INDAGINE GEOELETTRICA A SUPPORTO DELLA VERIFICA DEL MATERIALE DI COPERTURA DI UNA DISCARICA DISMESSA NEL PIEMONTE SUDOCCIDENTALE

D. Barbero[1], M. Naldi[2]
[1] *Studio Geologico e Laboratorio Geotecnico Dott. Diego Barbero, Italy*
[2] *Techgea s.r.l., Italy*

Introduzione. Misure geofisiche indirette, quali resistività elettrica e polarizzazione indotta, associate a indagini geognostiche (scavi geognostici e prove di permeabilità in situ e in laboratorio), rappresentano un valido strumento per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del materiale di copertura di vasche di discariche.

Lo studio in esame riguarda le due vasche della discarica di Lesegno in Loc. Prata (Piemonte SW), attualmente in fase di gestione *post-mortem*, che presentano criticità riguardanti la quantità di percolato presente, che non pare diminuire nel tempo nonostante gli ingenti volumi smaltiti annualmente. La discarica non presenta un *capping* superficiale con telo di impermeabilizzazione, ma pare essere costituita da un pacchetto composto da uno strato di drenaggio (ghiaia), uno strato impermeabile argilloso e terreno vegetale superficiale. Inoltre, la discarica poggia direttamente su terreni riferibili al substrato terziario (Marne di Paroldo) senza un sistema di impermeabilizzazione continuo.

Assetto geologico-strutturale. La discarica oggetto delle indagini si colloca nei Rilievi collinari delle Langhe, modellati nella successione terrigena, con spessore massimo di 5-6000 m, di età compresa tra l'Oligocene e il Miocene Sup. e indicata come Bacino Terziario Piemontese (BTP). Il BTP costituisce un bacino post-collisionale situato al limite tra la catena alpina ed appenninica, le cui formazioni corrispondono a depositi molassici di riempimento di fossa. La successione sedimentaria del BTP costituisce una larga monoclinale, con immersione verso NO e inclinazione compresa tra 8° e 15°, costituita da diversi depositi in rapporti di sovrapposizione e interdigitazione tra loro. Su base genetica delle formazioni si possono individuare tre principali unità (Foglio Ceva; Piana *et al*., 2017): 1) Unità oligocenica con depositi continentali di delta-conoide e marino-marginali: F. di Molare; 2) Unità oligo-mioceniche con depositi di piattaforma, scarpata e mare profondo risedimentati: Formazione di Rocchetta, Formazione di Monesiglio, Marne di Paroldo, Formazione di Cortemilia, Formazione di Cessole, Formazione di Cassinasco, Formazione di Murazzano, Formazione di Lequio, Marne di Gallo d'Alba, Arenarie di Diano d'Alba, Marne di S. Agata Fossili; 3) Unità Messiniana con depositi marino-marginali ed evaporitici: Formazione gessoso-solfifera.

Il substrato dell'area indagata è costituito da marne, marne siltose e marne argillose grigie e grigio-azzurre con subordinate intercalazioni di arenarie grigiastre in strati sottili, riferibili alle Marne di Paroldo (Burdigagliano-Langhiano), riferibili a un ambiente di sedimentazione marino profondo emipelagico (facies marnoso-siltose) con episodi torbiditici (facies sabbioso-arenacee). Le Marne di Paroldo risultano stratigraficamente comprese tra le Formazioni di Monesiglio inferiormente e di Murazzano superiormente, e mostrano rapporti eteropici con la Formazione di Cortemilia.

Metodi. La discarica in esame è costituita da due vasche collocate su due diversi livelli: una cella di monte R.S.A.U. a una quota media 450 m s.l.m. e una cella di valle R.S.U. a quota media 425 m s.l.m.. Al fine di definire le caratteristiche del materiale di copertura delle due vasche e individuare la presenza di possibili ingressi di acqua da falde sospese esterne, con particolare riferimento al versante di monte, sito a Est della vasca R.S.A.U., è stata effettuata una campagna di indagini geofisiche, idrogeologiche e geotecniche che si compone di (Fig. 1):

- 8 stendimenti geoelettrici, di cui 3 nella vasca R.S.A.U. e 5 nella vasca R.S.U.;
- 1 stendimento geoelettrico esterno al corpo rifiuti, a monte della vasca R.S.A.U;
- 12 scavi esplorativi eseguiti con escavatore a benna rovescia con lo scopo di verificare la potenza dello strato di *capping* superficiale e, contestualmente, verificarne le caratteristiche geologiche (S.G. in Fig. 1);
- 6 prove di permeabilità in situ con permeametro di Boutwell per la verifica delle infiltrazioni verticali di acqua meteorica verso il corpo rifiuti (P in Fig. 1);
- 6 prove di permeabilità a carico variabile eseguite in laboratorio su campioni indisturbati prelevati in corrispondenza dei siti di esecuzione delle prove in situ Boutwell.

