

COMUNE DI LOVERE
(Provincia di Bergamo)

PROGETTO ESECUTIVO

INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO IN LOCALITA' TRELLO

TAV.

02

ELABORATO

**RELAZIONE
GEOLOGICA**

SCALA

aggiornato da:

in data:

SETTEMBRE 2006

Prof. Ing. BALDASSARE BACCHI

Dott. Ing. SERGIO TACCOLINI

Prof. Geol. ALBERTO CLERICI

Dott. Geol. GILBERTO ZAINA

1	Premessa	2
2	Ubicazione ed inquadramento geologico geomorfologico.....	5
2.1	<i>Inquadramento geologico e geomorfologico.....</i>	5
2.2	<i>Descrizione di dettaglio dell'area Trello.....</i>	7
3	I fenomeni di dissesto	9
4	Indagini geognostiche	10
4.1	<i>Indagini meccaniche</i>	11
➤	Sondaggi geognostici a carotaggio continuo.....	11
➤	Sondaggi a distruzione di nucleo.....	14
4.2	<i>Prove penetrometriche</i>	16
4.3	<i>Indagini geofisiche.....</i>	19
➤	Tomografie elettriche	20
➤	Sismica a rifrazione.....	24
➤	Down-Hole.....	26
➤	Microtremori sismici.....	27
4.4	<i>Indagini di laboratorio geotecnico</i>	30
➤	Terreni.....	30
➤	Rocce.....	31
5	Aspetti geologico stratigrafici di dettaglio	33
5.1	<i>Sintesi</i>	33
➤	Il substrato roccioso	33
➤	I depositi superficiali	34
5.2	<i>Carta delle quote assolute del tetto del substrato roccioso.....</i>	35
5.3	<i>Aspetti idrogeologici</i>	36

6	La campagna di monitoraggio.....	38
7	Conclusioni	40
7.1	<i>Quadro delle problematiche</i>	<i>40</i>
7.2	<i>Caratterizzazione sismica</i>	<i>41</i>
7.3	<i>Aspetti idrogeologici ed idrochimici</i>	<i>41</i>

1 Premessa

Alcune aree del territorio comunale di Lovere (Provincia di Bergamo) sono da tempo interessate da fenomeni di dissesto che hanno dato luogo a lesioni nelle strutture rigide e negli edifici, improvvisi sprofondamenti di tratti della rete stradale e di aree limitrofe agli edifici esistenti, compromissione dei sottoservizi.

I fenomeni osservati, come desunto dalle indagini geologiche finora svolte, sono da collegare a processi di dissoluzione carsica, a cedimenti dei terreni di fondazione degli edifici ed a circolazione idrica sepolta.

La porzione di territorio antropizzato è stato suddiviso in settori ritenuti omogenei per densità, grado di attività e distribuzione delle lesioni, che corrispondono a:

- AREA TRELLO: comprende il settore sud ovest del territorio urbanizzato. L'ambito è caratterizzato da una densità da media ad elevata della diffusione dei fenomeni, da un elevato grado di attività (comparsa di nuove lesioni e sprofondamenti, progressivo estendersi delle lesioni esistenti). Il progredire dei fenomeni ha indotto conseguenze negative sulle condizioni di stabilità degli edifici e dei sottoservizi;
- AREA CORNASOLA: è soggetta a fenomeni geologici di maggior entità ma evoluzione lenta, con accelerazioni in parte legate alla esecuzione di interventi sul territorio;
- AREA A LAGO: qui i fenomeni sono più localizzati e la loro evoluzione è direttamente connessa ai processi idrogeologici in atto nell'area di Trello.

La presente relazione costituisce parte integrante del *progetto esecutivo* INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO IN LOCALITÀ TRELLO ed è volta alla caratterizzazione geologica degli ambiti, alla descrizione delle indagini condotte ed alla descrizione delle cause dei fenomeni in atto.

La relazione è stata redatta, in accordo con la normativa esistente, attenendosi ai risultati delle indagini condotte nell'Area Trello nel periodo 2005-2006, la cui ubicazione è illustrata nella Tavola 1 del progetto, e costituite da:

- indagini meccaniche: sondaggi a carotaggio continuo, sondaggi a distruzione di nucleo, prove penetrometriche;
- indagini geofisiche: tomografie sismiche, tomografie elettriche, prove down-hole in alcuni fori di sondaggio, microtremori sismici;
- campagne di monitoraggio alla rete piezometrica (anno 2005);
- campagna di monitoraggio alle lesioni (anno 2005);
- analisi di laboratorio idrochimico (su campioni di acqua);
- analisi di laboratorio geotecnico (su campioni di terreno e roccia).

La documentazione completa relativa alle campagne geognostiche è depositata presso l'ufficio tecnico comunale di Lovere; nel dossier indagini in allegato alla documentazione di progetto si riporta la documentazione relativa alla sola area d'intervento comprensiva di:

- stratigrafie sondaggi meccanici
- diagrammi delle prove penetrometriche
- sezioni tomografiche
- sezioni sismiche e down – hole
- sezioni sismiche da indagini con microtremori
- risultati prove di laboratorio geotecnico su campioni di terreno
- risultati prove di laboratorio geotecnico su campioni di roccia

A fine testo della presente sono riportati i seguenti elaborati, desunti dall'analisi delle informazioni raccolte nella fase d'indagine:

- Carta del tetto del substrato e delle isopache dei terreni di copertura
- Carta delle isopiezometriche e delle linee di flusso
- Carta della distribuzione dei dissesti

Durante l'anno 2005 nelle aree del territorio comunale dove si sono registrati i fenomeni di dissesto è stata condotta una campagna di monitoraggio alla strumentazione installata costituita da:

- piezometri (posizionati all'interno dei fori di sondaggio);
- estensimetri (posizionati in corrispondenza di alcune lesioni su edifici);
- mire topografiche.

Nei paragrafi successivi sono riportati in forma sintetica i risultati della campagna di monitoraggio condotta.

2 Ubicazione ed inquadramento geologico geomorfologico

Il COMUNE di LOVERE (Provincia di Bergamo) è situato lungo il tratto superiore della sponda occidentale del Lago d'Iseo, poco a valle della foce a lago del Fiume Oglio. Il territorio comunale è delimitato a sud ovest dal tratto inferiore della Val Borlezza, dalla sponda lacustre a sud est, dalla Val Rescudio a nord est; verso nord ovest si estende sino ai Monti di Lovere dove, lungo il crinale che insiste sulla Val Supine (situata nel Comune di Costa Volpino), si raggiunge la quota massima del territorio comunale, di poco superiore a 1400 metri s.l.m.

L'intero territorio è compreso nelle Sezioni *D4a5 "Costa Volpino"* e *D4a4 "Lovere"* della Cartografia Tecnica Regionale della Lombardia.

L'urbanizzazione del territorio comunale, che ha un'estensione di 5.5 km², è concentrata nel settore di versante direttamente insistente sul Bacino Sebino.

Viene intesa come AREA TRELLO la porzione di territorio comunale di Lovere che si estende dal tratto di versante a monte di Via IV Novembre (a quota 250 m s.l.m. circa) sino al settore immediatamente a valle di Via Papa Giovanni XXIII (a quota 215 m s.l.m.) in cui è collocata la Palestra di proprietà della Provincia di Bergamo. L'area Trello è delimitata a sudovest dal tratto iniziale di Via Ex Tranvia ed a nord raggiunge le aree lungo la direttrice definita dalla Scalinata Adamello.

2.1 Inquadramento geologico e geomorfologico

Lungo la porzione inferiore del tratto di versante destro del Bacino del Sebino a monte dell'abitato di Lovere affiorano litotipi appartenenti alle *Formazioni del Ladinico Superiore* (Dolomia Principale) e del *Carnico* (Formazione di Castro).

Nella porzione inferiore del versante è presente la Formazione di San Giovanni Bianco che presenta al suo interno una lente di evaporiti (costituita da gessi e anidriti intercalati a sottili livelli di marne): la lente immerge a SSW con inclinazione subverticale nelle aree della ex cava, ed E nel settore di Trello e Cornasola. Il contatto con le unità carbonatiche superiori è tettonico: la faglia segue la lente evaporitica e scompare sotto i depositi di copertura.

La zona centrale del territorio di Lovere è infatti compresa fra le due lineamenti tettonici: lungo il versante a monte dell'abitato decorre un sovrascorrimento con giacitura suborizzontale che si sviluppa nelle unità dolomitiche e nelle brecce; un secondo lineamento definisce il contatto delle unità evaporitiche con le sovrastanti unità calcareo dolomitiche.

L'unità evaporitica si sviluppa nel settore centrale dell'abitato di Lovere, raggiunge le aree di Trello e prosegue sino nella fascia a lago (con una giacitura che si correla all'assetto

stratigrafico delle aree a monte) attraversando la base del versante all'altezza dell'area di Cornasola; la lente gessosa si estende nelle aree lacuali formando un plateau a quote di alcune decine di metri inferiori a quelle del livello lacustre.

Al contatto del tetto delle unità evaporitiche sono presenti le litologie appartenenti alla *Formazione di Castro*, costituita da brecce carbonatiche intraformazionali a clasti centimetrici calcarei e calcareo dolomitici; localmente contengono facies pedogenizzate con cemento calcareo e matrice calcareo marnosa giallastra o rossiccia. La formazione si presenta frequentemente tettonizzata. Le rocce appartenenti alla Formazione di Castro affiorano lungo tutta la fascia sommitale del versante sovrastante l'abitato di Lovere.

In questa zona le formazioni sono interessate da pieghe e faglie minori da collegare al sistema principale ed alla interferenza del sistema tettonico della Valle Borlezza: i movimenti indotti dall'evoluzione tettonica del territorio hanno determinato l'insorgere di fenomeni di milonizzazione e mineralizzazione lungo i livelli marnosi compresi nelle unità evaporitiche, dando origine ad orizzonti costituiti da litologie scistose - come evidenziato dai sondaggi meccanici - con mineralizzazioni a solfuri (pirite e sfalerite).

All'esterno dell'area Trello (lungo il versante di Cornasola che insiste direttamente sulla sponda lacustre e sul terrazzo morfologico a monte dell'abitato di Lovere - centro storico) sono presenti depositi conglomeratici noti in letteratura con il nome di "*Conglomerato di Poltragno*". Tali depositi, collegabili ad una fase deposizionale interglaciale, sono costituiti da letti di ciottoli e ghiaia a supporto clastico con sabbia e rari blocchi, da mediamente a fortemente cementati.

Nella zona di Lovere, i conglomerati affiorano lungo i versanti della Val Borlezza, nella zona di versante prospiciente il Lago posta a Nord - Est del conoide alluvionale della Val Borlezza (zona di Cornasola, Villaggio Colombera); un lembo di tali depositi si estende nel settore meridionale dell'area Trello.

