



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

CARATTERIZZAZIONE MEDIANTE PROVE GEOFISICHE E GEOTECNICHE PER LO STUDIO DI UN MOVIMENTO ATIPICO DI UN'AREA MONTANA

GEOPHYSICS AND GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION FOR THE STUDY OF AN ATIPIC MOVEMENT IN A MOUNTAIN AREA

Nelly Zanette¹, Darinka Battelino¹, Micaela Budai¹ e Riccardo Ramella²

SOMMARIO

Nei pressi del paese di Barcis (Pordenone) è stato creato un lago artificiale per esigenze idroelettriche. Vari movimenti del terreno, osservati dalla gente locale, hanno dato inizio ad un monitoraggio degli spostamenti del terreno, per stimare la grandezza del movimento e la stabilità della zona. Le misure sono state eseguite con inclinometri, posizionati nei diversi pozzi distribuiti nella zona, con acquisizione dei dati in situ e in remoto. Inoltre sono stati usati pluviometri, tiltmetri, batimetria e controllo della falda. Sono stati raccolti campioni di terreno dai differenti pozzi e sono state fatte le prove di laboratorio. L'analisi della deformazione e della stabilità è stata effettuata con il programma PLAXIS.

I movimenti misurati hanno rilevato direzioni diverse ed erano inizialmente difficili da interpretare. L'analisi dettagliata ha rivelato una correlazione diretta fra il cambiamento del livello del lago e la direzione dei movimenti del terreno. Il fattore di sicurezza calcolato è superiore alla normativa. L'analisi di stabilità inoltre ha permesso di definire soddisfacente la stabilità a lungo termine.

Key words: Monitoraggio, Stato tensionale e deformativo, Stabilità

ABSTRACT

An artificial lake was created in the surrounding of the village of Barcis (Pordenone) for hydro-power requirements. Several earth movements, observed by local people, initiated the beginning of in situ measurements of soil displacements, in order to predict the movement range and stability of the area. The measurements were executed by inclinometers, positioned in different wells distributed in the area under examination, with both in situ and remote data acquisition. Additionally, pluviometers, tiltmeters, bathymetry and measurements of the water table were used. Soils samples were collected from different wells and tested in the laboratory. The analysis of the deformation and stability was performed by the program PLAXIS.

¹Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Ingegneria Civile, Sezione Idraulica e Geotecnica, Via Valerio 10, 34127 Trieste, Italia (Tel.: +39-040-5583471; Fax: +39-040-572082; email: zanette@ingstud.univ.trieste.it)

² Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Borgo Grotta Gigante 42/C, 34010 Sgonico, Trieste, Italia

The movements measured by inclinometers had different directions and were initially difficult to interpret. Detailed analysis revealed a direct correlation between the change in the level of the lake water and the direction of the earth movements. The stability factor calculated is higher than required by the regulation. The stability analysis also predicted satisfactory long term stability.

Key words: Monitoring, Stress-strain state, Stability

INTRODUZIONE

Nel presente articolo sarà analizzato l'effetto del cambiamento del livello del lago di Barcis (PN) sull'ambiente circostante. Sono stati notati dei movimenti del terreno, motivo per cui sono iniziate delle osservazioni e delle misure degli spostamenti in determinati punti. Saranno descritti i risultati delle misure ottenute nel corso degli anni per tutta la durata del monitoraggio, ovvero dal 1996 al 2002, e le caratteristiche geotecniche ottenute dalle prove di laboratorio effettuate sulle carote prelevate.

Per le analisi di stabilità e per il calcolo delle deformazioni è stato utilizzato il programma PLAXIS. Sono state studiate due sezioni così da avere la possibilità di simulare nel punto di incrocio, in corrispondenza di un pozzo, l'effetto tridimensionale delle deformazioni. Per ogni sezione sono state fatte due simulazioni: è stato studiato il comportamento del terreno dopo un innalzamento e un abbassamento del livello della falda. Il confronto tra le deformazioni misurate e calcolate è presentato attraverso dei grafici che evidenziano una buona correlazione. Tutte le misure delle deformazioni rilevate nel corso degli anni si sono aggirate intorno a valori piccoli. Tali movimenti, costanti e oscillatori, possono determinare un cambiamento delle caratteristiche a taglio del terreno e con ciò variare le condizioni di stabilità; perciò è stato calcolato il fattore di sicurezza per le condizioni attuali del terreno. Per ottenere un quadro a lungo termine è stata invece realizzata una verifica di stabilità usando le caratteristiche residue del terreno, in questo modo è stato possibile simulare l'effetto dei continui spostamenti del terreno, anche se minimi, in due direzioni opposte. I risultati, che sono presentati nelle conclusioni, evidenziano la situazione di sicurezza e di non pericolosità dell'oscillazione della falda e del lago.

