rosso).

Lungo la tratta C, gli Occhi Pollini sono stati individuati nel corso delle indagini di PD e PE in particolare in 3 settori:

Desio, da km 2+100 a 3+100

In questo settore in cui è prevista la realizzazione della G.A. Desio, caratterizzato dalla presenza di livelli di conglomerato alterato e degradato a piccola profondità, sono state individuate 3 cavità (SC07, SC09, ESC_S09) a profondità comprese tra 6.5 e 13 m, aventi spessore medio di 4 m. Le cavità appaiono riempite, almeno parzialmente, da ghiaie e sabbie in matrice limosa estremamente sciolte ($N_{sp} < 2$). In quest'area sono state condotte indagini geofisiche mirate ad evidenziare eventuali altre cavità, in corrispondenza della G.A. Desio, che hanno evidenziato la possibile presenza di ulteriori potenziali cavità rispetto a quelle individuate dai sondaggi a carotaggio continuo.

Macherio-Biassono, da km 6+000 e 9+000

In questo settore le opere principali sono rappresentate dalle Gallerie Artificiali Macherio 2, Macherio 3, Biassono 1, TRMI10 e i cavalcavia dello svincolo di Macherio.

Questo settore, come sarà dettagliato nel documento EGTCC000GE00000RS001 – Analisi suscettibilità al fenomeno degli Occhi Pollini, è caratterizzato dalla presenza di depositi ghiaioso-sabbiosi alterati appartenenti al Sintema di Binago, sovrapposti a conglomerati alterati e degradati, localmente individuati a piccola profondità (circa 10 m da p.c.), che rappresentano la condizione geologica maggiormente suscettibile allo sviluppo dei fenomeni di piping e alla formazione di cavità sotterranee.

Nel tratto in oggetto sono state individuate 14 cavità a profondità comprese tra 3 e 28 m (con frequenza massima negli intervalli 7-10 m e 13-16 m e spessore variabile tra 0.5 e 14 m, per un valore medio di 7.2 m, evidenziando la grande rilevanza del fenomeno, sia per quanto riguarda la

diffusione, la dimensione e la profondità delle cavità identificate (figura 17). La notevole diffusione di cavità sotterranee in questo settore è testimoniata dal fatto che è stata rilevata la presenza in circa il 45% dei sondaggi eseguiti a carotaggio continuo nelle campagne di PD e PE; considerando il carattere puntuale dei sondaggi è pertanto presumibile che il numero di cavità effettivamente presenti nel sottosuolo possa essere sensibilmente maggiore di quelle accertate direttamente tramite le perforazioni.

Al di fuori dell'asse principale, ove sono concentrate la maggior parte delle indagini conoscitive, si è rilevata un'ulteriore cavità in corrispondenza della Galleria Artificiale lungo la TRMI10, all'interno di terreni con caratteristiche analoghe a quelli del settore sopra descritto (ESC_S31). La cavità è ubicata tra 10 e 11.5 m, seguita fino a 16.5 m da sabbie limoso argillose con consistenza nulla (Npst 1 colpo/45 cm) che potrebbero rappresentare il riempimento della cavità stessa.

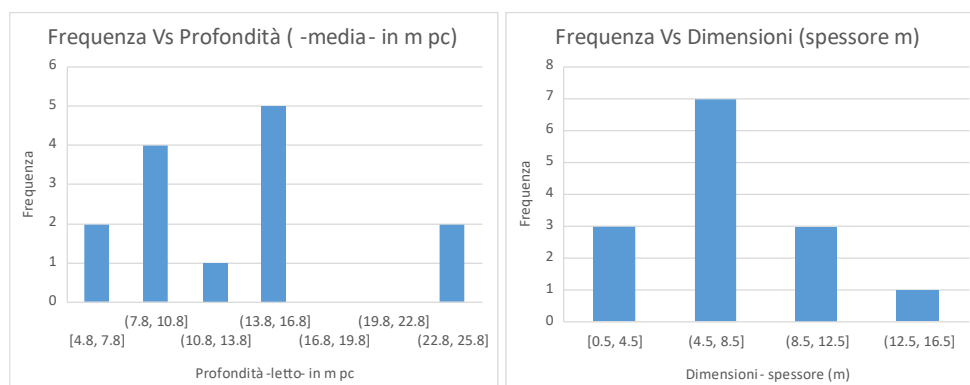


Figura 18 – classi di frequenza rispetto alla profondità media e alle dimensioni degli Occhi Pollini identificati nell'area di Macherio-Biassono dai sondaggi a carotaggio continuo

Come premesso, inoltre, in questo tratto sono stati realizzati 58 sondaggi a distruzione di nucleo con esecuzione di DAC test, con l'obiettivo di identificare evidenze della presenza di ulteriori cavità o terreni dimensionati.

A tale scopo sono state analizzate le diagrafie dei sondaggi che riportano la registrazione relativa a 5 parametri (velocità di avanzamento, pressione sull'utensile, pressione di rotazione, velocità di rotazione e pressione del fluido) tra i quali i più significativi per l'individuazione di potenziali Occhi Pollini sono la velocità di avanzamento e la pressione di spinta sull'utensile, dal momento che si è talvolta osservato come sia stata modificata la velocità di rotazione (per cambio marcia, che rende inefficace detto parametro di valutazione). Il confronto non è stato agevole anche per qualche difficoltà aggiuntiva legata alla diversa rappresentazione delle diagrafie dei raggruppamenti di imprese incaricati.

In ogni caso le diagrafie hanno restituito risultati interessanti. Sulla base dell'andamento dei parametri registrati sono infatti stati identificati gli intervalli di profondità nei quali è possibile ipotizzare la presenza di Occhi Pollini che, viste le incertezze che sussistono nell'interpretazione di dati "indiretti", sono stati suddivisi in 3 livelli di probabilità, elevata, moderata e bassa.

L'analisi dei dati ha messo in luce, su 58 perforazioni complessive, la presenza di 16 livelli ascrivibili con probabilità elevata alla presenza di Occhi Pollini e 14 livelli con probabilità moderata (Tabella 4). Complessivamente il numero di sondaggi che mostrano la presenza di livelli indicativi della possibile presenza di Occhi Pollini con probabilità da moderata a elevata sono 30, pari a circa il 50% dei sondaggi eseguiti, confermando in linea generale quanto già emerso dai sondaggi a carotaggio continuo eseguiti nella stessa area e citati in precedenza. I possibili Occhi Pollini sono stati individuati a profondità massime di 30 m (con frequenze massime tra 4 e 6 m e tra 10 e 12 m in Figura 19) ed uno spessore medio di circa 6 m, confermando anche in questo caso le indicazioni emerse dall'analisi dei sondaggi a carotaggio continuo.