Tali depositi nelle aree in esame poggiano direttamente sulle unità evaporitiche; in relazione alle proprie caratteristiche meccaniche nel complesso conglomeratico si sono sviluppati fenomeni di *espandimento laterale* (le unità del Conglomerato tendono a muoversi con una componente orizzontale prevalente per effetto della presenza di rocce a comportamento meccanico scadente - o in progressivo decadimento - presenti alla base); nelle aree lungo i versanti a maggior acclività (Cornasola) i movimenti presentano una evidente componente traslativa. Tale situazione ha determinato (e determina) l'insorgere di movimenti di porzioni di conglomerato in direzione della sponda lacustre, con conseguente formazione all'interno dell'unità di numerose aperture conosciute nel territorio di Lovere con il nome di "lache".

Nell'area Trello le unità evaporitiche sono mascherate da un'estesa coltre detritica e dai conglomerati glaciali consolidati.

2.2 Descrizione di dettaglio dell'area Trello

Il territorio di Trello comprende il piccolo bacino a quote comprese fra 222 e 230 m s.l.m., sospeso rispetto alle aree che insistono direttamente a lago, lungo il quale decorre il condotto interrato che drena le acque della sorgente Biff: il condotto segue il tracciato delle strade esistenti, in accordo con le originali direttrici del corso d'acqua superficiale, per poi gettarsi a valle lungo il tracciato definito dalla Scalinata Adamello.

Il bacino è modellato ad anfiteatro, i cui versanti sono le aree a monte di Via Ex Tranvia, mentre le aree depresse sono comprese fra la stessa via ed il Condominio Trello. Le porzioni in rilievo che costituiscono i settori a sud dell'anfiteatro, comprese fra il Condominio Trello e Via Ex Tranvia, costituiscono le propaggini nord ovest dell'area di Cornasola.

Il tratto di Via Papa Giovanni XXIII immediatamente a monte della Palestra definisce l'orlo del gradino di bacino sospeso mentre la palestra è impostata lungo la porzione superiore della scarpata che raccorda il bacino con le aree che degradano regolarmente sino a lago, raggiungendo quota 187.5 m s.l.m. Il limite inferiore della scarpata corrisponde ai settori immediatamente ad ovest del tratto rettilineo di Via Dante compreso fra l'intersezione della scalinata Adamello e la curva est della strada stessa, a quota 204 m s.l.m.

Dal punto di vista strettamente geologico l'anfiteatro di Trello è impostato nei depositi glaciali costituiti dai conglomerati cementati della Formazione di Poltragno, poggianti su litologie evaporitiche della Formazione del San Giovanni Bianco.

I conglomerati sono affioranti nelle aree a sud ovest del settore e costituiscono le aree in rilievo dell'anfiteatro; le unità evaporitiche, costituite da gessi e anidriti, non affiorano nel territorio. Le aree depresse dell'anfiteatro sono occupate da depositi sciolti costituiti da terreni a granulometria medio fine e torba, organizzati in lenti.

L'anfiteatro di Trello costituisce la manifestazione superficiale di una dolina aperta, impostata nelle unità evaporitiche, la cui formazione è da collegare ad un complesso sistema tettonico sepolto annesso alla faglia impostata al contatto delle unità evaporitiche.

Dal punto di vista idrografico sono da sottolineare i seguenti elementi significativi:

- la sorgente Biff, captata con un bottino interrato a quota 235 m s.l.m, nel settore sud ovest;
- il condotto interrato che drena le acque della sorgente sino ai settori a lago.

La sorgente in tempi precedenti all'urbanizzazione delle aree di Trello (1900-1950) alimentava un piccolo corso d'acqua superficiale che divagando nelle aree della dolina originava fenomeni

di ristagno superficiale; le acque dopo aver divagato in superficie nel piccolo terrazzo sospeso di Trello, defluivano a lago. Successivamente il corso d'acqua è stato intubato, le acque della sorgente inserite nell'acquedotto comunale; a seguito di controlli sul contenuto salino, le acque della sorgente sono state eliminate dall'acquedotto e portate (con una tubazione metallica!!) ad alimentare le piscine comunali.

Le unità rocciose carbonatiche lungo il versante a monte dell'abitato di Lovere costituiscono un acquifero carsico, alimentato da infiltrazione superficiale nelle aree in quota (altopiano di Bossico).

Le unità evaporitiche sono sede di un acquifero intensamente mineralizzato a solfati e solfuri, alimentato da infiltrazioni profonde ed interne al versante.

La miscelazione delle acque che avviene nella porzione superiore dell'acquifero mineralizzato e che è legata all'assetto idrogeologico locale, determina una diluizione parziale delle concentrazioni di sali; le acque derivanti dalla miscelazione dei due apporti possono essere considerate, per semplicità, come l'acquifero che alimenta la sorgente Biff e la falda presente nei depositi superficiali.

Le acque del solo acquifero mineralizzato sembrano affluire nelle porzioni inferiori dei depositi ed alimentano gli afflussi idrici che saturano i depositi nelle aree poste a valle del bacino sospeso (AREA LAGO).

3 I fenomeni di dissesto

Le indagini condotte hanno messo in evidenza la presenza di lesioni negli edifici e nelle opere murarie esistenti nell'area di Trello, nonché il verificarsi di fenomeni di abbassamento localizzato della superficie topografica, con sprofondamento in alcuni tratti della rete viaria comunale. I dissesti, oltre alle opere in superficie, hanno interessato i sottoservizi ed i condotti drenanti sottosuperficiali.

Il quadro geologico ed idrogeologico ricostruito per il territorio in esame ha permesso di collegare i dissesti registrati nel territorio di Trello e Fascia a Lago a cedimenti localizzati dei terreni superficiali presenti nel settore. I cedimenti sono da imputare al riassetamento dei terreni di copertura in relazione ai continui spostamenti dell'equilibrio del sistema geologico ed idrogeologico.

I fenomeni principali che determinano tali eventi possono essere ricondotti a:

- A) FENOMENI CHE SI SVILUPPANO NEI TERRENI DI COPERTURA: erosioni profonde differenziate nei terreni a causa di variazioni del deflusso della falda, a processi di riassetamento (spostamento di massa) come conseguenza del crollo di volte di cavità carsiche, fenomeni di fluidificazione, trasformazioni chimico fisiche con conseguenti riduzioni dei parametri geotecnici, suffosione;
- B) FENOMENI CHE SI SVILUPPANO NEL SUBSTRATO ROCCIOSO: sviluppo ed evoluzione di processi dissolutivi e di trasformazione chimica nelle unità evaporitiche, anche in risposta del sistema idrogeologico ad alterazioni delle condizioni di equilibrio.

La distribuzione delle lesioni nel territorio in esame è illustrato nella cartografia riportata a fine testo.

4 Indagini geognostiche

Nell'ambito delle attività d'indagine promosse dall'Amministrazione Comunale di Lovere per la ricostruzione delle cause dei dissesti in atto e per la loro mitigazione, sono state condotte n. 4 campagne di indagini geognostiche ed idrogeologiche mirate alla ricostruzione del quadro stratigrafico di dettaglio ed all'approfondimento delle problematiche in essere. Le indagini, nel loro complesso, hanno interessato gli ambiti di Cornasola, Trello ed Area a Lago.

Le serie di indagini condotte sono:

- I Lotto – gennaio 2005
- II Lotto – marzo 2005
- III Lotto – febbraio aprile 2006
- Indagini di supporto al progetto di intervento per la messa in sicurezza – febbraio aprile 2006

Le indagini condotte nell'AREA TRELLO sono state distinte apportando, all'apice della sigla che indica la tipologia di indagine, la sigla TR (ad es. S^{TR} - sondaggio) e sono comprensive di:

INDAGINI MECCANICHE	<ul style="list-style-type: none">➤ n. 14 sondaggi a carotaggio continuo ed a distruzione di nucleo: questi ultimi sono stati realizzati per la costituzione di una rete di piezometri;➤ n. 6 prove penetrometriche dinamiche➤ n. 5 prove penetrometriche statiche
INDAGINI GEOFISICHE	<ul style="list-style-type: none">➤ n. 8 linee tomografiche elettriche➤ n. 4 linee sismiche a rifrazione;➤ n. 6 down – hole nei fori di sondaggio.➤ n. 3 indagini sismiche con microrumori
INDAGINI IDROGEOLOGICHE E IDROCHIMICHE	<ul style="list-style-type: none">➤ monitoraggio delle acque di falda➤ analisi chimiche delle acque
INDAGINI DI LABORATORIO GEOTECNICO	<ul style="list-style-type: none">➤ analisi di laboratorio su campioni di terreni➤ analisi di laboratorio su campioni di roccia

4.1 Indagini meccaniche

In tale tipologia d'indagine vengono compresi i sondaggi (a carotaggio continuo ed a distruzione di nucleo) e le prove penetrometriche (dinamiche e statiche).

➤ Sondaggi geognostici a carotaggio continuo

I sondaggi geognostici sono perforazioni a carotaggio continuo attraverso le quali si ottiene il recupero completo del materiale attraversato; sono stati realizzati innanzi tutto per definire la successione stratigrafica degli ambiti sito. I sondaggi hanno fornito indicazioni sulle caratteristiche granulometriche e litologiche dei terreni attraversati e costituiscono anche un elemento di taratura per le indagini indirette (geofisica) e per l'interpretazione dei risultati delle prove penetrometriche.

Nelle aree di Trello sono stati condotti n. 8 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, spinti a profondità comprese fra 15 e 71 metri dal piano campagna. Sono stati inoltre analizzate le stratigrafie dei n. 2 sondaggi geognostici condotte nella proprietà del Sig. Pina Renato, in Via 2 Giugno n. 15.

I sondaggi del Sig. Pina sono state eseguiti in data Giugno 2004 nell'ambito dell'indagine FENOMENI DI CEDIMENTO IN CORRISPONDENZA DELL'ABITAZIONE DEL SIG. PINA A LOVERE (LOC. TRELLO) - RELAZIONE GEOLOGICO TECNICA FINALIZZATA ALLA MESSA IN SICUREZZA DELLA ZONA a cura della Dott.^{ssa} Geol. Michela Pecchio con studio in Via Artigiani a Brusaporto (Bergamo). I sondaggi sono stati spinti a profondità rispettivamente di 12 e 17 metri dal piano campagna ed in essi sono stati installati dei piezometri a tubo aperto. Le stratigrafie di tali sondaggi corrispondono a S^{TR}04 e S^{TR}05.

I dati stratigrafici di tutti i sondaggi geognostici sono riportati nel DOSSIER INDAGINI, mentre di seguito sono riportate le informazioni principali e le ulteriori analisi condotte nei fori di sondaggio.

S^{TR} 01 VIA EX TRANVIA: è stato realizzato lungo Via Ex Travia nel tratto a ridosso della Sorgente Biff; spinto sino alla profondità di 26.5 m dal piano campagna, il sondaggio ha raggiunto quota 208.5 m s.l.m. senza intercettare il substrato roccioso.

Nel sondaggio sono stati prelevati n. 3 campioni disturbati, rispettivamente a:

C1: 3.0 – 3.5 m – orizzonte superiore;

C2: 8.4 – 8.9 m – orizzonte intermedio

C3: 12.2 – 12.7 m - ceppo.

I campioni sono stati sottoposti ad indagini di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica e la determinazione dei Limiti di consistenza.