DESCRIZIONE DELL'AREA

La zona considerata è situata a valle della confluenza di due torrenti, in una zona montana, sulla riva del lago di Barcis (PN) (fig. 1).



Tramite uno sbarramento posto sul margine settentrionale di una vallata piuttosto stretta, sulla quale si affaccia la zona in esame, in direzione Est-Ovest. A Nord sono presenti dei versanti abbastanza ripidi, mentre a Sud c'è il lago artificiale, dal quale sul lato meridionale si dipartono altre ripide pendici montuose. L'area in questione è sempre stata molto instabile per la presenza di importanti disturbi tettonici.

Fig1: Panorama del paese di Barcis (Pordenone)

Fig1: View of Barcis (Pordenone) village

Nei dintorni la catena montuosa è caratterizzata, in tutta la sua estensione, dalla presenza di una grande linea di disturbo tettonico, ad opera della quale i terreni più antichi vengono ad accavallarsi sui terreni molto più recenti, determinando un sovrascorrimento. L'unità geologica più importante, per estensione e potenza, è la Dolomia principale, alla quale sono sovrapposte formazioni carbonatiche, scaglia rossa, flysch eocenico e lembi isolati di rocce clastiche.

Il lago artificiale, mostrato in figura 1, cambia periodicamente quota, per esigenze dovute allo sfruttamento idroelettrico dell'acqua e, di conseguenza, anche il livello della falda presente in zona cambia, soprattutto nelle zone più vicine al lago. Le variazioni dell'altezza della falda nei pozzi perforati sono state misurate periodicamente con i piezometri.

Studi effettuati

Nel periodo 1993-94 nel paese di Barcis (PN) e nei dintorni sono stati eseguiti alcuni pozzi geognostici: cinque sondaggi a carotaggio continuo, cinque sondaggi a distruzione di nucleo. Tali pozzi, eseguiti a coppie, vennero strumentati con tubi inclinometrici e tubi piezometrici per le relative misure geotecniche. Gli inclinometri permettono di rilevare spostamenti rispetto ad una misura di riferimento; i piezometri permettono di misurare il livello della falda sul livello medio del mare.

Nel 1995, con la prosecuzione ed estensione del precedente studio verso oriente, furono nuovamente trivellati cinque pozzi, resi inagibili dalla corrosione, in posizioni attigue alle precedenti installazioni. Fu anche realizzato un nuovo pozzo inclinometrico con relativo piezometro, BL6, e parallelamente venne installata una stazione meteorologica.

Nel settembre 1996 la stazione BL4, ritenuta la più significativa, è stata strumentata con cinque inclinometri fissi servoaccelerometrici biassiali.

Tra il 1999 e il 2000 è stato eseguito un pozzo inclinometrico, BL7, per un totale di 150 m perforati a distruzione di nucleo per i primi 50 m ed a carotaggio continuo per il restante tratto. Il pozzo avrebbe dovuto spingersi per alcuni metri oltre il contatto, ipotizzato alla profondità di 100-150 m, tra i Calcari ed il Flysch, invece è rimasto interamente nella formazione del Flysch non riuscendo ad intercettare i Calcari, anche se la perforazione è stata spinta oltre i 152 m.

La posizione dei sette pozzi è riportata in figura 2.

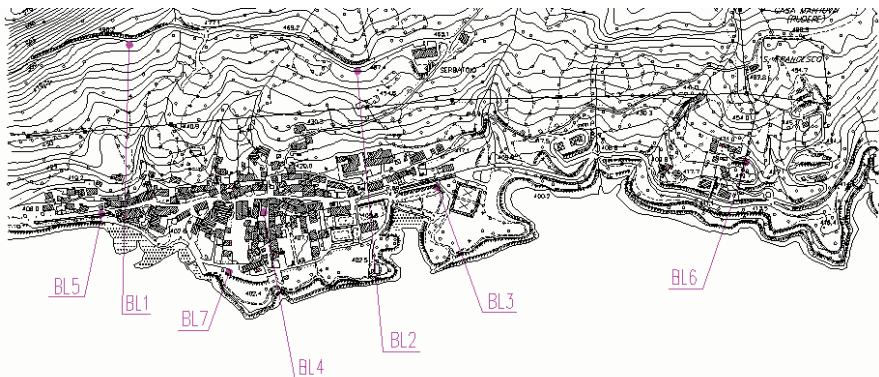


Fig2: Posizione dei pozzi geognostici

Fig2: Geognostic wells position

Sono state eseguite misure inclinometriche, tiltmetriche, piezometriche, meteorologiche e batimetriche. Di questa serie di misure sono state considerate, ai fini dello studio svolto, le misure inclinometriche e le misure piezometriche. In figura 3 si può notare la grande varietà delle direzioni di spostamento dei singoli pozzi.