Tabella 4 – possibili Occhi Pollini identificati dall'analisi dei DAC test eseguiti sui sondaggi a distruzione di nucleo

ID	Opera	da [m]	a [m]	Spessore	Probabilità
ESC_D01	G.A. MACHERIO 2	10	13	3	moderata
ESC_D02	G.A. MACHERIO 2	3	5	2	elevata
ESC_D04	G.A. MACHERIO 2	3	5	2	moderata
ESC_D08	G.A. MACHERIO 2	5	8	3	moderata
ESC_D09	G.A. MACHERIO 2	15.5	18	2.5	elevata
ESC_D11	G.A. MACHERIO 2	3.5	5	1.5	moderata
ESC_D13	G.A. MACHERIO 2	20	23	3	moderata
ESC_D15	G.A. MACHERIO 2	5	12	7	elevata
ESC_D16	G.A. MACHERIO 2	14	15	1	elevata
ESC_D18	G.A. MACHERIO 2	5	8	3	elevata
ESC_D20	G.A. MACHERIO 2	3	6	3	elevata
ESC_D21	G.A. MACHERIO 2	9	16	7	elevata
ESC_D22	G.A. MACHERIO 2	3	8	5	elevata
ESC_D23	G.A. MACHERIO 2	3	16	13	elevata
ESC_D25	G.A. MACHERIO 2	3	17	14	elevata
ESC_D26	G.A. MACHERIO 2	3	21	18	elevata
ESC_D27	G.A. MACHERIO 2	26	30	4	moderata
ESC_D28	G.A. MACHERIO 2	7	11	4	moderata
ESC_D30	G.A. MACHERIO 2	4	11	7	elevata
ESC_D31	G.A. MACHERIO 3	9	18	9	moderata
ESC_D33	G.A. MACHERIO 3	9	18	9	moderata
ESC_D35	G.A. BIASSONO 1	6	15	9	elevata
ESC_D36	G.A. BIASSONO 1	15.5	21		moderata
ESC_D37	G.A. BIASSONO 1	18.5	20	1.5	elevata
ESC_D39	G.A. BIASSONO 1	6	15	9	elevata
ESC_D41	G.A. BIASSONO 1	19	25	6	moderata
ESC_D42	G.A. BIASSONO 1	18	24	6	moderata

ESC_D43	G.A. BIASSONO 1	6	15	9	moderata
ESC_D45	G.A. BIASSONO 1	18	24	6	elevata
ESC_D51	G.A. BIASSONO 1	11	20	9	moderata

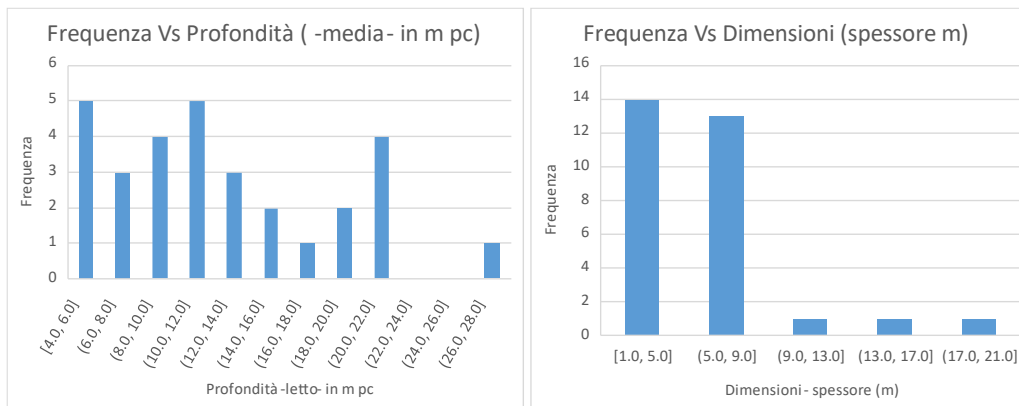


Figura 19 – classi di frequenza rispetto alla profondità media e alle dimensioni dei probabili Occhi Pollini identificati dai sondaggi a distruzione di nucleo, tramite analisi dei DAC test

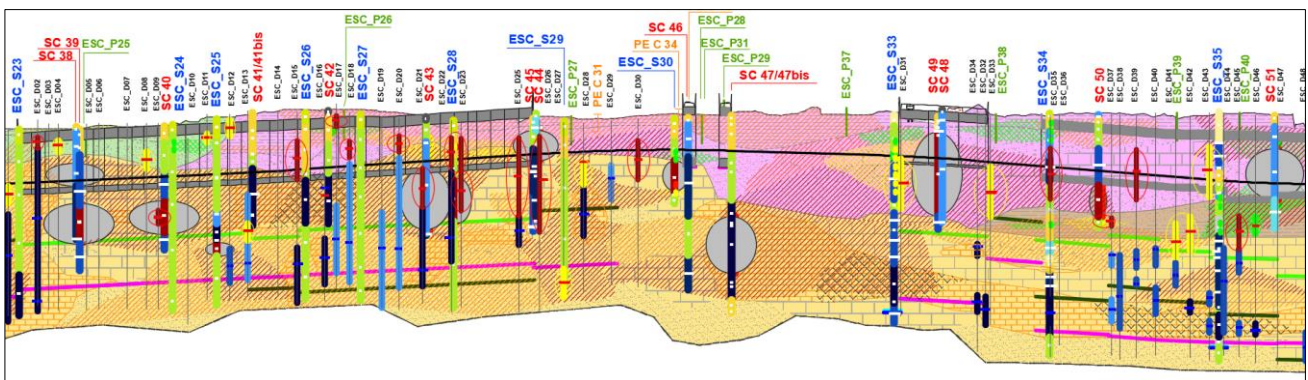


Figura 20 – stralcio del profilo geologico di progetto (elaborati EGGCA00GE00000GL001-6a) nel tratto di Macherio-Biassono; si evidenzia la grande diffusione del fenomeno degli Occhi Pollini individuati nei sondaggi a carotaggio (in grigio) e a distruzione di nucleo tramite interpretazione dei DAC test (bordo rosso senza riempimento)

Arcore - Vimercate (da km 15+250 a fine tratta)

Un'ulteriore area caratterizzata dalla presenza diffusa di cavità sotterranee è la parte finale della tratta (dal km 15+250) dove sono presenti ghiaie e sabbie molto alterate, appartenenti al sistema di Binago, sovrapposte a conglomerati alterati a piccola profondità. In questo settore gli Occhi Pollini identificati sulla base dei dati disponibili risultano nel complesso più superficiali e di dimensioni più ridotte rispetto all'area di Macherio-Biassono, la massima frequenza di rinvenimento è infatti a profondità inferiori a 10 m (Figura 21); lo spessore medio è di 2.6 m e la maggior parte delle cavità ha dimensioni inferiori a 4 m. È segnalata la sporadica presenza di possibili cavità anche a profondità maggiori (fino a 35 m) ma con dimensioni comprese tra 0.3 m e 1 m. Gli Occhi Pollini di maggiori dimensioni sono stati individuati nei sondaggi SC99 (cavità di 6.5 m parzialmente riempita di sabbia limosa con ghiaia e ciottoli sparsi) e ESC_S77 (NSpt=2 tra 5.5 e 12 m di profondità con presenza di vuoti tra 10 e 10.8 m e tra 11 e 13 m), tutte le altre cavità evidenziate presentano spessori massimi di 2 m. Anche questo settore è stato oggetto di approfondimenti tramite specifiche indagini geofisiche che in prima analisi suggeriscono la presenza di altri Occhi Pollini oltre a quelli individuati dai

sondaggi, anche se con una distribuzione spaziale apparentemente meno continua rispetto alle aree di Desio e Macherio precedentemente citate.