All'interno del foro di sondaggio sono state realizzate due indagini tipo down-hole, mediante l'apposizione di un batteria di idrofoni con interasse pari a 3.0 metri.

S^{TR} 02 VIA EX TRANVIA: spinto sino alla profondità di 32.0 m dal piano campagna, il sondaggio ha raggiunto quota 201.5 m s.l.m. ed è stato realizzato nel piazzale lungo Via Ex Tranvia. A quota 218.1 m s.l.m. è stato intercettato il substrato roccioso costituito da alternanze di livelli di gesso ed anidrite, talora con intercalazioni di miloniti.

Il sondaggio è stato attrezzato a piezometro, con la tubazione che raggiunge quota 213.5 m s.l.m. all'interno del substrato.

S^{TR} 03 PINA: è stato realizzato all'interno della proprietà del Sig. Pina Renato, in prossimità di Via Ex Tranvia; il sondaggio è stato spinto sino alla profondità di 19.7 m dal piano campagna ed ha raggiunto quota 214.3 m s.l.m. intercettando il substrato a quota 222.5 m s.l.m.: gli orizzonti superiori presentano un'elevata fratturazione e la presenza di cavità carsiche riempite da sabbia limoso argillosa.

Nel sondaggio sono stati prelevati n. 3 campioni disturbati, rispettivamente a:

C1: 10.0 – 10.4 m – depositi superficiali;

C2: 14.1 – 14.9 m – depositi di cavità carsica;

C3: 18.1 – 18.6 m – campione di roccia.

I campioni sono stati sottoposti ad indagini di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica e la determinazione dei Limiti di consistenza.

Il campione di gesso ed anidriti è stato sottoposto a prova triassiale.

All'interno del foro di sondaggio sono state realizzate due indagini tipo down-hole, mediante l'apposizione di un batteria di idrofoni con interasse pari a 3.0 metri.

S^{TR} 04 PINA: è stato realizzato all'interno della proprietà del sig. Pina Renato nell'ambito della campagna di indagine promossa dallo stesso per la valutazione delle cause dei dissesti alla propria abitazione.

S^{TR} 05 PINA: è stato realizzato all'interno della proprietà del sig. Pina Renato nell'ambito della campagna di indagine promossa dallo stesso per la valutazione delle cause dei dissesti alla propria abitazione.

S^{TR} 06 VIA II GIUGNO: spinto sino alla profondità di 25.0 m dal piano campagna, il sondaggio ha raggiunto quota 205.2 m s.l.m. ed è stato realizzato in corrispondenza dell'angolo ovest del parcheggio Trello, di fronte alla fontana. A quota 225.7 m s.l.m. è stato intercettato il substrato roccioso costituito da alternanze di livelli di gesso ed anidrite, talora con intercalazioni di miloniti.

Il sondaggio è stato attrezzato a piezometro, con la tubazione che raggiunge quota 215.2 m s.l.m. all'interno del substrato.

S^{TR} 09 PARCHEGGIO TRELLO: spinto sino alla profondità di 45.0 m dal piano campagna (avanzamento a distruzione di nucleo a partire da quota 207 m), il sondaggio ha raggiunto quota 182.5 m s.l.m. ed è stato realizzato in corrispondenza dell'angolo est del parcheggio Trello. A quota 214.0 m s.l.m. è stato intercettato il substrato roccioso costituito da breccia dolomitica alternata a livelli argilloso sabbiosi.

Il sondaggio è stato attrezzato a piezometro, con la tubazione che raggiunge quota 202.5 m s.l.m. all'interno del substrato.

S^{TR} 12 VIA PAPA GIOVANNI/PALESTRA: spinto sino alla profondità di 71.0 m dal piano campagna (avanzamento a distruzione di nucleo a partire da quota 190 m), il sondaggio ha raggiunto quota 153 m s.l.m. ed è stato realizzato lungo Via Papa Giovanni XXIII all'altezza della palestra. Il sondaggio non ha raggiunto il substrato roccioso ma ha attraversato prevalentemente i conglomerati.

Il sondaggio è stato attrezzato a piezometro, con la tubazione che raggiunge fondo foro.

S^{TR} 13 PALESTRA: è stato realizzato all'interno dei terreni annessi alla palestra lungo Via Papa Giovanni XXIII; spinto sino alla profondità di 50.0 m dal piano campagna, il sondaggio ha raggiunto quota 170.0 m s.l.m. senza intercettare il substrato roccioso.

Nel sondaggio sono stati prelevati n. 5 campioni disturbati, rispettivamente a:

C1: 7.5 – 8.0 m - orizzonte superficiale;

C2: 13.5 – 14.0 m - orizzonte intermedio;

C3: 18.0 – 18.5 m - ceppo;

C4: 20.5 – 21.0 m – terreni argillosi sabbiosi in falda;

C5: 39.0 – 39.5 m – ceppo alterato.

I campioni sono stati sottoposti ad indagini di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica e la determinazione dei Limiti di consistenza.

All'interno del foro di sondaggio è stata realizzata una indagine tipo down-hole, mediante l'apposizione di un batteria di idrofoni con interasse pari a 3.0 metri.

S^{TR} 14 PALESTRA: è stato realizzato all'interno dei terreni annessi alla palestra lungo Via Papa Giovanni XXIII, in corrispondenza dell'angolo sud est; spinto sino alla profondità di 48.0 m dal piano campagna, il sondaggio ha raggiunto quota di circa 170.0 m s.l.m. intercettando il substrato roccioso a quota 180 m s.l.m.

All'interno del foro di sondaggio è stata realizzata una indagine tipo down-hole, mediante l'apposizione di un batteria di idrofoni con interasse pari a 3.0 metri.

➤ Sondaggi a distruzione di nucleo

Durante la realizzazione della rete piezometrica, che ha previsto la perforazione di n. 4 fori, sono state osservate le fasi di perforazione a distruzione di nucleo mediante tricono, ottenendo informazioni in merito alle caratteristiche dei terreni attraversati sulla base sia delle velocità di approfondimento, che dell'osservazione diretta dei detriti di lavorazione.

Le postazioni di sondaggio e di installazione dei piezometri sono state scelte sulla base dell'accessibilità dei siti prediligendo le proprietà comunali (sedi stradali) allo scopo di evitare l'attraversamento di proprietà private.

Le stratigrafie di tali sondaggi sono le seguenti:

S^{TR} 07 VIA IV NOVEMBRE: è stato realizzato lungo Via IV Novembre, all'altezza dell'intersezione di Via II Giugno; la perforazione è stata spinta sino alla profondità massima di 210.9 m s.l.m. senza intercettare il substrato roccioso.

S^{TR} 08 PIAZZALE TRELLO: il sondaggio è stato condotto in corrispondenza dell'angolo nord est del Condominio Trello, a partire dal piano stradale. Spinto sino alla quota di 206.5 m s.l.m., durante la perforazione è stato riscontrato il substrato roccioso alla quota di 214 m s.l.m.

S^{TR} 10 CAMPO BOCCE: è stato condotto nelle aree prossime al campo bocce dell'Osteria Balì ed è stato spinto sino a raggiungere quota 211.1 m s.l.m. senza raggiungere il substrato roccioso.

S^{TR} 11 VIA IV NOVEMBRE: è stato eseguito lungo via IV Novembre, all'altezza della Proprietà della Signora Luna, spingendosi sino a quota 218.1 m s.l.m.; il substrato roccioso è stato raggiunto a quota 225. 6 m s.l.m.

Le indagini mediante sondaggi meccanici condotte nell'area Trello sono riassunte nel seguente schema:

SONDAGGI TRELLO

	Quota pc m s.l.m.	Quota sub m s.l.m.	Quota ff m s.l.m.	C.D.	Piez	Campioni	Down - Hole
STR 01	234.0	-	207.5	C		C1 - 3.0 C2 - 8.4 C3 - 12.2	X
STR 02	233.5	218.1	201.5	C	X		
STR 03	234.0	217.0	197.3	C	X	C1 - 10.0 C2 - 14.2 C3 - 18.1 (R)	X
STR 04	236.0	227.9	224.0	C	X		
STR 05	234.5	226.2	217.5	C	X		
STR 06	230.2	225.2	205.2	C	X		
STR 07	230.9	-	210.9	D	X		
STR 08	227.5	214.0	206.5	D	X		
STR 09	227.5	214.0	182.5	C	X		
STR 10	226.1	-	211.1	D	X		
STR 11	228.1	225.6	218.1	D	X		
STR 12	224.0	-	153.0	C	X		
STR 13	223.5	-	173.5	C		C1 - 7.5 C2 - 13.0 C3 - 18.0 C4 - 20.5 C5 - 39.0	X
STR 14	219.0	178.0	171.0	C		C1 - 5.2 C2 - 17.4	X

Quota pc = piano campagna

Quota sub = substrato

Quota ff = fondo foro

C.D. = carotaggio a distruzione

Piez. = piezometri

4.2 Prove penetrometriche

Durante le campagne di indagine condotte sono state eseguite:

- n. 6 prove penetrometriche dinamiche tipo SCPT
- n. 5 prove penetrometriche statiche tipo CPTU.

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica misurando il numero di colpi N necessari per un avanzamento delle aste pari a 30 cm.

L'elaborazione dei dati raccolti, interpretazione e visualizzazione grafica consentono di ricostruire il quadro stratigrafico dei terreni attraversati con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli e una correlazione diretta con i sondaggi geognostici.

Durante le fasi d'indagine è stato utilizzato un penetrometro tipo SUPERPESANTE (DPSH) - Tipo EMILIA con le seguenti caratteristiche:

- massa battente $M=73.5$ kg;
- altezza caduta $H=0.75$ m;
- avanzamento $\delta= 30$ cm;
- angolo di apertura della punta conica ($\alpha = 60^\circ$)
- diametro punta conica $D = 50.5$ mm;
- area base cono $A = 20$ cm²
- rivestimento metallico.

Le indagini sono state condotte nelle aree centrali di Trello, nei settori depressi dell'anfiteatro, nelle aree dove è stato ipotizzato il maggior spessore dei depositi superficiali.

L'ubicazione delle prove è riportata in carta mediante un simbolo grafico accompagnato dalla sigla PP^{TR} ed un numero progressivo.

PP^{TR} 01: la prova è stata condotta nei pressi della sorgente Biff, nelle aree rialzate rispetto al piano stradale di Via EX Tranvia, con quote del piano campagna pari a 236.6 m s.l.m. la prova si è spinta sino a rifiuto raggiungendo quota 220.4 m s.l.m.

PP^{TR} 04: è stata condotta all'interno della Proprietà Buelli/Taccolini, nelle aree coltivate che insistono verso Via II Giugno; la prova si è spinta sino a quota 212.2 m s.l.m.

PP^{TR} 05: è stata condotta all'interno della Proprietà Surini, nei settori a giardino che insistono su Via II Giugno, in corrispondenza di settori depressi rispetto alle aree circostanti; la prova si è spinta sino a quota 218.6 m s.l.m.

PP^{TR} 07: è stata condotta all'interno della Proprietà sig. Luna in prossimità dell'angolo est dell'edificio privato caratterizzato da fenomeni di cedimento differenziale; la prova si è spinta sino a quota 217.8 m s.l.m.