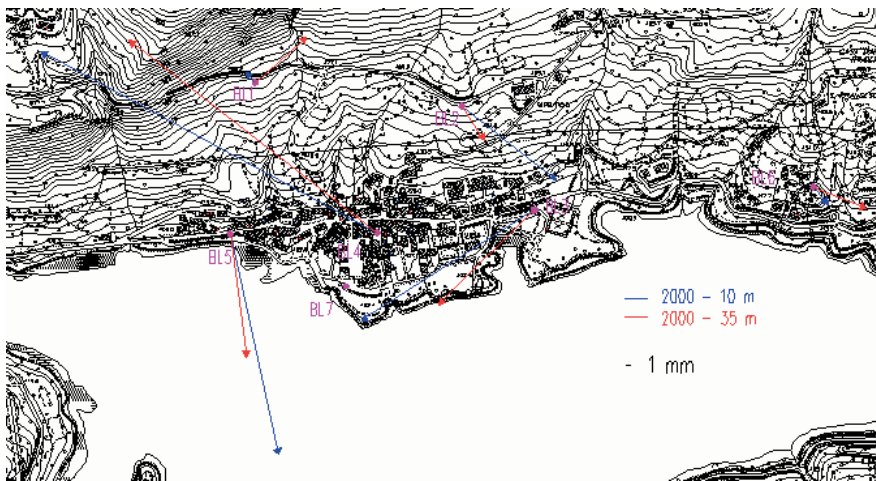


Fig3: Direzione degli spostamenti
Fig3: Displacements direction

Caratterizzazione geologica e geotecnica

La zona analizzata è sviluppata prevalentemente su depositi di conoide, in parte sommersi dalle acque del lago artificiale creato per la produzione di energia elettrica. Questa vallata è posta in direzione Est-Ovest, estendendosi per circa tre chilometri.

Si possono individuare due tipi di pendenza: una molto elevata alle quote maggiori, in corrispondenza di zone di affioramento dell'ammasso roccioso, una pendenza minore a quote più basse, con repentini cambi d'inclinazione in base al diverso tipo di terreno attraversato; partendo dall'alto e procedendo verso il basso si incontrano il substrato roccioso, detrito di falda, depositi morenici e conoidi torrentizi. Oltre al torrente che confluisce nel lago artificiale, nell'area sono visibili tracce di incisioni torrentizie, che scorrono verso Sud. In generale il regime di scorrimento è torrentizio. In questa zona non c'è mai stata presenza di falde idriche, non essendoci risorgive o sorgenti d'acqua. Secondo rilevamenti recenti l'acqua ha profondità oscillanti, diverse a seconda della posizione rispetto al lago: a quote elevate si troverebbe al contatto tra i depositi detritici ed il substrato composto da flysch, mentre a quote più basse la distanza dal piano campagna dipenderebbe dall'altezza del lago.

L'area esaminata si colloca in una fascia interessata da fenomeni di interferenza tra le strutture dinariche e quelle sudalpine. Nei dintorni del luogo analizzato la catena montuosa presente è caratterizzata in tutta la sua estensione dalla presenza di una grande linea di disturbo tettonico, ad opera della quale la Dolomia principale viene ad accavallarsi su terreni molto più recenti. La successione dei terreni viene completata dalla scaglia rossa, dal flysch eocenico, potente circa 800 m e da lembi isolati di rocce clastiche.

Dai pozzi realizzati sono stati prelevati una serie di campioni e sono state effettuate le seguenti prove di laboratorio con lo scopo di classificare e definire le caratteristiche del materiale attraversato:

- analisi granulometrica mediante vagliatura
- limiti di Atterberg
- peso di volume
- prova a taglio diretto drenato (CD)
- prova a taglio diretto non drenato (CU)

Le prove sono state effettuate presso il Laboratorio di Geotecnica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Trieste per il pozzo BL7. I risultati di queste prove sono stati utilizzati per definire le caratteristiche geotecniche da assegnare agli strati definiti nelle sezioni modellate per l'analisi.