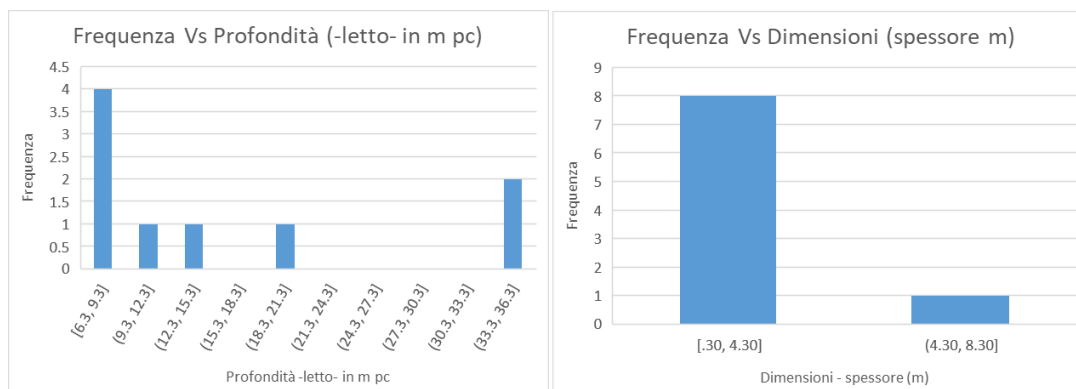


Figura 21 – classi di frequenza rispetto alla profondità media e alle dimensioni degli Occhi Pollini identificati dai nell'area di Arcore-Vimercate nei sondaggi a carotaggio continuo

In tabella 5 è riportata la sintesi del numero e della frequenza, in relazione al numero di sondaggi eseguiti, degli Occhi Pollini individuati lungo la tratta C e opere connesse tramite indagini dirette (sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo) eseguiti nelle campagne di PD e PE. Complessivamente lungo tutta la tratta C è stata rilevata la presenza Occhi Pollini nel 21% dei sondaggi eseguiti, per un numero totale di 56 cavità. Il settore dove è stata evidenziata la maggiore frequenza del fenomeno è l'area di Macherio, dove quasi il 50% dei sondaggi eseguiti (44 tra carotaggio e distruzione di nucleo) ha evidenziato la presenza di Occhi Pollini. La frequenza risulta relativamente alta anche nel settore di Desio (37,5%) dove tuttavia è presente un numero più ridotto di sondaggi. La frequenza nell'area di Vimercate appare in linea con quella dell'intera tratta (circa 21%).

Tabella 5– numero e frequenza (in relazione al numero di sondaggi totali) degli Occhi Pollini individuati lungo la tratta C e opere connesse tramite indagini dirette (sondaggi a carotaggio e a distruzione di nucleo) eseguiti in PD e PE

Settore	Sondaggi totali	Occhi Pollini	Frequenza
Zona Desio	8	3	37.5%
Zona Macherio	89	44	49.4%
Zona Vimercate	42	9	21.4%
TOTALE TRATTA C	263	56	21.3%

Facendo un confronto tra gli spessori degli Occhi Pollini individuati tramite indagini indirette e le lunghezze delle verticali dei sondaggi eseguiti (considerando solo le cavità significative, con spessore superiore a 3 metri), si osserva un'incidenza degli Occhi Pollini rispetto ai metri lineari totali di sondaggio stimata nell'ordine del 6% nel settore di Desio, del 10.5% nel settore di Macherio e dell'1.9% in quello di Vimercate. Visto il gran numero di sondaggi eseguiti, in particolare nell'area di Macherio, tale dato può essere utilizzato come una stima rappresentativa dei volumi di terreno interessato dagli Occhi Pollini nei vari settori, fino alla profondità indagata.

A supporto delle attività di ricerca e individuazione degli Occhi Pollini nel sottosuolo, sono state inoltre eseguite delle indagini geofisiche con utilizzo di tecniche sperimentali basate su sismica a riflessione ad onde di taglio generate da un vibratore (Si rimanda per approfondimenti all'elaborato EINCC000GE00000TV004 - Allegati risultati indagini geognostiche di tratta C) .Le indagini sono state eseguite nelle aree di Desio e Vimercate (rispettivamente in corrispondenza della G.A. Desio

e dello svincolo Tangenziale Est) con stendimenti di lunghezza rispettivamente di circa 1000 m e 2000 m.

L'interpretazione dei dati sismici ha evidenziato complessivamente la presenza di 43 forme e strutture potenzialmente ascrivibili a cavità/Occhi Pollini, delle quali 21 nello stendimento di Desio e 22 in quello di Vimercate. Tali strutture sono state individuate a profondità comprese tra un minimo di 5 m e un massimo di 30 m da p.c..

La tecnica a onde S utilizzata appare in prima analisi maggiormente idonea allo scopo rispetto ad altre tipologie di indagini geofisiche, che, sulla base di precedenti esperienze degli scriventi in altri cantieri briantei, difficilmente riescono a rilevare la presenza degli Occhi Pollini, per la loro stessa natura multiforme (cavità vuote, riempite, parzialmente riempite, con presenza di materiale fine o grossolano). In ogni caso si ritiene, in generale, che i dati diretti, per loro stessa natura, abbiano un grado di affidabilità maggiore rispetto alle indagini indirette, relativamente all'individuazione degli Occhi Pollini.

La stima dell'incidenza degli Occhi Pollini rispetto al volume significativo indagato basata sui risultati delle indagini geofisiche risulta infatti sensibilmente inferiore rispetto all'analoga stima basata sulle indagini dirette, con valori nell'ordine dello 0.35% nell'area di Desio e dello 0.42% in quello di Vimercate.

Sulla base di valutazioni che considerano nel complesso anche le stime basate sulle indagini dirette e le evidenze emerse da esperienze pregresse in altri cantieri della zona (in particolare il caso studio descritto in Appendice a.3), è verosimile ritenere che il volume interessato dagli occhi pollini sia compreso tra i valori succitati (in particolare tra 0.5% e 6% per Desio, tra 0.5% e 2% a Vimercate e nell'ordine massimo del 10% a Macherio. Per ulteriori dettagli si rimanda all'elaborato dedicato agli approfondimenti inerenti la mitigazione del fenomeno degli occhi pollini.

6.1.3 ANALISI DI SUSCETTIBILITA' AGLI OCCHI POLLINI

Dal momento che le evidenze emerse dalle indagini dirette sono caratterizzate da un più alto grado di affidabilità, è stata eseguita un'analisi di suscettibilità al fenomeno degli Occhi Pollini basata su di esse e descritta in un elaborato distinto al quale si rimanda (EGTCC000GE00000RS001 – Relazione analisi suscettibilità agli Occhi Pollini).