PP^{TR} 08: eseguita nelle aree a margine del campo bocce prive di edifici ed utilizzato come parcheggio temporaneo, a quota 226 m s.l.m.

PP^{TR} 10: è stata condotta all'interno della Proprietà Tarzia/Taccolini nei pressi del campetto di basket; la prova si è spinta sino a quota 210.6 m s.l.m.

PP^{TR} 11: è stata condotta all'interno del parco giochi presente fra il parcheggio Trello e le aree depresse lungo le quali è impostato il tracciato del condotto interrato drenante la Sorgente Biff; la prova si è spinta sino a quota 204.6 m s.l.m.

La prova penetrometrica statica consiste nell'infiggere a pressione nel terreno una punta conica metallica, misurando separatamente ma con continuità la resistenza offerta alla penetrazione della punta q_c e alla resistenza per attrito laterale f_s .

A quote prefissate, durante le prove penetrometriche, è stata arrestata la penetrazione della punta e sono state eseguite delle prove di dissipazione, per determinare il valore della pressione idrostatica.

Il dispositivo di spinta è costituito da un martinetto idraulico in grado di esercitare sulla duplice batteria di aste la spinta costante. La corsa minima è pari a 1 m e la velocità di infissione della batteria di aste è stata mantenuta costante nel corso della prova, indipendentemente dalla resistenza offerta dal terreno. Il dispositivo di spinta è stato ancorato in modo tale da poter sfruttare per intero la capacità di spinta totale della macchina.

Punta conica. E' costituita da una punta conica fissa, interamente solidale con il movimento della batteria di aste cave, con le seguenti dimensioni:

- diametro di base del cono = 35.7 mm
- altezza della parte conica del cono = 30.9 mm
- altezza dell'estensione cilindrica < 15 mm
- angolo di apertura del cono = 60°

La punta ha permesso la misura di:

- resistenza alla punta q_T (resistenza alla punta q_c corretta in funzione della pressione interstiziale U);
- resistenza per attrito laterale f_T (resistenza per attrito laterale f_s corretta in funzione della pressione interstiziale U).

Prova di dissipazione. Arrestando la penetrazione del piezocono nel terreno, la pressione dei pori in eccesso dovuta alla penetrazione inizia a dissiparsi per ricostituire l'equilibrio. La velocità di dissipazione dipende dal coefficiente di consolidazione che, a sua volta, è funzione della compressibilità e della permeabilità del terreno. La prova è considerata conclusa una volta dissipato almeno il 60% della sovrappressione indotta dalla penetrazione della punta.

Le prove penetrometriche statiche, eseguite durante l'ultima fase d'indagine, sono state condotte allo scopo di cercare di caratterizzare al meglio i terreni superficiali per i quali l'interpretazione delle prove dinamiche presentava qualche incertezza.

L'ubicazione delle prove statiche è riportata in carta mediante un simbolo grafico accompagnato dalla sigla PP^{TR} ed una lettera.

PP^{TR} A: la prova è stata condotta all'interno della proprietà Surini lungo Via II Giungo, a quote del piano campagna pari a 230.0 m s.l.m. Le prove si è spinta sino a raggiungere quota 223.7 m s.l.m.

PP^{TR} B e C: le prove sono state condotte nei pressi del campo di bocce dell'Osteria Balì, a quote del piano campagna pari a 226.2 m s.l.m. Le prove si sono spinte sino a raggiungere rispettivamente quota 216.6 (B) e 217.5 (C) m s.l.m.

PP^{TR} D e E: le prove sono state condotte all'interno della Proprietà Buelli/Taccolini, nelle aree a sud dell'edificio, a quota 232.3 m s.l.m. Le prove si sono spinte sino a raggiungere rispettivamente quota 227.1 (E) e 224.3 (D) m s.l.m.

In sintesi, le caratteristiche dei punti d'indagine delle prove penetrometriche sono elencati nella seguente tabella:

Prove penetrometriche

<u>Nome</u>	Quota p.c. (m s.l.m.)	Quota ragg. (m s.l.m.)	Dissipazione
Prove penetrometriche dinamiche			
PP ^{TR} 01	236.6	220.4	
PP ^{TR} 02	232.0	212.2	
PP ^{TR} 03	230.0	218.6	
PP ^{TR} 04	228.0	217.8	
PP ^{TR} 05	228.3	204.6	
PP ^{TR} 06	225.6	210.6	
Prove penetrometriche statiche			
PP ^{TR} A	230.0	223.7	
PP ^{TR} B	226.2	216.6	
PP ^{TR} C	226.2	217.5	1 – 8.36 2 – 8.51
PP ^{TR} D	232.3	227.1	1 – 5.07
PP ^{TR} E	232.3	224.3	

4.3 Indagini geofisiche

Le varie campagne d'indagine hanno previsto la realizzazione di indagini con tecniche geofisiche mirate alla ricostruzione stratigrafica del primo sottosuolo, opportunamente correlate ai risultati delle indagini meccaniche.

La campagna di indagini di tipo geofisico ha previsto l'esecuzione di:

- Stendimenti in tomografia elettrica;
- Stendimenti di sismica a rifrazione;
- Prove down-hole in foro con restituzione tomografica;
- Stendimenti con microtrempi sismici.

La traccia delle indagini è riportata nell'allegato grafico: la scelta delle posizioni e delle lunghezze degli stendimenti è stata dettata dalle condizioni logistiche dei siti, scegliendo linee che seguissero la rete stradale esistente.

➤ Tomografie elettriche

Il metodo geoelettrico si basa sul rilievo delle caratteristiche di resistenza elettrica dei materiali che compongono il sottosuolo. Le misure di resistività apparente vengono effettuate immettendo corrente nel sottosuolo attraverso due elettrodi (AB elettrodi di corrente) e misurando la differenza di potenziale attraverso altri due elettrodi (MN elettrodi di misura).

Il rilievo, eseguito in modalità tomografica, prevede l'infissione sulla superficie di misura di un numero variabile di picchetti (generalmente almeno 24) che vengono collegati ad un cavo multipolare schermato a 6 fili (due di corrente, due di misura e due per i comandi di switch). Ad ogni picchetto viene accoppiato un elettrodo nel quale è contenuta l'elettronica di comando collegata all'unità centrale. L'unità centrale esegue in batch la sequenza di misure secondo la tecnica walk-away: definite le combinazioni di elettrodi di misura e corrente si rilevano profili di resistività con diverse spaziature elettrode (delle quali la prima è pari ad "a" e le altre sono multiple) in corrispondenza di diverse posizioni fino a coprire l'intero stendimento.

L'automazione del processo di acquisizione mediante centralina di switch velocizza le operazioni di acquisizione dati.

In funzione del tipo di misure da effettuarsi e del sito di rilievo è possibile scegliere il tipo di segnale di corrente da generare nel terreno (numero e durata dei cicli di onda quadra), il valore di corrente da immettere (in ampiezza -mV), e il numero di stack tra le singole misure (ripetizione e media delle misure che diminuisce il rumore di fondo). E' inoltre possibile prefissare la soglia di errore (deviazione standard) al di sopra della quale ogni singola misura debba essere ripetuta e eventualmente scartata.

Il rilievo restituisce una pseudosezione della resistività elettrica dei materiali attraversati che viene successivamente elaborata tomograficamente. Tale tipo di acquisizione, anche se risente ovviamente delle approssimazioni del caso, permette di definire la geometria e la profondità di elementi resistivi o conduttivi.

Il risultato è una sezione 2D del sottosuolo investigato.

Per il rilievo è stato utilizzato il sistema multielettrodo ARES200E con 6 cavi da 8 elettrodi ciascuno per complessivi 48 elettrodi.



Georesistivimetro multielettrodo ARES 200E e elettrodi con relay di switch

Nella tabella seguente vengono riportate le fondamentali caratteristiche tecniche della strumentazione.

PARAMETRO	CARATTERISTICHE ARES 200E
Tipologie di misura	Resistività apparente, resistenza, voltaggio (PS), polarizzazione indotta (IP), voltaggio batteria alimentazione
Range di misura	da 400 KW a 0.1 milliW (resistenza) 0 – 500 V autorange del voltaggio della scala
Risoluzione delle misure	Massimo 30 nV, in dipendenza del livello del voltaggio
Corrente di output	1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA
Voltaggio di output	L'operatore può selezionare tra il limite di alto e basso voltaggio per il trasmettitore (800 Vp-p o 320 Vp-p voltaggio limite). In effetti però il voltaggio elettrodo si setta automaticamente in funzione della corrente trasmessa e dalla resistività del terreno
Input gain ranging	Automatico, utilizza sempre l'intero range dinamico della ricevente
Input di voltaggio	Massimo 500 V
Compensazione dei Potenziali Spontanei	Cancellazione automatica dei voltaggi PS durante le misure di resistività. Cancella completamente variazioni lineari e costanti di PS
Elaborazione del segnale	Media continua dopo ogni ciclo completo. Gli errori relativi al "noise" vengono calcolati e visualizzati come percentuale di lettura. Letture visualizzate come resistenza (D V/ I) e resistività apparente (W m). La resistività viene calcolata utilizzando le coordinate dello stendimento inserite dall'operatore
Eliminazione del "noise"	Superiore a 100 dB per $f > 20$ Hz Superiore a 120 dB a frequenze di linee di potenza (16 2/3, 20, 50 e 60 Hz)
Precisione totale	Superiore a 1% della lettura nella maggior parte dei casi (misure di laboratorio). La precisione delle misure di campo dipende dalla resistività e dal "noise" del terreno. Lo strumento calcolerà e visualizzerà una stima della precisione delle misure correnti

Il rilievo è stato condotto secondo la configurazione elettrodica Wenner Alpha che prevede per ogni combinazione elettrodica eguale distanza tra i 4 elettrodi utilizzati per ogni singola misura.

In fase di acquisizione lo strumento è stato impostato con il seguente setup:

- stack: 4
- durata dell'impulso: 0.5 s
- valore minimo di lettura: 10 mV
- deviazione standard massima per singola misura: 2%

L'obiettivo della tomografia elettrica è la determinazione della distribuzione di resistività nel sottosuolo attraverso misure eseguite in superficie. Iniettando corrente (I) attraverso due elettrodi e misurando la risultante differenza di potenziale (V) è possibile ottenere la resistività apparente del sottosuolo (ρ_a):

$$\rho_a = \frac{k \cdot V}{I}$$

dove k è il fattore geometrico derivante dal tipo di configurazione elettrodica scelta; nel caso del Wenner-Alpha $k=2\pi a$ (a = spaziatura elettrodica). La resistività calcolata è apparente poiché è la resistività che si otterrebbe se il sottosuolo fosse un mezzo perfettamente omogeneo.

Per determinare la resistività reale a partire dalla resistività apparente è necessario effettuare l'inversione dei dati dallo spazio dei dati allo spazio dei modelli. Questo processo tende a definire il modello che meglio si adatta ai valori misurati, ossia minimizza le differenze tra i valori di resistività apparente misurata e calcolata.