Le due sezioni scelte per svolgere la modellazione sono disposte una - traccia 1 - lungo la riva del lago e l'altra - traccia 2 - in modo da tagliare la prima trasversalmente (figura 4).

In questo modo nel punto di incrocio delle sezioni, coincidente con il pozzo 4, è stato possibile ottenere un andamento quasi tridimensionale delle deformazioni e della loro direzione, componendo i risultati delle due sezioni. La profondità scelta per entrambe le sezioni è la massima tra quelle dei pozzi intercettati. Alla base dei carotaggi si è determinata una sezione semplificata che è stata utile dopo anche per il modello di calcolo.

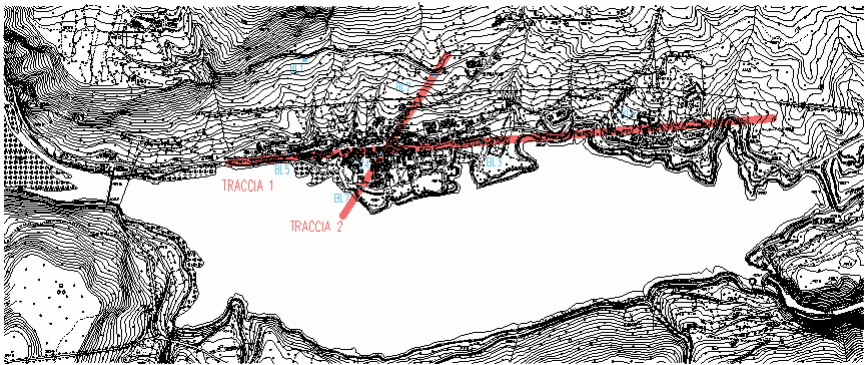
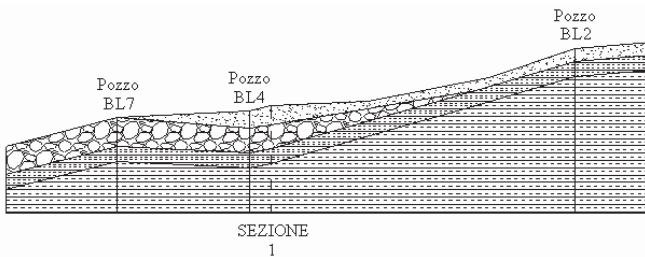


Fig4: Area in esame con le due sezioni analizzate

Fig4: Examined area with the two sections analysed

In figura 5 sono presentate le sezioni geologiche con il posizionamento delle due sezioni 1 e 2.



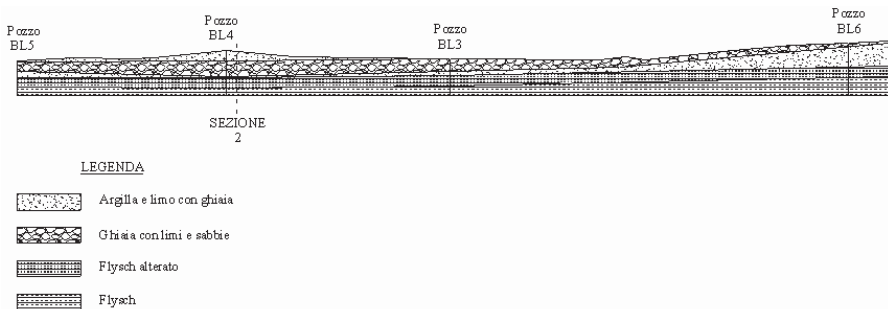


Fig5: Sezioni geologiche
Fig5: Geological sections

Il modello geologico semplificato della sezione 2 per il programma PLAXIS è presentato in figura 6. Allo stesso modo è stato determinato il modello semplificato della sezione geologica 1.

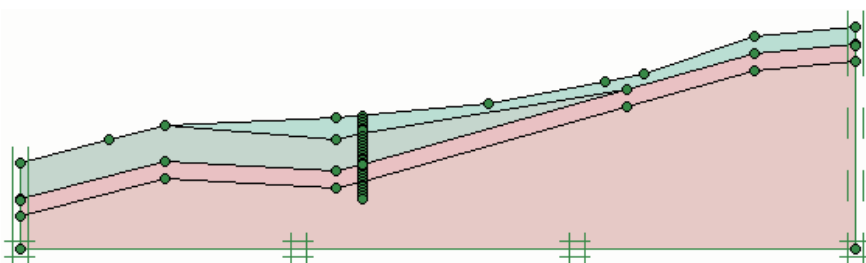


Fig6: Modello geometrico
Fig6: Geometric model

Le caratteristiche dei singoli strati sono riportate in tabella 1 e sono uguali per entrambe le sezioni. Le caratteristiche dei primi due strati sono state determinate presso il Laboratorio di Geotecnica dell'Università di Trieste; mentre i valori del flysch e del flysch alterato sono stati determinati basandosi sui dati presenti in letteratura (Onofri, 1982) e sui risultati delle prove di laboratorio (Convenzione della Regione FVG, 2003).