L'analisi della suscettibilità planimetrica associata al fenomeno degli Occhi Pollini elaborata in via preliminare per la tratta C, come appare dallo stralcio della tavola (elaborato EGTCC000GE00000MP001) riportato in Figura 22 evidenzia nella prima parte della tratta una suscettibilità complessivamente bassa (in verde), ad eccezione di un tratto di circa 1 Km nel territorio comunale di Desio. La restante parte della tratta mostra una suscettibilità media (in giallo) ad eccezione di brevi tratti a bassa suscettibilità e un ampio tratto nel territorio comunale di Macherio ad alta suscettibilità (in rosso) dove sono presenti terreni molto alterati appartenenti al sintema di Binago; un secondo settore, di lunghezza più ridotta, ad alta suscettibilità è presente nella parte finale del tracciato tra i comuni di Arcore e Vimercate.

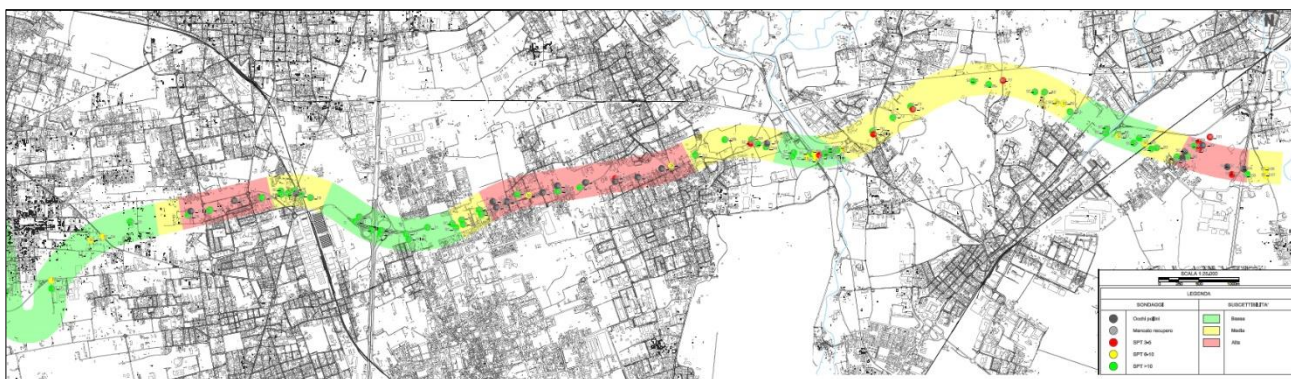


Figura 22 – mappa della suscettibilità associata al fenomeno degli Occhi Pollini lungo la tratta C (elaborato EGTCC000GE00000MP001), si evidenziano in particolare un esteso tratto ad alta suscettibilità nella zona di Macherio-Biassono; altri settori ad alta suscettibilità sono presenti a Desio e a Vimercate

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 del tracciato di progetto, indicando le distanze progressive e le opere principali per ciascun tratto.

Da km 0 a km 750

Opere principali	G.A. Cesano Maderno
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Tra km 0 e 0+250 presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati, localmente con caratteristiche geotecniche mediocri (SPT<10) tra 9 e 15 m da p.c; presenza della ex cava Girardi presso lo svincolo di Cesano (settore N-E) oggetto di caratterizzazione ambientale (discarica abusiva)
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli metrici a partire da 27 m da p.c.
Suscettibilità Occhi Pollini	Bassa
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti-
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente-
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Ghiaie e sabbie con alterazione da assente a localmente media con caratteristiche litotecniche da buone a ottime, se non nella zona della ex cava Girardi, discarica abusiva

Da km 750 a km 2000

Opere principali	C.V. Via per Cesano
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di conglomerati alterati e degradati in sabbia limoso-ghiaiosa a piccola profondità (3-4 m da p.c.) localmente con mediocri caratteristiche geotecniche fino a 8 m da p.c. tra il km 750 e 1500

Presenza di conglomerati lapidei	Presenza di livelli centimetrici di conglomerato debolmente cementato
Suscettibilità Occhi Pollini	Bassa
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Ghiaie e sabbie con alterazione da assente a localmente media con caratteristiche litotecniche da buone a ottime

Da km 2000 a km 3700

Opere principali	G.A. Desio
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati a partire da 7 m da p.c.; presenza di conglomerati fortemente alterati e degradati a partire da profondità comprese tra 4 e 12 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli metrici a partire da 17 m da p.c. tra il km 3000 e 3400
Suscettibilità Occhi Pollini	Da Media a Alta
Presenza Occhi Pollini	Presenza di 3 Occhi Pollini fino a profondità di 13.5 m da p.c. e dimensioni tra 3 e 5.5 m. tra il km 3700 e 4500 – indagine geofisica ne avrebbe evidenziati molti altri
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Ghiaie e sabbie con caratteristiche complessivamente buone, ma con ridotti spessori per presenza a piccola profondità di conglomerati alterati e degradati e locale presenza di alterazione

Da km 3700 a km 4500

Opere principali	G.A. F.S. Milano-Chiasso/C.V. Svincolo Desio 1/ Ponte Canale Coll. Alto Lambro
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Locale presenza di terreni alterati con mediocri caratteristiche geotecniche fino a 2-3 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Non rinvenuti fino alla profondità massima di indagine (37 m)
Suscettibilità Occhi Pollini	Bassa
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Ghiaie e sabbie con alterazione da assente a localmente media con caratteristiche litotecniche da ottime a buone (presenza possibile di un rilevante paleoalveo)

Da km 4500 a km 6100

Opere principali	Svincolo di Desio/ G.A. Macherio 1
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Terreni ghiaioso-sabbiosi alterati nei primi 2-3 m da p.c.; terreni di riporto con spessore fino a 7 m km 4500-5000 e tra km 5500-5700
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli metrici di conglomerato lapideo localmente alterato a partire da 9 m da p.c. (possibile interferenza con scavo) tra km 5000-5200 e 5750-5950 e a profondità di circa 20 m tra km 4500 e 5000 e km 5500-5700, estesi localmente fino ad almeno 35 m da p.c.