Il metodo di inversione iterativa utilizzato è lo smooth model basato sulla seguente equazione:

$$(J^T J + uF)d = J^T g - uFr$$

dove:

F = matrice di smoothing

J = matrice Jacobiana delle derivate parziali

r = vettore che contiene il logaritmo dei valori di resistività del modello

u = fattore di damping

d = vettore del modello di perturbazione

g = vettore di incongruenza

^T = trasposizione di default della funzione principale

Il vettore **g** contiene le differenze tra i valori di resistività apparente misurata e calcolata. Il peso di questo vettore è dato in termini di RMS ed è la quantità che l'inversione tende a ridurre iterazione dopo iterazione per affinare il modello.

Il vettore **d** rappresenta la variazione dei valori di resistività del modello calcolati utilizzando l'equazione di cui sopra e il cui risultato è normalmente un modello migliore.

I dati acquisiti sono stati elaborati mediante il software EarthImager 2D della AGI Ltd. Di seguito vengono riportate le fasi dell'elaborazione eseguita:

- conversione dei dati acquisiti
- valutazione dei valori di rms delle letture e filtraggio dei dati
- inversione tomografica del dato acquisito
- valutazione del valore di rms
- iterazione dell'analisi fino al risultato soddisfacente
- analisi delle matrici di risoluzione
- realizzazione delle sezioni geoelettriche

Le indagini in tomografia elettrica condotte nelle aree Trello hanno previsto la realizzazione di n. 10 stendimenti:

TE^{TR} 01: lo stendimento ha inizio all'altezza della sorgente Biff e segue l'allineamento del condotto interrato, per una lunghezza pari a 170 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima pari a circa 35 m;

TE^{TR} 02: la linea tomografica segue Via IV Novembre per una lunghezza pari a 315 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di oltre 40 m;

TE^{TR} 03: la linea tomografica è disposta lungo Via IV Novembre/stradetta Trello per una lunghezza pari a 128 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di 26 m;

TE^{TR} 04: la linea tomografica taglia l'anfiteatro di Trello con direzione ovest-est percorrendo il piazzale antistante il Condominio Trello per una lunghezza pari a 214 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di oltre 30 m;

TE^{TR} 05: la linea tomografica segue il tracciato inferiore del condotto interrato che drena la Sorgente Biff per una lunghezza pari a 87 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima dell'ordine di 17 m;

TE^{TR} 06: la linea tomografica è disposta lungo Via San Pietro ed attraversa il Piazzale Trello all'altezza del campetto di basket, con uno stendimento pari a 84 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di 17 m;

TE^{TR} 07: la linea tomografica ha inizio in Via Stradetta Trello, attraversa il campo di bocce allineandosi lungo la direttrice definita dalla scalinata Adamello e termina all'intersezione di Via Papa Giovanni XXIII, con uno stendimento pari a 170 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di oltre 30 m;

TE^{TR} 08: la linea tomografica è stata realizzata lungo la Scalinata Adamello, con uno stendimento pari a 94 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di 15 m;

TE^{TR} 09: la linea tomografica lungo Via Papa Giovanni XXIII nel tratto antistante i condomini che insistono sulla scarpata, con uno stendimento pari a 117 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di 25 m;

TE^{TR} 10: è stata realizzata nelle aree a est della palestra presente a valle di Via Papa Giovanni XXIII con uno stendimento pari a 98 m, raggiungendo una profondità di investigazione massima di 15 m.

L'elaborazione ha permesso la realizzazione di sezioni bidimensionali del sottosuolo (riportate nel DOSSIER INDAGINI) dove i terreni investigati sono stati distinti in funzione del parametro resistività elettrica (espresso in ohm x m). Le matrici di resistività sono state elaborate secondo un grid di celle quadrate con lato pari a 2.5 m. L'interpolazione geometrica delle matrici risultanti e la restituzione grafica delle stesse è stata realizzata con il software Surfer

della Golden Software. Tale interpolazione è stata eseguita con il metodo del kriging con grid di celle quadrate aventi lato pari a 2.5 m.

L'interpretazione delle sezioni topografiche elettriche, nei casi in esame, è condizionata dagli aspetti litologici (presenza di gessi ed anidriti, spesso alterati e/o fratturati; terreni con possibili cementazioni e Sali disciolti) ed idrogeologici (presenza di falde mineralizzate): la variabilità delle condizioni introduce errori di interpretazione che possono essere limitati solo se confrontati e tarati con i risultati delle ulteriori indagini eseguite nell'ambito.

➤ Sismica a rifrazione

I metodi di prospezione sismica si basano sulla registrazione di onde sismiche immesse artificialmente nel terreno e registrate dal sismografo tramite appositi sensori (geofoni). Le onde sismiche, infatti, si propagano nel terreno con velocità che sono funzione delle caratteristiche elastiche dei materiali attraversati e quindi delle caratteristiche litologiche degli stessi e del loro stato di conservazione. Depositi incoerenti (ghiaie, sabbie, detriti in genere) hanno velocità sismiche notevolmente inferiori alle velocità riscontrabili nelle rocce coerenti (calcari, graniti, ecc.). Approssimativamente i primi hanno velocità che possono variare da 0.35 a 1.8 km/s; le rocce coerenti hanno invece valori generalmente superiori ai 3.0 km/s. Le onde sismiche, generate con opportuni sistemi di energizzazione (massa battente, fucile sismico, esplosivo, ecc.) nel terreno, attraversano i diversi litotipi e vengono rifratte e riflesse dalle superfici di discontinuità che rappresentano il contatto tra due diversi tipi di materiale.

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo. Misurando i tempi di arrivo di questi impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi. Attraverso opportuni metodi di interpretazione sono poi calcolate le diverse velocità dei singoli strati e il loro spessore.

In questo caso è stata impiegata la tecnica tomografica. Per l'esecuzione del rilievo a rifrazione si è fatto uso della strumentazione di seguito elencata:

- Sismografo ES2401 a 24 canali con dinamica 16 bit e possibilità di stacking
- 2 cavi sismici schermati di lunghezza pari a 60 m ciascuno
- 24 geofoni con frequenza naturale di 14 Hz
- Batterie a 12 V per l'alimentazione del sismografo

- Sistema di energizzazione del terreno costituito da martello da 5 kg e sistema geofonico di trigger con cavo di collegamento al sismografo per la definizione del tempo zero
- Set di connessioni e materiali d'uso

Le geometrie di stendimento hanno previsto l'utilizzo di interdistanze geofoniche pari a 5 m e l'energizzazione in 5 punti ognuna. I punti di energizzazione sono stati infatti scelti anche in funzione della situazione logistica dei punti stessi. Ogni tiro è stato inoltre ripetuto almeno 1 volta sia per migliorare, mediante operazione di stack, la qualità del segnale acquisito (diminuzione del rumore di fondo) e sia per verificare la coincidenza del T_0 . Si ricorda che tale operazione tende ad enfatizzare il segnale coerente (impulsi coerenti o comunque con contenuto di informazione) a discapito del segnale incoerente (rumore di fondo e disturbi di vario genere ed origine).

Le indagini con il metodo della sismica a rifrazione condotte nelle aree Trello hanno previsto la realizzazione di n. 4 stendimenti:

SR^{TR} 01: l'indagine è stata condotta lungo Via Ex Tranvia, in prossimità del sondaggio S^{TR}01, con un'estensione di 120 m, investigando una profondità di circa 15 m;

SR^{TR} 02: lo stendimento sismico ha seguito il tracciato di Via Belotti per una lunghezza di circa 65 m, per una profondità di investigazione poco superiore a 10 m;

SR^{TR} 03: Lo stendimento è stato realizzato lungo Via Papa Giovanni XXIII nel tratto a monte della palestra, per una lunghezza di circa 160 m con una profondità investigativa poco superiore a 15 m;

SR^{TR} 04: è stato condotto a valle della palestra, parallelamente alla linea tomografica elettrica TE^{TR} 10, per una lunghezza pari 100 m a cui corrisponde una profondità d'investigazione di circa 25 m.

I risultati della campagna di indagini con i metodi della sismica a rifrazione sono illustrati nelle sezioni riportate nel DOSSIERE INDAGINI, nelle quali i terreni attraversati sono distinti in funzione della velocità di propagazione delle onde sismiche: una maggior velocità di propagazione è indice di un più elevato grado di addensamento dei terreni oppure dell'intercettazione del substrato roccioso.

La lettura delle sezioni sismiche, opportunamente correlata con i risultati delle indagini meccaniche poste nelle immediate adiacenze allo stendimento, ha permesso di riconoscere il limite fra i depositi superficiali ed il substrato roccioso costituendo la base di raffronto per l'interpretazione delle sezioni topografiche elettriche. Si sottolinea comunque come la metodologia d'indagine non consente il riconoscimento di orizzonti lenti posti in posizione stratigraficamente inferiore ad orizzonti veloci, né la presenza di cavità.

I risultati delle indagine sono stati tradotti in punti significativi ed utilizzati per la ricostruzione dell'andamento topografico del substrato roccioso dell'area di Trello.

Nella seguente tabella si riporta lo schema riassuntivo delle indagini geofisiche condotte nell'area Trello:

	Lunghezze	Quota ragg.
<u>Nome</u>	(m)	(m s.l.m.)
Stendimenti di tomografia elettrica		
TE ^{TR} 01	170	198
TE ^{TR} 02	315	190
TE ^{TR} 03	128	200
TE ^{TR} 04	216	198
TE ^{TR} 05	88	210
TE ^{TR} 06	84	210
TE ^{TR} 07	170	190
TE ^{TR} 08	98	193
TE ^{TR} 09	118	197
TE ^{TR} 10	98	204
Stendimenti sismici a rifrazione		
SR ^{TR} 01	120	222
SR ^{TR} 02	67	218
SR ^{TR} 03	165	200
SR ^{TR} 04	100	192

➤ Down-Hole

L'indagine è stata effettuata con metodologia Vertical Seismic Profile. Tale metodologia di indagine permette di definire, mediante l'identificazione dei tempi di arrivo delle onde P, un modello di sottosuolo nell'intorno di un sondaggio precedentemente eseguito. La sezione di sottosuolo modellizzata corrisponde all'area compresa tra l'allineamento dei punti di energizzazione eseguiti a piano campagna e l'allineamento dei sensori idrofoni in foro.

Le modalità di esecuzione della prova sono le seguenti:

- posizionamento della catena idrofonica in foro
- generazione dell'impulso da superficie (con eventuale somma di più impulsi) su piastra di battuta e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione
- ripetizione dell'energizzazione ad una maggiore distanza dal foro di sondaggio lungo un allineamento

Per l'esecuzione dell'indagine si è fatto uso della strumentazione di seguito elencata:

- sismografo Geode a 24 canali con dinamica 24 bit e possibilità di stacking
- notebook con interfaccia di rete
- cavi sismici schermati
- 2 catene da 12 idrofoni Sensor con frequenza propria pari a 10Hz
- batterie a 12 V per l'alimentazione del sismografo
- set di connessioni e materiali d'uso

Le indagini di tipo Down-Hole sono state condotte all'interno dei fori di sondaggio S^{TR} 01, S^{TR} 03, S^{TR} 13, S^{TR} 14.