In particolare, la misura dei valori di resistività elettrica e polarizzazione indotta, misurata come parametro di caricabilità, è stata realizzata con un georesistivimetro Syscal-Pro a 72 canali (*Iris Instruments*, FR). Per garantire la risoluzione necessaria a caratterizzare il materiale di copertura (avente spessore di circa 2 m) e raggiungere una profondità di indagine di circa 15-20 m (corrispondente alla profondità massima stimata del fondo delle vasche) è stato utilizzato un

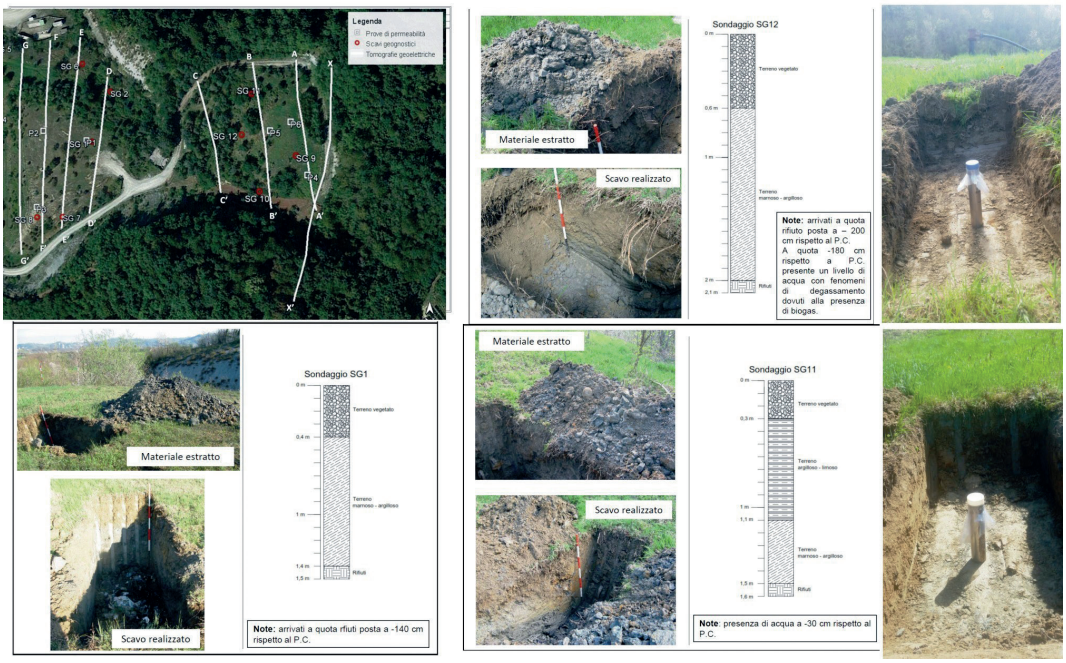

Fig. 1 - Ubicazione delle indagini geofisiche delle indagini geognostiche. Pozzetti esplorativi più rappresentativi con relativa stratigrafia e prove Boutwell.

interasse elettrodico di 2 m, con configurazione elettrodica *multi-gradient*. Tale configurazione permette l'acquisizione di un gran numero di quadripoli di misura, con un elevato grado di dettaglio laterale, consentendo così di discriminare eventuali variazioni laterali nel modello di resistività elettrica e IP. Le sequenze di misura sono state generate con l'algoritmo *Electre Pro* (*Iris Instruments*, FR). L'elaborazione dei dati geoelettrici è stata effettuata in accordo agli algoritmi sviluppati da Loke e Barker (1996).

I programmi utilizzati sono stati i seguenti:

- Prosys II (Iris Instruments, FR): esegue un pre-filtraggio dei dati;
- Res2DInv (Geotomo Software Inc., Mal): esegue l'inversione numerica dei dati e restituisce le sezioni verticali di resistività elettrica reale e IP;
- Surfer 13.2.438 (Golden Software, USA): esegue il *gridding* bi-dimensionale dei dati (metodo *kriging*) e la rappresentazione grafica delle sezioni tomografiche 2-D.

Risultati. *Indagini geoelettriche.* *Sezione verticali di resistività elettrica reale e polarizzazione indotta esterna alla discarica*. La sezione X-X' (Fig. 2), effettuata a monte della vasca R.S.A.U., mostra una distribuzione di resistività elettrica priva di variazioni significative, con valori globalmente compresi nell'intervallo 30÷70 Ωm, e valori di polarizzazione indotta (IP) molto bassi (entro i 10 mV/V). Tali valori suggeriscono quindi che il terreno indagato è quindi associabile alle marne del substrato. Non sono state inoltre rilevate venute d'acqua importanti, tali da modificare significativamente la resistività al di sotto dell'area di indagine. I bassi valori di IP suggeriscono pertanto sia l'assenza di orizzonti argillosi che di percolato. Nella porzione Nord della sezione si nota l'influenza del corpo rifiuti adiacente, che provoca un abbassamento dei valori di resistività (fino a 20 Ωm) e un contestuale e minimo aumento dei valori di IP (fino a 15-20 mV/V).