Suscettibilità Occhi Pollini	Da Bassa a Media
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Da discrete a buone, localmente sono presenti livelli di alterazione superficiale limoso-sabbiosi fino a 4 m in particolare nella parte finale del settore in oggetto

Da km 6100 a km 7400

Opere principali	G.A. Macherio 2
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati localmente fino a 5-7 m da p.c.; conglomerati fortemente alterati e degradati in ghiaia e sabbia limoso-ghiaiosa localmente fino a 35 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	livelli metrici di conglomerato lapideo alterato e vacuolare a partire da 9 m da p.c. da km 6500 a 6900, in configurazione estremamente variabile (organi geologici)
Suscettibilità Occhi Pollini	Alta
Presenza Occhi Pollini	Diffusa Presenza di Occhi Pollini fino a profondità di circa 24 m da p.c. con dimensioni fino a 7 m; ca. il 50% dei sondaggi intercetta una cavità
Dissesti idrogeologici	Assente
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Mediocri, per abbondante presenza di matrice fine, alterazione dei clasti da media ad elevata, e spessori localmente rilevanti dei livelli limoso-sabbiosi superficiali

Da km 7400 a km 8950

Opere principali	Svincolo Macherio, G.A. Macherio 3, G.A. Biassono 1
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni ghiaioso-sabbioso alterati fino a 15-20 m da p.c. e localmente con mediocri caratteristiche geotecniche (NSPT<10) fino a profondità di 7-10 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli plurimetrici di conglomerato lapideo localmente alterato e vacuolare a partire da 15-20 m tra i km 7400-7600 e da circa 30 m tra i km 7900 e 8950
Suscettibilità Occhi Pollini	Alta
Presenza Occhi Pollini	Diffusa presenza di Occhi Pollini a profondità comprese tra un minimo di 3 m da p.c. e un massimo di 28 m da p.c. con dimensioni massime fino a 14 m
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Possibili falde sospese dal km 7900 a 8950 e possibile interferenza della falda principale di progetto (9-2014) con le fondazioni delle opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Mediocri, per abbondante presenza di matrice fine, alterazione dei clasti da media ad elevata, e spessori localmente rilevanti dei livelli limoso-sabbiosi superficiali

Da km 8950 a km 9600

Opere principali	G.A. Biassono 2
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni limoso-sabbiosi alterati e con mediocri caratteristiche geotecniche fino a profondità di 20 m da p.c
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli plurimetrici di conglomerati lapidei localmente alterati e vacuolari a partire da 23-30 m da p.c.
Suscettibilità Occhi Pollini	Media

Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Possibili fenomeni di ristagno idrico superficiale, possibili fenomeni di erosione concentrata in corrispondenza del Rio S. Cassiano (km 9300)
Idrogeologia/falda	Possibile locale presenza di falde acquifere sospese; nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Scadenti per presenza di terreni limoso-sabbiosi fortemente alterati fino alla profondità di oltre 20 m da p.c.

Da km 9600 a km 10250

Opere principali	G.A. F.S. Monza-Molteno
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni limoso-sabbiosi con mediocri caratteristiche geotecniche fino a 2-3 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli metrici di conglomerato lapideo localmente alterato e vacuolare a partire da circa 7-10 m da p.c. localmente alternati a livelli limoso-argillosi
Suscettibilità Occhi Pollini	Media
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Vicinanza della falda di progetto (9-2014) alla galleria; interferenza della stessa falda con i diaframmi lungo trincea
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Da mediocri per presenza di abbondante frazione fine, grado di alterazione medio-alto dei clasti e livelli limoso-sabbiosi superficiali con spessore superiore a 2-3 m, a localmente discrete (km 10000)

Da km 10250 a km 10650

Opere principali	Ponte Fiume Lambro
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di livelli superficiali limoso-sabbiosi scarsamente addensati fino a circa 3 m da p.c.; locale presenza di materiali di riporto scarsamente addensati con spessore fino a 9 m in sponda destra del F. Lambro; presenza di Livelli plurimetrici di limi e argille localmente torbosi alternati a sabbie limose a partire da 21-26 m da p.c. fino almeno a 40 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Presenza di livelli metrici di conglomerato lapideo localmente alterato e vacuolare a piccola profondità (6-7 m da p.c. in prossimità della sponda dx del Lambro e 10 m in sponda sx) e a partire da circa 30 m in corrispondenza dell'incisione valliva del Lambro
Suscettibilità Occhi Pollini	Bassa
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Presenza di aree soggette a erosione spondale lungo l'alveo del fiume Lambro in destra idrografica
Idrogeologia/falda	Falda a piccola profondità (<3/5 m da p.c.) in corrispondenza del Lambro, interferente con le fondazioni delle opere
Rischio Idraulico	Rischio idraulico connesso a possibili esondazioni del Lambro, in particolare in sinistra idrografica
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Complessivamente buone o discrete, locale presenza di livelli limoso-argillosi con spessore metrico superficiali o intercalate nei depositi ghiaioso-sabbiosi

Da km 10650 a km 11050

Opere principali	G.A. Lesmo 1
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati fino a circa 5 m, e tra 5 e 18 m di estesi banchi limoso sabbiosi-ghiaiosi alterati
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli poco continui di conglomerato o livelli cementati a partire circa 10-15 m da p.c.
Suscettibilità Occhi Pollini	Media
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di 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	Possibili falde sospese e interferenza della falda principale con le fondazioni delle opere
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Complessivamente mediocri per presenza di abbondante frazione fine, grado di alterazione medio-alto dei clasti e livelli limoso-sabbiosi superficiali con spessore superiore a 2-3 m

Da km 11050 a km 14000

Opere principali	G.A. Lesmo 2/G.A. Arcore 0/G.A. Arcore 1/G.A. Arcore 2/G.A. Arcore 3
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni limoso-sabbiosi e ghiaioso-sabbiosi molto alterati, con scadenti caratteristiche geotecniche fino a profondità massima di 22-25 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Locale presenza di livelli metrici di conglomerato lapideo, localmente alterato e vacuolare a partire da 28 m da p.c. (G.A. Lesmo 2) e da 15-18 m (G.A. Arcore 0,1,2,3)
Suscettibilità Occhi Pollini	Media
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Presenza di aree con terreni a granulometria fine su pendii acclivi soggette a possibili fenomeni di instabilità (soil slip) / presenza di aree con possibile ristagno idrico superficiale / possibili fenomeni di erosione accelerata in alveo nel reticolo idrico minore/attraversamento di diverse vallecicole suscettibili al dissesto
Idrogeologia/falda	Generalizzata e potenziale presenza locale di falde sospese; probabile interferenza della falda con le fondazioni delle g.a. Lesmo 2 e Arcore 3
Rischio Idraulico	Rischio idraulico da medio a molto elevato in corrispondenza degli impluvi del reticolo idrico minore
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Complessivamente scadenti per presenza di terreni limoso-sabbiosi fortemente alterati fino alla profondità di oltre 20 m da p.c.