➤ Microtremori sismici

La tecnica dei microtremori sismici (Refraction Microtremor - ReMi) fornisce una caratterizzazione semplificata di volumi relativamente ampi del sottosuolo in profili verticali 1D sino alla profondità di 100 metri. Il ReMi, a differenza della sismica a rifrazione tradizionale, può caratterizzare un orizzonte meno veloce che è sottostante ad uno più veloce (velocity reversal).

In situazioni dove un terreno più "competente" è sovrapposto a una zona più debole legata a subsidenza o al collasso di materiali più deboli sottostanti o a spazi vuoti, ReMi ha la capacità di individuare la velocità delle onde S dell'orizzonte debole sottostante. E' inoltre efficace come metodo nella caratterizzazione rapida e generale del sottosuolo, specialmente se abbinata alla sismica a rifrazione, con lo scopo di definire il contatto roccia/terreno o il contrasto tra materiali più deboli e materiali più compatti.

Le indagini sono state eseguite in accordo con quanto descritto da Louie per sviluppare profili verticali 1D delle onde di taglio. È stato impiegato lo stesso equipaggiamento che generalmente viene usato per la sismica a rifrazione.

Quando opportuno, vengono acquisiti entrambi i dati, onde P e onde S con la stessa stesa sismica; in questo modo i risultati delle indagini sono complementari e servono come controllo di qualità, tarandosi a vicenda.

È stato usato un sismografo multicanale capace di acquisire fino a 36000 campioni per canale con intervallo di campionamento da 1 a 2 ms in formato SEG2 o SEG-Y.

Come sorgente di energia delle onde superficiali si è sfruttato il rumore ambientale a banda larga.

L'acquisizione dati è consistita nel campionamento dell'ambiente e/o delle onde di superficie generate (un evento di campionamento) in corrispondenza della stesa sismica per diversi secondi.

I dati acquisiti in campagna sono stati trasferiti dal sismografo al personal computer, utilizzando per l'interpretazione il software SeisOpt ReMi della Optim, che è composto da due moduli.

Il primo viene usato per trasformare i data files in una rappresentazione grafica, relativa ad ogni acquisizione ReMi, del rapporto tra la frequenza dell'energia spettrale delle onde di taglio e la velocità delle onde di taglio (o lentezza).

Il secondo modulo permette di modellare una curva di dispersione con strati multipli e velocità delle onde S al fine di far combaciare la curva di dispersione selezionata dai dati di campo.

L'applicazione del software SeisOpt ReMi Version 3.0 consente di calcolare automaticamente, attraverso la determinazione della "Dispersion Curve", il valore delle Vs nell'ambito dei primi 30 o più metri investigati.

Relativamente invece alla sezione 2D, la stessa mostra l'andamento delle Vs lungo l'allineamento interessato dalla stesa del cavo sismico.

Sebbene un controllo iniziale e preliminare di qualità dell'interpretazione dei dati ReMi può essere eseguito sul terreno, l'interpretazione completa va fatta in ufficio. I dati acquisiti in campagna sono stati trasferiti dal sismografo al personal computer, utilizzando per l'interpretazione il software SeisOpt ReMi della Optim, che è composto da due moduli.

Il primo viene usato per trasformare i data files in una rappresentazione grafica, relativa ad ogni acquisizione ReMi, del rapporto tra la frequenza dell'energia spettrale delle onde di taglio e la velocità delle onde di taglio (o lentezza) , come in fig. 1. L'interprete ha provveduto a selezionare una curva di dispersione consistente nel limite inferiore della velocità dell'energia

spettrale delle onde di taglio in rapporto al trend della frequenza, rappresentato dai quadretti in figura, selezionando l'energia ambientale che si propaga parallela alla stesa dei geofoni, dato che l'energia che si propaga incidentalmente alla stesa mostrerà di avere una velocità di propagazione più veloce. Successivamente questa curva di dispersione è stata salvata,.

Il secondo modulo permette di modellare una curva di dispersione con strati multipli e velocità delle onde S al fine di far combaciare la curva di dispersione selezionata dai dati di campo. Nella fig. 2 appare il profilo verticale delle onde S interpretato ed ottenuto mediante questi procedimenti. E' da sottolineare che questo tipo di interpretazione non presenta una soluzione unica, pertanto è importante avere delle conoscenze dirette sulla stratigrafia del sottosuolo indagato.

L'analisi dei valori delle Vs induce a pensare come alle profondità comprese tra - 14 m circa e - 20 m circa si materializzi la porzione sommatiale del substrato roccioso piuttosto compatto. I terreni soprastanti, in funzione dei propri valori delle Vs, mostrano, invece, caratteristiche geotecniche piuttosto scadenti.

4.4 Indagini di laboratorio geotecnico

Durante la fase d'indagine condotta nel periodo marzo-aprile 2006, nei fori di sondaggio sono stati prelevati campioni rimaneggiati di terreni e campioni di roccia. Successivamente, a seguito della stesura del progetto preliminare, sono stati prelevati alcuni campioni di terreno da n. 2 pozzetti esplorativi spinti sino alla profondità massima di 3.0 m dal piano campagna ed eseguiti nelle aree poste nelle immediate vicinanze del Campo Bocce.

➤ Terreni

A causa delle difficoltà che l'impresa ha incontrato nel prelievo, i campioni maneggiati hanno permesso solo prove di caratterizzazione.

Pertanto, sui campioni di terreno prelevati dai sondaggi geognostici sono state eseguite esclusivamente analisi granulometriche e misure dei limiti, mentre per i campioni di terreno prelevati dai pozzetti esplorativi sono state eseguite:

- a) Analisi granulometriche; la prova consiste nella determinazione della distribuzione granulometrica.
- b) Determinazione peso di volume naturale; consiste nella misura della massa volumetrica apparente di un terreno, ottenuta come rapporto tra la massa di un provino ed il suo volume.
- c) Determinazione contenuto naturale d'acqua; la determinazione consiste nella misura del contenuto d'acqua dei terreni.
- d) Determinazione limiti di consistenza; la determinazione consiste nella misura del contenuto d'acqua per il quale avviene il passaggio dallo stato liquido allo stato plastico (limite di liquidità) e dallo stato plastico allo stato semisolido (limite di plasticità).
- e) Prova di taglio diretto con determinazione della resistenza di picco e residua con apparecchiatura di Casagrande.
- f) Prova di taglio anulare; la prova consiste nella determinazione della resistenza al taglio residua di campioni di terreno sottoposti a sforzi di taglio torsionale.
- g) Prova triassiale Consolidata Isotropicamente Drenata (CID): la prova consiste nella determinazione dei parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci di un campione di terreno sottoposto a condizioni di sollecitazione triassiale; la prova può inoltre essere utilizzata per la determinazione dei parametri di deformabilità drenati.
- h) Prova edometrica: la prova consiste nella determinazione dell'entità e della velocità della consolidazione di terreni coesivi soggetti ad incrementi tensionali. La prova può essere condotta ad incrementi di carico controllati (prova IL). Nel corso della prova

edometrica, oltre ai parametri normalmente calcolati, sono state possibile determinazioni dirette di permeabilità.

I risultati delle indagini eseguite sono illustrate nei certificati di laboratorio riportati nel DOSSIER INDAGINI.

Dall'analisi dei risultati emerge:

- 1) I terreni superficiali sono caratterizzati da depositi fini in prevalenza (CH – SM), con orizzonti torbosi, a comportamento meccanico scadente ed elevata compressibilità.
- 2) Gli orizzonti inferiori presentano granulometria eterometrica, con percentuali simili di ghiaia, sabbia, limo ed argilla.

➤ Rocce

i campioni di roccia prelevati durante i sondaggi geognostici sono stati sottoposti ad indagini di laboratorio geomeccanico; le indagini condotte sono:

- prova triassiale (n. 3 campioni)
- prova di compressione uniassiale
- prova brasiliana.

Prova triassiale

La prova di compressione triassiale in controllo di carico consiste nella determinazione dell'involuppo di rottura di picco di campioni omogenei di roccia.

Poiché sono state condotte prove con rilievo delle deformazioni assiali e diametrali, si sono misurate anche i parametri elastici di deformabilità. La prova non consente di indagare il comportamento della roccia nella fase post-rottura, né di determinare l'involuppo di rottura residuo.

Con prove triassiali è possibile sottoporre il campione ad uno stato di sforzo verticale σ_1 , differente dagli sforzi orizzontali σ_2 e σ_3 uguali tra loro e pari alla pressione di cella. Continuando ad incrementare lo sforzo assiale (compressione standard) e mantenendo costante il valore di sforzo radiale è possibile portare a rottura il provino e misurare la resistenza a compressione in condizioni confinate.

Tenuto conto della forma che caratterizza l'involuppo di rottura delle rocce, una sua completa e corretta definizione può essere ottenuta sottoponendo a prova un numero adeguato di provini omogenei in diverse condizioni di confinamento. Per questo si sono condotte prove monoassiali e di trazione.

Prova di compressione monoassiale

La prova consiste nella determinazione della resistenza a compressione monoassiale di un campione di roccia, in assenza di una tensione di confinamento.

Prova di trazione indiretta (brasiliana)

La prova consente la determinazione indiretta della resistenza a trazione di un campione di roccia sottoposto a sollecitazione di carico monoassiale.

Nel sondaggio S^{TR}03 sono stati prelevati n. 2 campioni di roccia (gesso ed anidrite in diverse percentuali) che sono stati sottoposti ad indagini di laboratorio, previa formazione di idonei provini. Nella tabella seguente si riportano i riassunti dei risultati delle prove condotte:

Campione	n.	S1-TX1	S1-TX2
Profondità di campionamento (m)	da	18.10	18.30
	a	18.20	18.40
PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE			
Pressione di confinamento	(MPa)	3.00	6.00
Sforzo a rottura	(MPa)	57.26	56.10
Modulo di Young tangente	(GPa)	25.21	24.12
Modulo di Young secante 50%	(GPa)	11.64	4.77
Coefficiente di Poisson	-	0.29	0.27

Vengono di seguito riportati i risultati delle indagini di laboratorio condotte n. 3 campioni di roccia prelevati in un sondaggio (eseguito presso la scuola elementare) all'esterno dell'area d'indagine, ma ritenuto significativo per la valutazione del comportamento meccanico generale.

Campione	n.	C6-TX3	C6-MONO	C6-BRA
Profondità di campionamento (m)	da	28.00	28.10	28.70
	a	28.10	28.26	28.75
PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE				
Sforzo a rottura	(MPa)	-	11.01	-
Modulo di Young tangente	(GPa)	-	17.24	-
Modulo di Young secante 50%	(GPa)	-	5.54	-
Coefficiente di Poisson	-	-	0.18	-
PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE				
Pressione di confinamento	(MPa)	9.00		
Sforzo a rottura	(MPa)	50.41	-	-
Modulo di Young tangente	(GPa)	15.43	-	-
Modulo di Young secante 50%	(GPa)	2.83	-	-
Coefficiente di Poisson	-	0.25	-	-
PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA (BRASILIANA)				
Resistenza a trazione indiretta	(MPa)	-	-	2.69

5 Aspetti geologico stratigrafici di dettaglio

Le indagini condotte, nel loro complesso, hanno permesso di ricostruire il quadro geologico stratigrafico dell'area, mettendo in evidenza un'elevata variabilità laterale del primo sottosuolo: che potrebbe portare o registrare nella fase d'intervento, alcune discordanze rispetto al quadro stratigrafico riportato.