Tab.1: Caratteristiche geomeccaniche
Tab.1: Geomechanic characteristics

MATERIALE	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (cm/s)	k_y (cm/s)	E (kN/m ²)	ν (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
argilla e limo con ghiaia	17	17	$2 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	12000	0,3	27	20
ghiaia con limi e sabbie	19	19	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	8000	0,3	24	15
flysch alterato	21	21	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	30000	0,46	50	50
flysch	21	21	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	300000	0,46	50	80

ANALISI DELLE DEFORMAZIONI

Il calcolo è stato svolto sui modelli riportati in figura 6. Per tutte e due le sezioni è stato studiato il caso di innalzamento e abbassamento della falda.

Nel calcolo con PLAXIS il terreno è stato studiato secondo il modello di Mohr Coulomb.

Innalzamento della falda

In figura 7 si riportano per la sezione 1 gli spostamenti totali per il caso di innalzamento della falda dalla quota 397,64 m s.l.m.m. alla quota 402,10 m s.l.m.m. Il massimo spostamento è di $9,75 \cdot 10^{-3}$ m. La direzione degli spostamenti è verso l'alto.

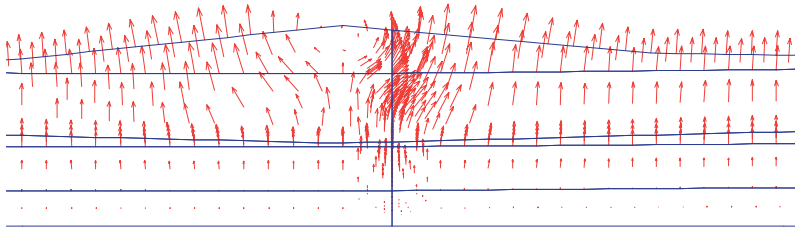


Fig7: Sezione 1 - Spostamenti intorno al pozzo BL4

Fig7: Section 1 - Displacements around the well BL4

In figura 8 sono presentati gli spostamenti totali per la sezione 2 per il caso di innalzamento della falda dalla quota 397,64 m s.l.m.m. alla quota 402,10 m s.l.m.m. Il massimo spostamento è di $52,21 \cdot 10^{-3}$ m. La direzione dello spostamento è verso l'alto.

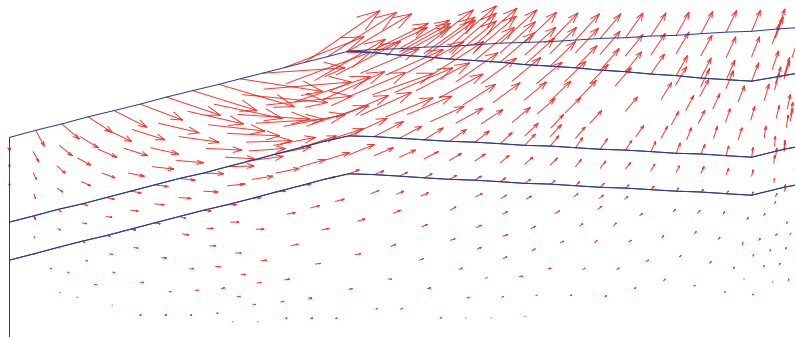


Fig8: Sezione 2 - Spostamenti nella zona in riva al lago

Fig8: Section 2 - Arrows of displacements near the lake

Abbassamento della falda

In figura 9 si riportano per la sezione 1 gli spostamenti totali per il caso di abbassamento della falda dalla quota 400,40 m s.l.m.m. alla quota 397,50 m s.l.m.m. Il massimo spostamento è di $11,65 \cdot 10^{-3}$ m. La direzione degli spostamenti è verso il basso.