Da km 14000 a km 15250

Opere principali	Ponte Canale Rio Molgorana / G.A. F.S. Milano-Carnate
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di sabbie limoso-ghiaiose alterate con mediocri caratteristiche geotecniche (unità del Bozzente) a partire da 4-10 m da p.c. tra il km 14000 e 14500; presenza di materiali di riporto scarsamente addensati con spessore fino a 12 m tra il km 14500 e 15050 (area di ex cava ritombata parzialmente con materiale alloctono)
Presenza di conglomerati lapidei	Presenza di livelli di conglomerato lapideo alterato a partire da 11-15 m di profondità
Suscettibilità Occhi Pollini	Bassa
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti, se non presso le scarpate dell'ex area di cava
Idrogeologia/falda	Possibile presenza di falde sospese fino al km 14800 e probabile interferenza della falda (9-2014) con le fondazioni delle opere e, potenzialmente, anche con lo scavo della trincea (la falda 2023 parrebbe ben più bassa dello scavo, ma non delle fondazioni)

Rischio Idraulico	Rischio idraulico elevato in corrispondenza del rio Molgorana
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Da buone a localmente ottime tra km 14+050-14+200 e 15+100 e 15+300; presenza di terreni di riporto di origine antropica tra 14+500 e 15+100 (ex cava ritombata)

Da km 15250 a km 16600

Opere principali	G.A. Tangenziale Est; cavalcavia dell'interconnessione Tangenziale Est
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni limoso-sabbiosi o sabbioso-ghiaiosi molto alterati, localmente mediocri caratteristiche geotecniche fino a 8-12 m da p.c.
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli di metrici di conglomerato lapideo a partire da circa 10 m da p.c. localmente alternati a livelli limoso-argillosi
Suscettibilità Occhi Pollini	Da Media a Alta
Presenza Occhi Pollini	Presenza di diversi Occhi Pollini a profondità variabile tra 3 e 13.5 m da p.c. con dimensioni medie di 2.6 m; sporadica presenza di Occhi Pollini tra 20 e 35 m di profondità e dimensioni comprese tra 0.3 e 1 m; le indagini geofisiche hanno confermato l'esistenza di cavità aggiuntive
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Probabile interferenza della falda con le fondazioni delle opere (2023); interferenza delle fondazioni con quella di progetto
Rischio Idraulico	Rischio idraulico legato ai torrenti Molgora e Molgoretta
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Complessivamente mediocri per presenza di ghiaie e sabbie con grado di alterazione alto e abbondante presenza di frazione fine

TRMI10

Opere principali	G.A. TRMI10
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Presenza di terreni ghiaioso-sabbiosi alterati localmente fino a 5-7 m da p.c.; conglomerati fortemente alterati e degradati in ghiaia e sabbia limoso-ghiaiosa localmente fino a 35 m da p.c. nel settore più a nord presso l'asse principale
Presenza di conglomerati lapidei	Livelli di metrici di conglomerato lapideo a partire da circa 15 m da p.c. presso l'asse principale; non rilevati fino a 28 m presso la G.A. TRMI10
Suscettibilità Occhi Pollini	Alta
Presenza Occhi Pollini	Presenza di Occhi Pollini di dimensioni metriche tra 9 e 28 m d p.c
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Interferenza tra falda e opere non attesa presso la galleria artificiale né altrove
Rischio Idraulico	Assente
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Complessivamente mediocri/scadenti per presenza di ghiaie e sabbie con grado di alterazione alto e abbondante presenza di frazione fine

TRMI17

Opere principali	Tracciato interamente a p.c. o in rilevato
Litologia/caratteristiche geotecniche dei terreni	Terreni ghiaioso-sabbiosi da poco a mediamente alterati fino a 7 m di profondità (unità di Besnate) nel settore Nord; terreni ghiaioso-sabbiosi con maggiore grado di alterazione e frazione fine a Sud (unità di Binago)
Presenza di conglomerati lapidei	non rilevante
Suscettibilità Occhi Pollini	Da media ad alta
Presenza Occhi Pollini	Non rilevati da indagini di PD e PE
Dissesti idrogeologici	Assenti
Idrogeologia/falda	Nessuna interferenza tra falda e opere
Rischio Idraulico	-
Caratteristiche litotecniche terre di scavo	Tracciato interamente in rilevato

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 Cesano Maderno
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Desio
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Lissone
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Macherio
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Biassono
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Lesmo
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Arcore
- Componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio – Comune di Usmate-Velate
- 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 23 - 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 24 - 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 25 – 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 26 – 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 giustappongono zone con il conglomerato totalmente alterato.



Figura 27 - 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 28 - 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 29 – cavità nel Ceppo (Trezzo sull'Adda), che evidenzia forme di carsismo evidente (fonte: ing Cesareo Lorenzo)



Figura 30 – cavità nel Ceppo vacuolare (Trezzo sull'Adda - fonte: ing Cesareo Lorenzo)



Figura 31 – 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).

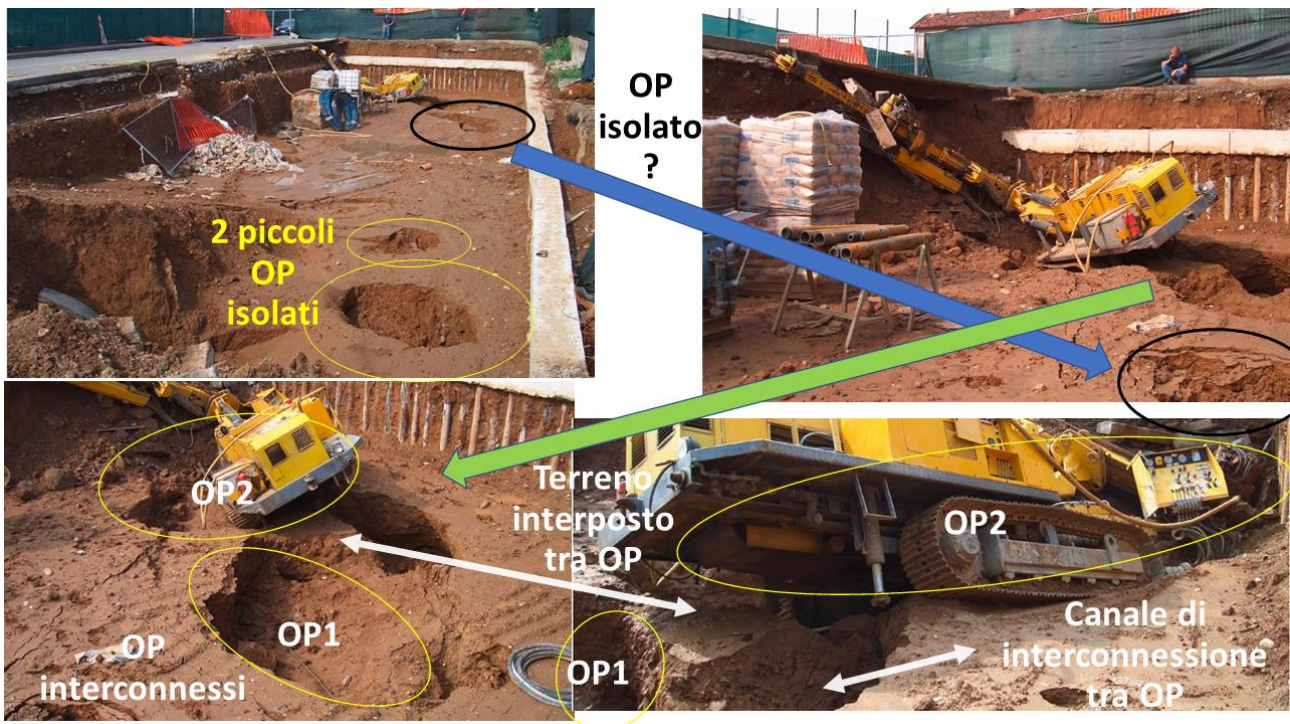


Figura 32 – gli Occhi Pollini possono essere tra loro interconnessi, creando reticoli vuoti o dalle scadenti proprietà meccaniche anche molto estesi, per decine di metri (foto: dott. Fabio Baio)