5.1 Sintesi stratigrafica

➤ Il substrato roccioso

I sondaggi geognostici spinti nel substrato roccioso hanno permesso di verificare come l'area Trello sia impostata nelle unità evaporitiche appartenenti alla *Lente di Lovere* compresa nella *Formazione del San Giovanni Bianco*. Tali unità sono costituite da alternanze irregolari di gesso ed anidride; nelle alternanze è stato possibile riconoscere vari stadi di alterazione e di dissoluzione carsica. In sostanza, nell'ammasso coesistono diversi stati di sviluppo del carsismo con gesso residuale, carsismo fossile e maturo con blocchi di gesso discontinuo.

I gessi costituiscono pertanto un ammasso roccioso molto discontinuo, con una morfologia del tetto articolata, sono state individuate delle depressioni da collegare alla presenza di cavità carsiche, con fondo non raggiunto dall'esplorazione condotta: si ritiene che la quota di questo sia inferiore alla batimetria del Lago d'Iseo.

I livelli superiori del substrato (per spessori compresi fra 0.0 e 5.0 m) presentano una maggior diffusione dei fenomeni di dissoluzione, con la presenza di cavità carsiche di dimensioni metriche di cui non è stato possibile ricostruire l'estensione laterale, spesso con riempimenti detritici; tali detriti sono da collegare ad afflussi dalla superficie a seguito del crollo della volta oppure da depositi carsici e/o livelli di alterazione del gesso in depositi argilloso limosi. La migrazione delle cavità ipogee verso l'alto avviene per rifluimenti o crolli successivi dei terreni sovrastanti.

La stratificazione del substrato in relazione alle caratteristiche meccaniche è evidenziata dai risultati delle indagini geofisiche con il metodo della sismica a rifrazione: le porzioni inferiori del substrato roccioso indagato sono infatti caratterizzate da velocità delle onde V_p dell'ordine di 2500-3000 m/s mentre tendono a diminuire verso l'alto sino a valori dell'ordine di 1900-2000 m/s.

Le litologie evaporitiche presentano talora dei livelli millimetrici di marne argillose, sottoposte a processi di milonitizzazione e mineralizzazione in solfuri.

➤ I depositi superficiali

L'analisi delle stratigrafie dei sondaggi e le correlazioni con i risultati delle indagini geofisiche hanno messo in evidenza una sensibile variazione sia laterale che verticale dei depositi che colmano la depressione dell'anfiteatro di Trello: i depositi sono da collegare a processi di riempimento di cavità carsica in condizioni di acque stagnanti, apporti colluviali e processi di alterazione delle litologie del substrato roccioso.

I sondaggi geognostici a carotaggio continuo eseguiti nelle aree centrali dell'anfiteatro di Trello hanno evidenziato per gli orizzonti superficiali (da 0 a 5 m da p.c.) la presenza di terreni fini, in particolare limi argillosi con sabbia grigi, talora con resti di bivalvi e limi sabbiosi color nocciola intercalati da livelli carboniosi. Lo spessore della coltre investigata con i sondaggi meccanici varia da circa 5 metri (nelle aree a ridosso di Via Stradetta Trello) a decine di metri nelle aree prossime alla sorgente Biff).

Nei terreni è possibile la presenza di lenti travertinose e/o cementate: tali lenti subiscono progressive alterazioni dello stato di consistenza in relazione alle oscillazioni del livello freatico ed al variare delle caratteristiche idrochimiche delle acque.

I sondaggi e gli scavi hanno messo in evidenza la presenza in superficie di lenti di torba che si estendono per l'intera area depressa, la cui deposizione è da collegare alla presenza in tempi storici (inizio secolo scorso) di ristagni d'acqua e zone acquitrinose.

I risultati delle indagini dirette (sondaggi e prove penetrometriche) mettono in evidenza la presenza di terreni stratificati caratterizzati, in alcune aree, da una coltre superficiale dello spessore dell'ordine di 5,0 m con valori di resistenza alla punta $N_{spt} < 5$ colpi/piede sovrapposti a strati mediamente più resistenti ($N_{spt} = 5$ colpi/piede e superiori); nel settore centrale dell'area Trello (PP^{TR}05) i terreni inconsistenti raggiungono invece profondità dell'ordine di 22 m dal piano campagna. Le stratigrafie dei sondaggi evidenziano inoltre per tali orizzonti la presenza di terreni ad elevato contenuto di materiale organico (lignite, torba e molluschi). Le difficoltà di campionamento incontrate durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici sono da imputare alla presenza di terreni a granulometria fine prevalente (sabbie limoso argillose) immerse in falda.

Approfondendosi, le prove penetrometriche condotte hanno evidenziato in media (se si esclude la prova eseguita in corrispondenza del parco giochi (PP^{TR} 05) un incremento dei valori di resistenza alla punta: tale incremento, in relazione al rapporto fra la resistenza all'avanzamento della punta e del rivestimento, è da ricondurre ad un aumento del contenuto della frazione argillosa che ha un comportamento coesivo.

Dall'analisi dei risultati delle prove geofisiche emerge come la continuità laterale degli orizzonti, in termini di comportamento geologico-tecnico, possa essere dipendente dalla presenza di zone di deflusso idrico concentrato che determinano una fluidificazione dei terreni.

Le indagini geofisiche hanno inoltre evidenziato la presenza discontinua di un orizzonte superficiale (a bassa conducibilità elettrica e media resistenza meccanica, con spessori che variano da 0 a 5 metri) da ricondurre a terreni di riporto e/o sottofondi stradali.

A fine testo si riporta il modello stratigrafico riassuntivo sulla base delle indagini condotte.

Nello schema, oltre al livello piezometrico medio, vengono indicati i settori nei quali sono state ipotizzate, sulla base dei risultati delle indagini in tomografia elettrica, le aree di deflusso concentrato delle acque. Il modello, seppur schematico, vuole sottolineare la complessità stratigrafica ed idrogeologica che emerge dalle indagini, con continue sovrapposizioni ed interdigitazioni degli orizzonti.

5.2 Carta delle quote assolute del tetto del substrato roccioso

Le profondità del substrato roccioso ricavate dall'interpretazione dei risultati delle indagini geofisiche e dalle campagne d'indagini geognostiche nell'area Trello sono state elaborate con il programma Surfer (Golden Software, 7), che prevede l'utilizzo di un modello di Kriging. Il risultato dell'elaborazione dei dati ha permesso di ottenere la rappresentazione realistica della morfologia del substrato, illustrata nell'allegato 4 a fine testo.

La cartografia illustra mediante differenti colorazioni (colorazioni tendenti al verde indicano profondità maggiori del substrato) la quota assoluta del substrato roccioso. Nello schema, gli elementi desunti dal programma di calcolo sono stati sovrapposti alla topografia dell'area: la rappresentatività dei risultati risulta meno attendibile nei settori esterni della cartografia, in relazione alle caratteristiche proprie del programma ed alla distribuzione delle informazioni disponibili.

L'elaborato permette di evidenziare come:

- l'area di Trello sia effettivamente impostata in un'area di dolina, aperta verso lago;
- nelle aree interne il substrato presenta una morfologia articolata, con presenza di picchi e depressioni, da collegare a fenomeni di dissoluzione carsica impostati su rocce fratturate e tettonizzate;
- i picchi possono essere legati alla presenza di blocchi di gesso residuale, disarticolati;
- è possibile rilevare la presenza di allineamenti morfologici (sempre da collegare a lineamenti tettonici) che possono costituire direttrici di deflusso concentrato delle acque della falda mineralizzata.

5.3 Aspetti idrogeologici

L'analisi dei risultati delle indagini idrochimiche e del monitoraggio alla rete piezometrica installata nell'area Trello ha permesso d'approfondire le conoscenze in merito agli aspetti idrogeologici del settore.

Il tratto di versante posto a monte dell'area Trello in Comune di Lovere (compreso dunque fra il Monte Cala e l'abitato, nel tratto a sud della valle che attraversa l'abitato) è caratterizzato da due acquiferi:

- un acquifero, chiamato *superiore*, che si sviluppa all'interno del sistema carsico impostato nella complesso calcareo-dolomitico;
- un acquifero, chiamato *inferiore*, che si sviluppa nelle unità evaporitiche.

Le rocce calcareo-dolomitiche sono caratterizzate da un'elevata permeabilità secondaria legata alla presenza di carsismo diffuso e ad un alto grado di fratturazione; la permeabilità del complesso roccioso è localmente limitata per la presenza di riempimenti detritici e di alterazione delle fratture. I riempimenti (come emerge dalle indagini condotte a suo tempo da ANAS per la realizzazione della Galleria Lovere) sono costituite da terreni a granulometria fine (legata ad apporti colluviali, a depositi glaciali ed a terreni argillosi da collegare a processi di alterazione delle unità litiche). Le discontinuità presenti nel complesso carbonatico determinano la non omogeneità della distribuzione della permeabilità.

Le unità evaporitiche possono essere considerate relativamente impermeabili e possono essere intese come un limite di permeabilità.

Il primo acquifero è alimentato dalle infiltrazioni dalle aree superiori (altopiano di Bossico) lungo condotti per lo più subverticali, con processi dissolutivi che interessano le unità calcareo-dolomitiche: le acque di tale acquifero presentano un elevato contenuto di calcio e magnesio, in accordo con le caratteristiche delle rocce serbatoio.

L'acquifero inferiore è caratterizzato da acque mineralizzate a solfati e solfuri, con concentrazioni al limite della soluzione satura. La circolazione si sviluppa lungo direzioni suborizzontali, in accordo con la giacitura del piano di faglia impostato a contatto con le unità.

L'alimentazione dell'acquifero superiore è legata direttamente agli apporti meteorici: i circuiti sono relativamente veloci e possono subire improvvise accelerazioni in relazione all'entità di questi. Non si esclude che apporti meteorici particolarmente intensi e durevoli possano determinare la completa saturazione dei terreni presenti nelle cavità carsiche (che interessano anche l'intero sviluppo verticale della Dolomia), con conseguente sviluppo di pressioni

idrostatiche elevate che possono indurre la falda a muoversi lungo sistemi di fratture o cavità attigue precedentemente non utilizzate.

L'alimentazione dell'acquifero inferiore è da collegare ad apporti esterni al bacino superficiale: non si escludono collegamenti diretti con le acque del sistema *BOARIO - TRESCORE* con circuiti dunque caratterizzati da basse velocità di percorrenza (tali da favorire i processi di dissoluzione delle unità solfatiche) ed elevati tempi di percorrenza.

Le acque dei due sistemi tendono a miscelarsi al tetto dell'acquifero inferiore dando origine ad un *terzo* acquifero caratterizzato da parametri idrochimici intermedi.