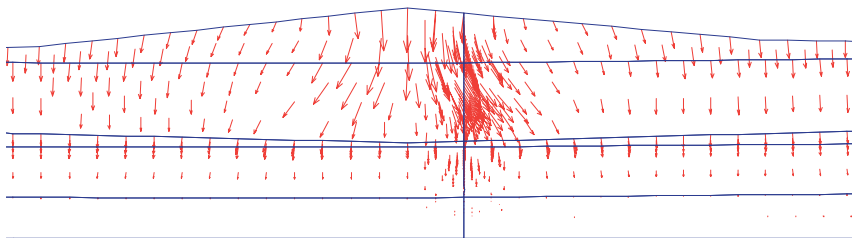


Fig9: Sezione 1 - Spostamenti intorno al pozzo BL4
Fig9: Section 1 - Displacements around the well BL4

In figura 10 si riportano per la sezione 2 gli spostamenti totali per il caso di abbassamento della falda dalla quota 400,40 m s.l.m.m. alla quota 397,50 m s.l.m.m. Il massimo spostamento è di $87,67 \cdot 10^{-3}$ m. La direzione degli spostamenti è verso il basso.

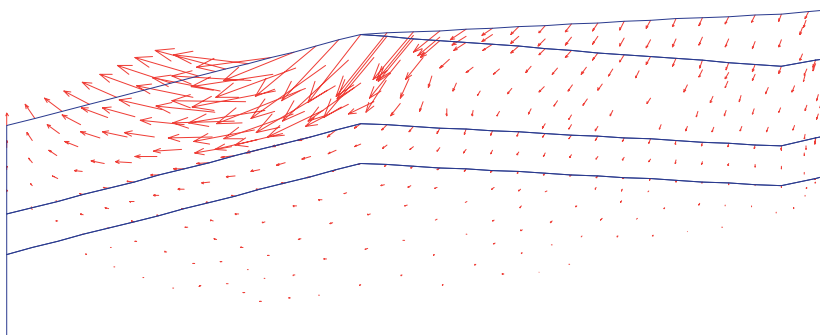


Fig10: Sezione 2 - Spostamenti nella zona in riva al lago
Fig10: Section 2 - Arrows of displacements near the lake

In figura 11 è riportata la direzione dello spostamento calcolato e misurato nel pozzo BL4 nel caso di innalzamento della falda (a) e abbassamento della falda (b).

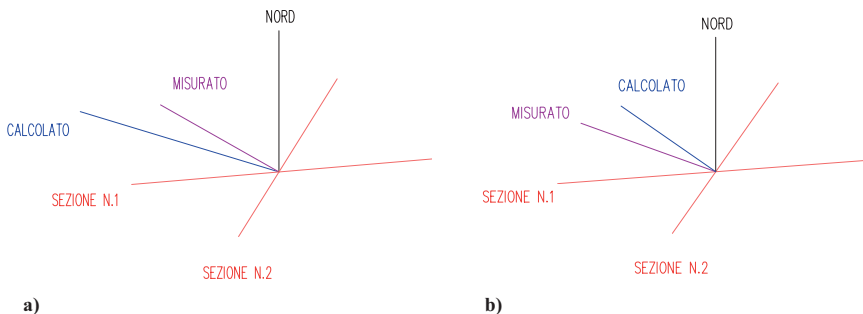


Fig11: Confronto tra angoli misurati e calcolati
Fig11: Comparison between measured and calculated angles

In figura 12 è presentato un confronto tra gli spostamenti calcolati e quelli misurati nei due casi analizzati: innalzamento e abbassamento della falda.

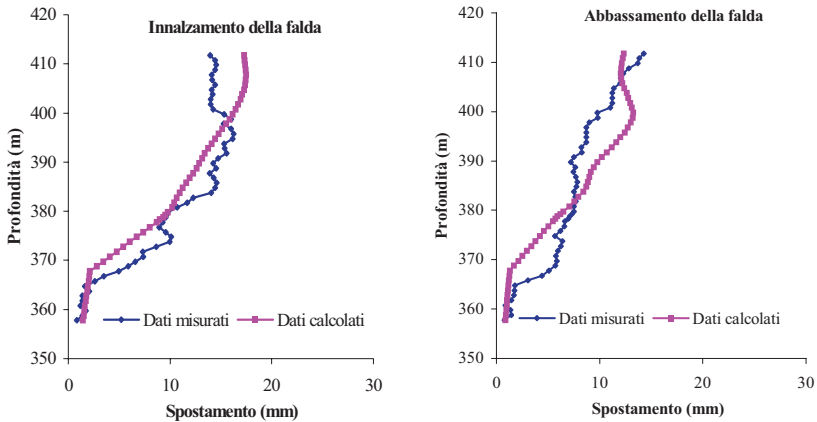


Fig12: Confronto tra gli spostamenti misurati e gli spostamenti calcolati

Fig12: Comparison between measured and calculated displacements

Gli spostamenti misurati hanno una tendenza comune: i primi 28-30 m, costituiti da ghiaie, argille, limi più o meno mescolati e talvolta marne, traslano rigidamente, mentre i sottostanti metri, formati da flysch, si deformano con la presenza a volte di una zona con potenza di alcuni metri di transizione tra la rigidità della parte superiore e la deformazione. Non c'è una direzione generale per gli spostamenti, infatti ogni pozzo ha una propria direzione diversa, che però si mantiene all'incirca costante nel corso degli anni.