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)

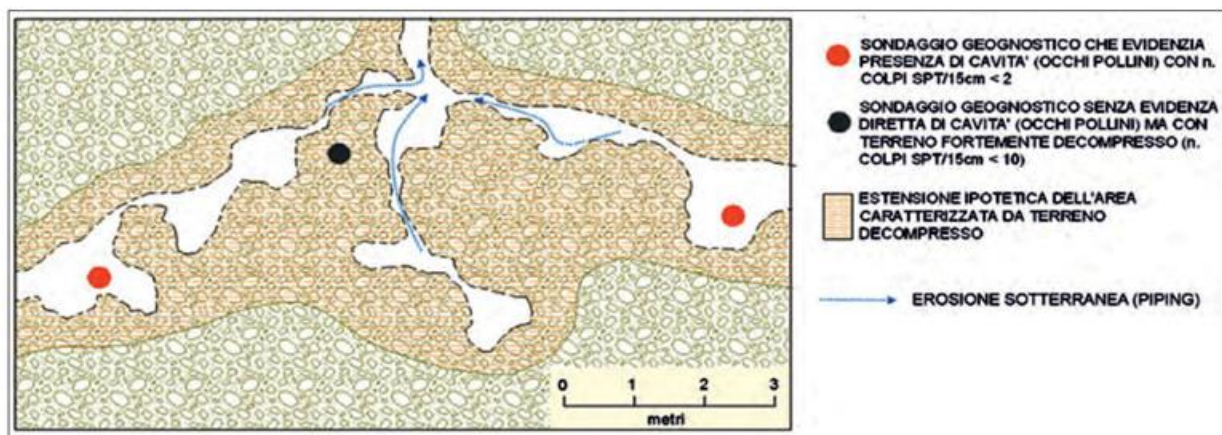


Figura 33 - Occhi Pollini identificati tramite prove penetrometriche in foro e fascia di decompressione. Da Lorenzo et al. 2015.

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.

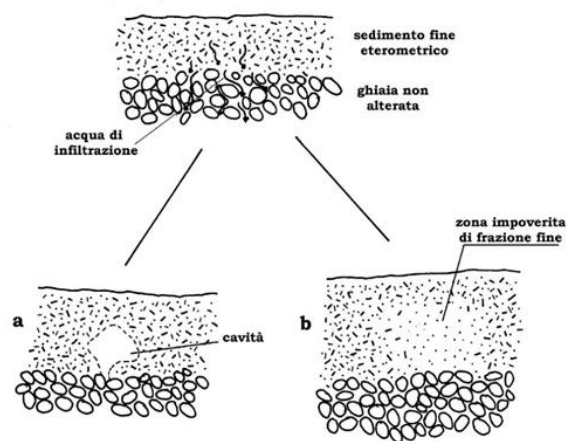


Figura 34 - Effetto dell'asportazione della frazione più fine in una successione data da ghiaie e, superiormente un materiale più fine. Nelle giuste condizioni il materiale fine viene trasportato all'interno delle ghiaie; nello strato superiore si possono avere due casi; o si forma una cavità vera propria 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 CAVITÀ 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.

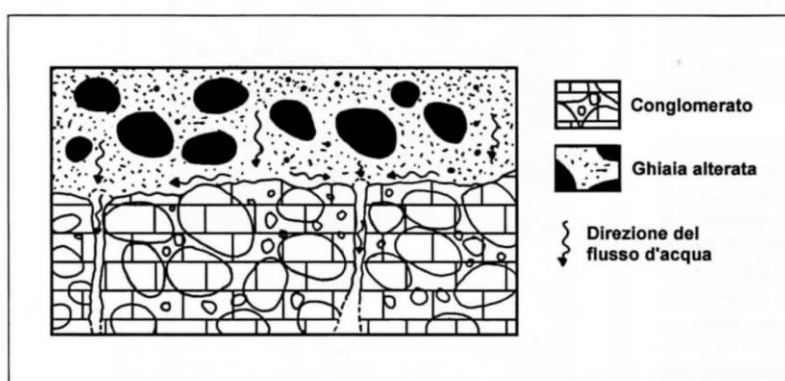


Figura 35 - Effetto della presenza delle fratture in un conglomerato sovrastato da ghiaia alterata (o altro sedimento leggermente coesivo). Al contatto con il conglomerato, l'acqua di filtrazione si dirige verso le fratture, rimaste aperte perchè il materiale sovrastante è coesivo. In quel punto può 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.

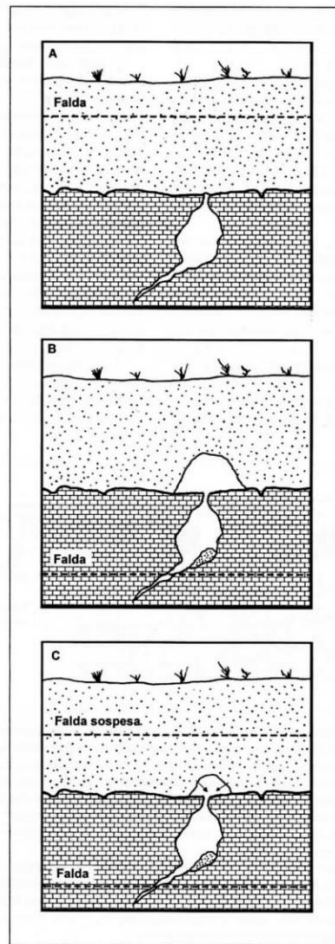


Figura 36 - Possibile genesi di una cavità a contatto con il conglomerato, dovuta ad abbassamento della falda. La spiegazione è nel testo. Da Strini, 2004.

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.