La base del versante immediatamente alle spalle dell'area Trello interseca il tetto delle unità evaporitiche, favorendo l'emergenza delle acque del *terzo* acquifero, mentre in profondità avviene il deflusso delle acque dell'acquifero mineralizzato, caratterizzato da elevati valori delle concentrazioni di solfati e solfuri.

La coltre detritica che occupa la depressione di Trello è sede di circolazione idrica alimentata dalle acque del *terzo* acquifero per gli orizzonti superficiali ed al *terzo* acquifero, come emerge dalle analisi idrochimiche, è possibile collegare anche le acque della sorgente Biff.

Le acque mediamente mineralizzate rimangono negli orizzonti superficiali della coltre detritica sostenute dagli orizzonti impermeabili definiti dai livelli argillosi legati all'alterazione del gesso o poste a quote inferiori nelle cavità ipogee. Il livello piezometrico della falda è posto a piccola profondità, dell'ordine di 2 - 6 metri ed è suscettibile di oscillazioni (che talora superano il metro) in relazione agli apporti meteorici.

Le acque, come desunto dalle misure piezometriche effettuate, defluiscono a valle seguendo due linee di deflusso concentrato (come definito dalle isopieze rappresentate nelle cartografie in allegato) che, in accordo con l'assetto morfologico del substrato roccioso, seguono i tracciati di Via Ex Tranvia e del condotto interrato adducente le acque della sorgente Biff.

Le acque saturano i terreni limoso sabbiosi influenzando anche sulle caratteristiche meccaniche: infatti tali terreni sono caratterizzati da un modesto grado di cementazione per effetto della presenza di cristalli di solfati: a seguito dell'aumento dell'umidità (come effetto di fenomeni di infiltrazione e/o innalzamento del livello piezometrico) la struttura tende ad essere distrutta causando improvvisi cedimenti e collassi per diminuzione del volume apparente.

Le stesse acque sono responsabili, almeno lungo la direttrice di maggior deflusso, di fenomeni di suffosione, che hanno come conseguenza un indebolimento dello scheletro solido del terreno ed una sua maggiore deformabilità.

In allegato a fine testo si riporta la Carta isopiezometrica, ricavata dai dati del monitoraggio alla rete piezometrica condotto durante l'anno 2005.

6 La campagna di monitoraggio

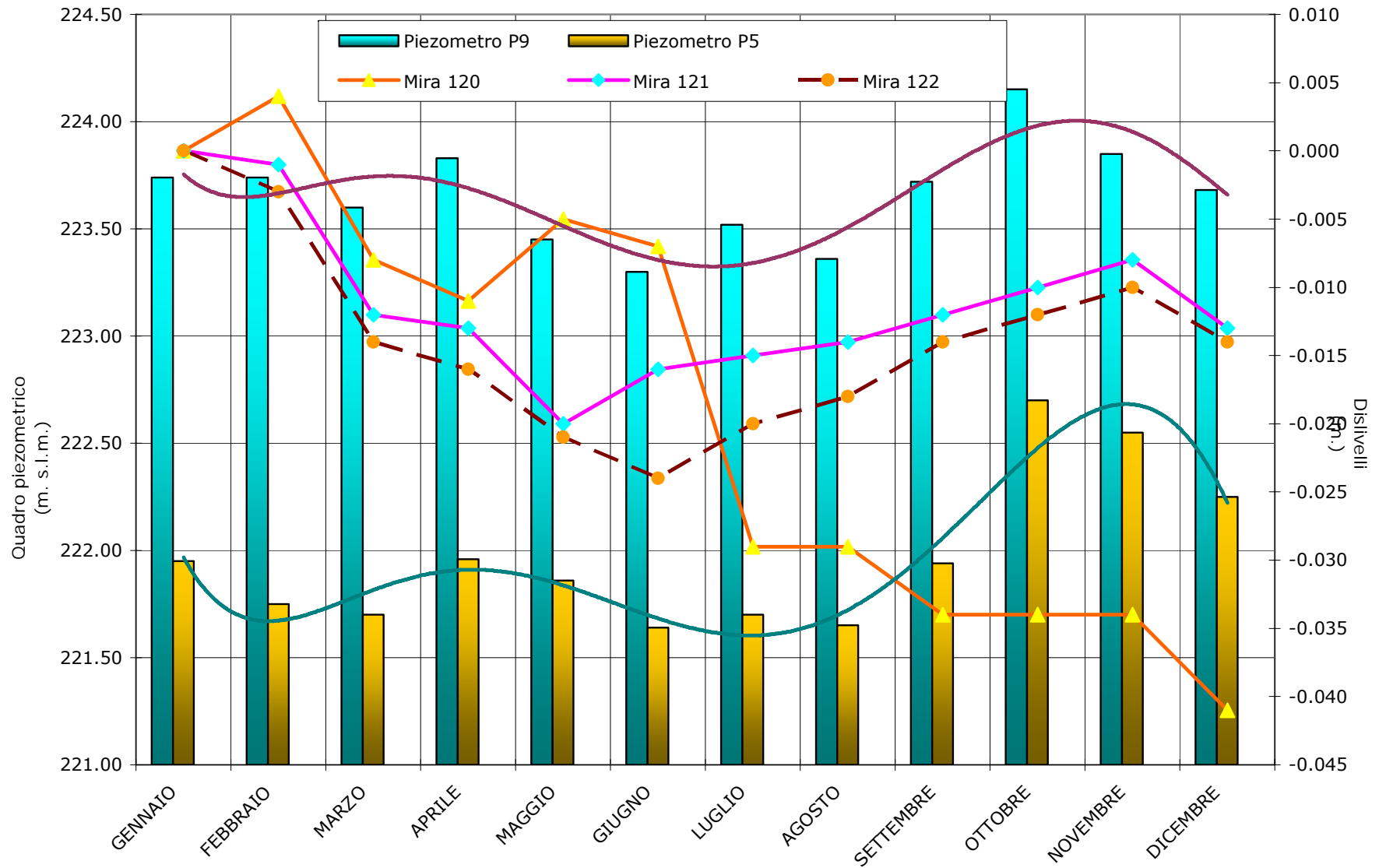
Il monitoraggio effettuato nel periodo compreso fra i mesi di gennaio e dicembre 2005 alla strumentazione installata nell'area di Trello nell'ambito del controllo dell'evoluzione dei dissesti in atto, non ha permesso di rilevare sensibili modifiche dello stato di fatto delle lesioni e della superficie topografica.

Tuttavia si segnala come nel periodo di misura siano state osservate in superficie, in ambiti non monitorati, modifiche dell'assetto topografico (formazione di depressioni) e comparsa di lesioni in strutture esistenti.

Tali aspetti sono da ricondurre ad un'evoluzione puntuale dei fenomeni riconosciuti; la mancanza di rilievi diretti di tali eventi è da ricondurre alla tipologia di monitoraggio e ad una bassa densità dei punti di controllo.

Il confronto fra le misure topografiche e le oscillazioni dei livelli piezometrici non permette di rilevare, nel loro insieme, alcuna correlazione. Un'analisi di dettaglio delle letture ai piezometri P9 e P5 e ai punti di controllo topografico 120, 121 e 122 mostrano, per il periodo in esame, un parallelismo fra le curve rappresentative: l'entità degli spostamenti non consente tuttavia di poter esprimere adeguate correlazioni.

Correlazione piezometrie - mire topografiche



7 Conclusioni

7.1 Quadro delle problematiche

Il modello geologico ricostruito evidenzia un sottosuolo caratterizzato da complesse variazioni laterali, sia in seno al substrato roccioso che ai terreni di copertura.

Dall'esame della documentazione emerge inoltre come l'area sia soggetta ad evoluzione morfologica attiva da collegare ai processi di dissoluzione nel substrato roccioso ed alle modifiche dell'equilibrio dell'assetto stratigrafico dei terreni di copertura.

In sintesi, il territorio è soggetto a processi evolutivi che si sviluppano su due livelli:

- livello profondo: interessano il substrato roccioso e sono da collegare all'evoluzione dei fenomeni di dissoluzione carsica e di trasformazione fisico chimica delle rocce evaporitiche; la velocità di questi processi è tale da non interferire, di norma, con le attività umane. Rimane comunque sempre la possibilità di accelerazioni dovute a crolli di cavità carsiche che si potrebbero manifestare improvvisamente in qualunque punto dell'area Trello;
- livello superficiale: si sviluppano nei terreni di copertura e sono da ricondurre ai processi profondi, oltre che ad erosioni differenziate (suffosione) causate da flussi canalizzati delle acque di falda, nonché a processi d'alterazione delle caratteristiche meccaniche a seguito di modifiche delle condizioni d'umidità.

I processi di dissoluzione sono favoriti da modificazioni dell'equilibrio chimico del complesso assetto idrogeologico.

In relazione alle caratteristiche granulometriche ed idrogeologiche dei terreni superficiali, non si può escludere come quota parte dei cedimenti registrati siano riconducibili ad assestamenti a seguito di fenomeni di fluidificazione occasionalmente indotta da sismi ed anche, localmente, da vibrazioni di superficie.

Si ritiene inoltre che i processi d'infiltrazione delle acque dalla superficie (per infiltrazione dagli scarichi non centralizzati e per rotture da condotti sottosuperficiali) determinino progressive riduzioni delle caratteristiche geotecniche degli orizzonti superiori; l'afflusso d'acque ricche in CO₂ e cariche di batteri influisce sulle condizioni geologiche modificando l'equilibrio chimico e favorendo i processi d'alterazioni del gesso.

I processi attivi in entrambe i livelli si traducono in superficie con collassi e fenomeni d'abbassamento del piano campagna spesso localizzati ma diffusi nel territorio in esame, con la formazione di lesioni alle strutture rigide.

7.2 Caratterizzazione sismica

Il profilo stratigrafico desunto dalle indagini condotte, in accordo a quanto previsto dalla Normativa Sismica (*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normativa tecnica per le costruzioni in zona sismica, Ordinanza PCM del 20/03/2003 n.3274*) appartiene alla

CATEGORIA S2: depositi di terreno soggetti a liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi terreno non classificabile nei tipi precedenti.

In relazione agli aspetti granulometrici ed al grado addensamento rilevato, i terreni fini immersi in falda sono potenzialmente soggetti a fenomeni di fluidificazione.

In relazione alla presenza di cavità carsiche negli orizzonti superiori delle unità evaporitiche, è possibile che in occasione di eventi sismici si registrino crolli delle volte delle cavità con conseguenti collassi degli orizzonti detritici superiori.

7.3 Aspetti idrogeologici ed idrochimici

I terreni presenti nell'area Trello sono sede di una falda idrica il cui livello freatico è posto a profondità comprese fra 3 e 6 m dal piano campagna. Non si esclude la presenza di piccole falde sospese.

Il deflusso verso lago avviene lungo direttrici definite da lenti permeabili ed, in secondo luogo, da avvallamenti del substrato roccioso.

Sulla base delle analisi idrochimiche eseguite nel settore, nell'area Trello sono state riscontrate acque ricche in solfati, calcio e magnesio.