STABILITA' DEL TERRENO

Nella figura 13 sono presentate le isolinee delle deformazioni tangenziali della sezione 1 nel caso di innalzamento della falda. Il colore rosso presenta i valori più critici per la stabilità del terreno. I fattori di sicurezza, determinati con le caratteristiche presentate in tabella 1, sono circa pari a 4.4.



Fig13: Sezione 1 – Isolinee delle deformazioni tangenziali – Innalzamento della falda

Fig13: Section 1 – Shadings of shear strains – Raising of the water table

L'analisi della stabilità per la sezione 2, nel caso di innalzamento della falda, ha fornito fattori di sicurezza intorno a 1.6 (figura 14).

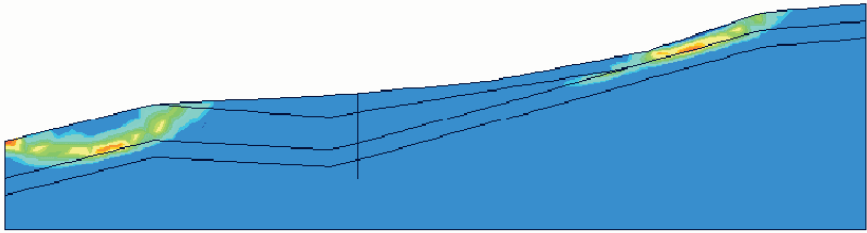


Fig14: Sezione2 – Isolinee delle deformazioni tangenziali – Innalzamento della falda

Fig14: Section 2 – Shadings of shear strains – Raising of the water table

Mentre nel caso di abbassamento della falda i fattori di sicurezza nelle zone di massime deformazioni tangenziali sono intorno a 4.4 per la sezione 1 e intorno a 1.74 per la sezione 2.

Il costante innalzamento e abbassamento della falda crea movimenti, seppur minimi, che possono portare ad una diminuzione delle caratteristiche di taglio del terreno; si ha un'ulteriore caduta di resistenza che si attesta su un valore residuo, caratterizzato dalla coppia di parametri:

$$c' = 0$$

$$\phi' = \phi'_R \leq \phi'_P$$

Sono state fatte nuove analisi con i valori delle caratteristiche geomeccaniche residue presentate in tabella 2. Per i primi due strati sono stati determinati i valori residui con la prova a taglio anulare; mentre per il flysch alterato sono stati assunti valori che rientrano nei limiti inferiori dei range presenti in letteratura (Onofri, 1982).

Tab.2: Caratteristiche geomeccaniche con i valori residui

Tab.2: Soil mechanics characteristics with residual values

MATERIALE	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	k_x (cm/s)	k_y (cm/s)	E (kN/m ²)	ν (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)
argilla e limo con ghiaia	17	17	$2 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}	12000	0,3	0	14
ghiaia con limi e sabbie	19	19	$5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	8000	0,3	0	10
flysch alterato	21	21	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	30000	0,46	20	35

In questa simulazione è molto importante il calcolo della stabilità. Come previsto le zone critiche cambiano, come si può vedere in figura 15, dove sono riportate le isolinee delle deformazioni tangenziali per la sezione 1 nel caso di innalzamento della falda.



Fig15: Sezione 1 – Isolinee delle deformazioni tangenziali – Innalzamento della falda

Fig15: Section 1 – Shadings of shear strains – Raising of the water table

In figura 16 sono presentate le isolinee delle deformazioni tangenziali per la sezione 2 nel caso di innalzamento della falda determinate con i valori residui.

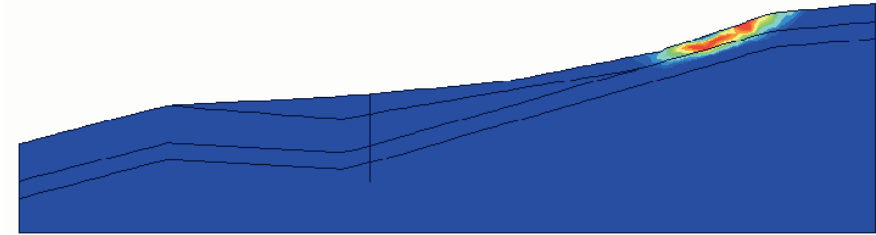


Fig16: Sezione 2 – Isolinee delle deformazioni tangenziali – Innalzamento della falda
Fig16: Section 2 – Shadings of shear strains – Raising of the water table

I punti in cui è stato fatto il calcolo del fattore di sicurezza si trovano nelle zone di massime deformazioni tangenziali e il fattore di sicurezza, in condizioni di caratteristiche residue, si attesta intorno a 3.44 per la sezione 1 e intorno a 1.35 per la sezione 2.