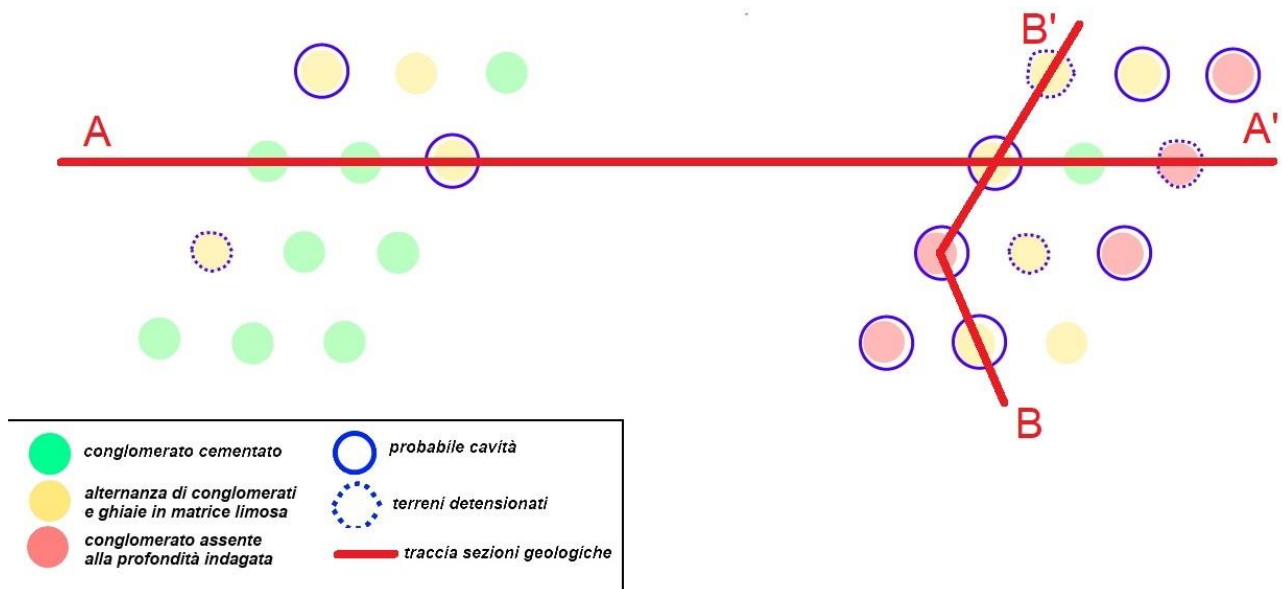
Non va neanche sottovalutato l'eventuale impatto durante la costruzione; è stato riportato oralmente che, a seguito di forti precipitazioni, si siano avuti allagamenti in scavi (specie se il sedimento è alterato e quindi tendenzialmente impermeabile) che sono evoluti nell'apertura di Occhi Pollini. Queste 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.

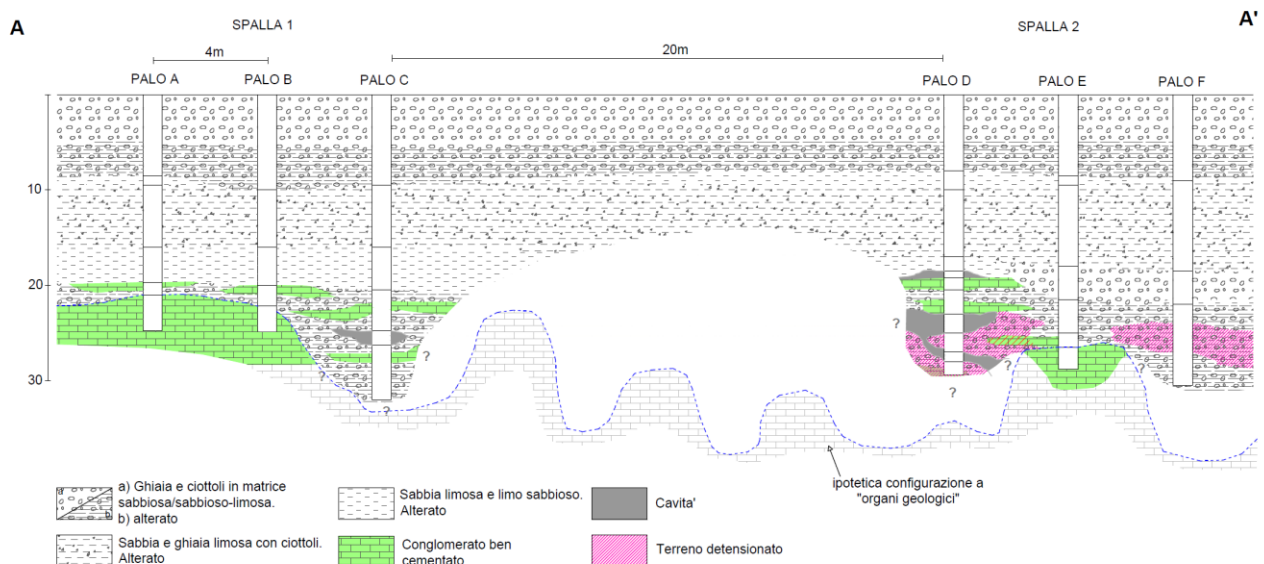
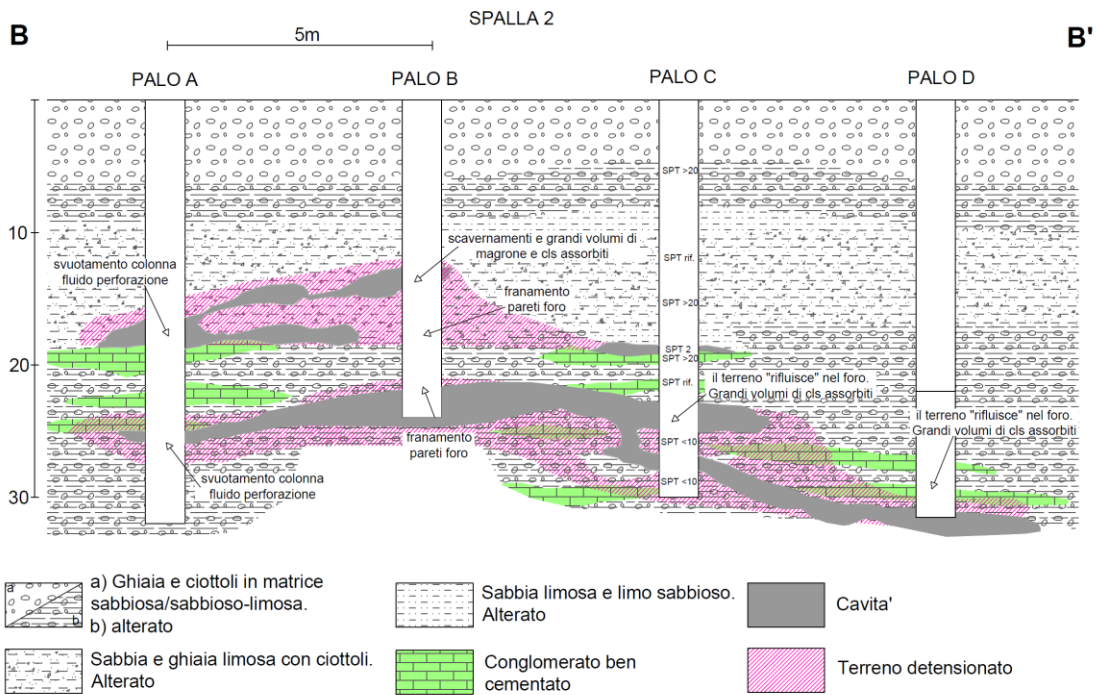
È ovvio che tutti questi fattori non hanno sempre lo stesso effetto ma dipendono sia dall'entità (carichi più o meno elevati, immissione più o meno concentrata e rapida etc) sia dalla condizione locale e quindi non sono modellabili a priori.

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%	