Questa simulazione ci ha permesso di giungere alla considerazione che, per quanto riguarda la stabilità a lungo termine, non c'è pericolo per la zona analizzata, essendo i fattori di sicurezza al di sopra dei valori ritenuti limite dalle normative.

CONCLUSIONI

- Le analisi presentate nell'articolo hanno verificato la dipendenza diretta tra l'oscillazione della falda e la quota del lago e gli spostamenti e le deformazioni del terreno.
- Le deformazioni sono piccole e cicliche, in direzioni opposte, ma non sono in crescita come si può notare dalla figura 17.

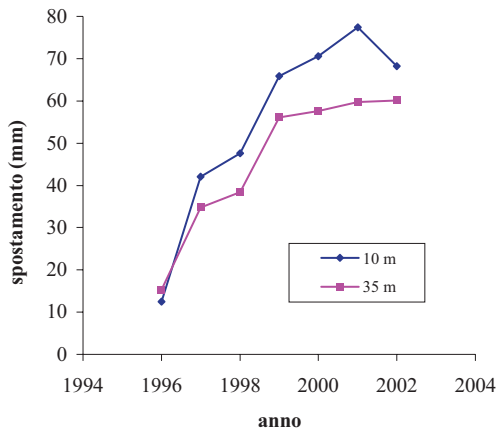


Fig17: Andamento degli spostamenti nel tempo
Fig17: Displacements trend vs. time

- Il minimo fattore di sicurezza determinato sia per l'innalzamento che per l'abbassamento della falda è pari a 1.6.
- Il costante innalzamento e abbassamento della falda crea movimenti, seppur minimi, che possono portare ad una diminuzione delle caratteristiche a taglio del terreno, che raggiungono il valore residuo. I cedimenti sono aumentati di circa il 2% ed il fattore di sicurezza arriva a 1.35.
- Da tutte le analisi svolte e dalle misure finora eseguite si può concludere che l'effetto del lago artificiale non può creare una situazione critica per il paese, ma comunque si suggerisce di continuare il monitoraggio anche in futuro per seguire l'andamento di queste deformazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Carulli G.B., Ponton M. (1992): "Interpretazione strutturale profonda del settore centro carnico-friulano". *Studi Geologici Camerti*, Camerino, Vol.CROP 1 – 1°; 275-284.
- Castellarin A. (1982): "Introduzione alla geologia del Sudalpino". *Guida alla geologia del Subalpino centro-orientale, Guide geol. Reg. S.G.I.*, Bologna; 23-40.
- Grandesso P., Stefani C. (1998): "La successione Aquitaniano-Burdigaliana di Piancavallo e Andreis (Alpi Carniche Occidentali, Italia)" *Atti Tic. Sc. Terra*, Padova, Vol.7; 59-72.
- Onofri R. (1982): "Caratteristiche geolitologiche e geomeccaniche del Flysch nella Provincia di Trieste". *Istituto di Geologia e Paleontologia dell'Università degli Studi di Trieste*.
- PLAXIS – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (1998). Balkema. Rotterdam.
- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (1992): "Convenzione N.5705: Indagine sul rischio di caduta massi e controllo della stabilità dei terreni nella zona di Barcis."
- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (1994): "Convenzione N.6267: Prosecuzione ed estensione dell'indagine sul rischio di caduta massi e controllo della stabilità dei terreni nella zona di Barcis."
- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2003): "Convenzione N.7037: Prosecuzione, approfondimento ed estensione dello studio sulla stabilità dei terreni e sul rischio di caduta massi nella zona di Barcis (PN)."
- Saint-Marc P. (1963): "Etude geologique de la region de Barcis (Alpes meridionales, province d'Udine, Italie)". *Bull. Soc. Geol. de France*, Paris. Vol.V ; 803-808.
- Salvini G. (1969): "Osservazioni geologiche sui dintorni di Barcis (Prealpi Friulane)". *Riv. Ital. Paleont.*, Milano, Vol.75, n.1; 107-121.