Sezioni verticali di resistività elettrica reale e polarizzazione indotta nel corpo rifiuti. Strato di copertura. Lo strato di copertura è ben riconoscibile dal contrasto di polarizzazione indotta (IP) con i sottostanti rifiuti, i quali presentano valori generalmente superiori a 40 mV/V (Fig. 2 sez. B-B'). Lo spessore dello strato di copertura (1.5 ÷ 2.5 m) è stato confermato dallo scavo dei pozzetti geognostici: tale strato presenta valori di IP molto bassi, inferiori a 10 mV/V, del tutto analoghi a quelli ottenuti dall'elaborazione della sezione X-X' sui terreni marnosi. L'assenza di matrice argillosa è confermata dai valori di resistività elettrica, compresi tra 30 e 80 Ωm (i valori dei terreni argillosi sono generalmente compresi tra 5 e 10 Ωm). In alcuni punti si

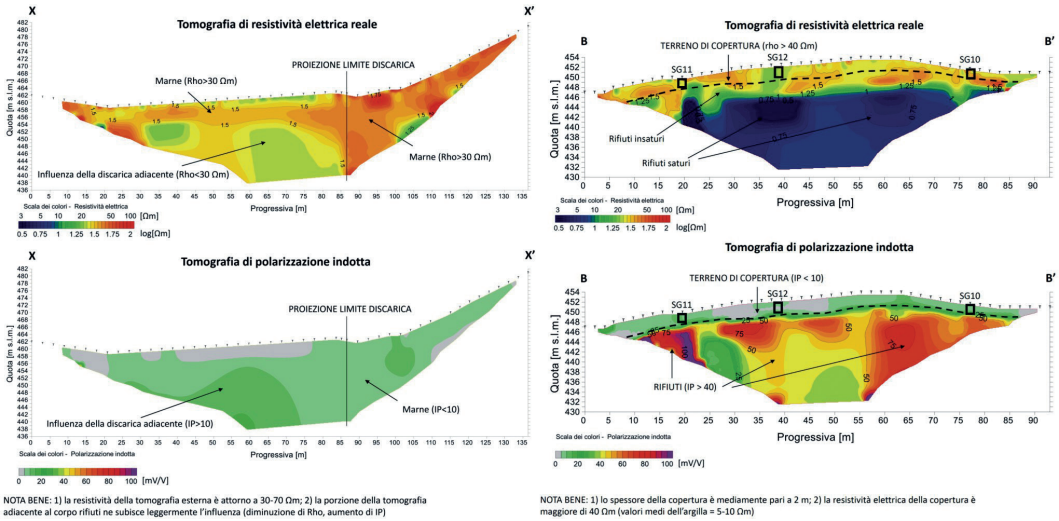

Fig. 2 - Sezioni verticali di resistività elettrica reale e polarizzazione indotta esterna al corpo rifiuti (X-X') e vasca di monte R.S.A.U. (B-B').

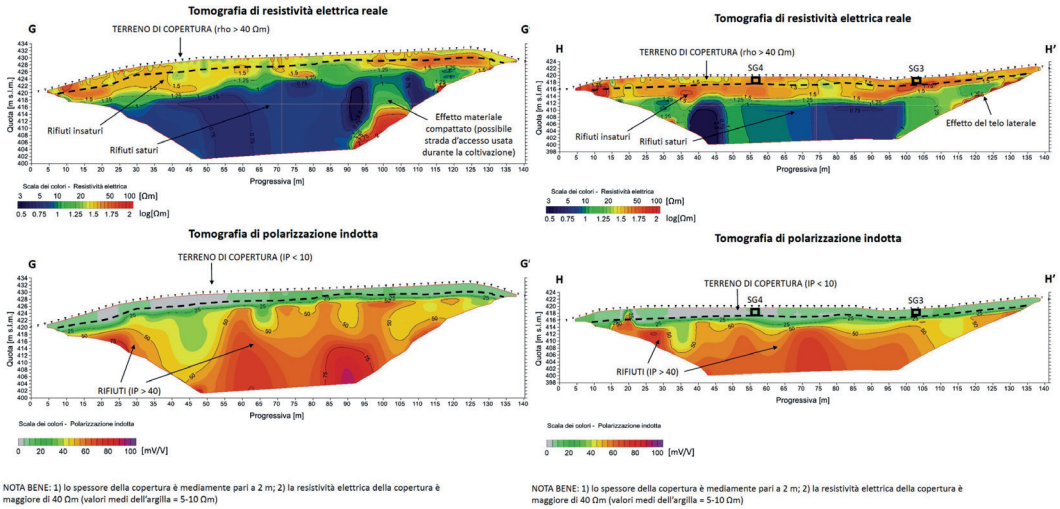

Fig. 3 - Sezioni verticali di resistività elettrica reale e polarizzazione indotta (G-G' e H-H') vasca di valle R.S.U.

rileva un abbassamento locale dei valori di resistività elettrica (attorno ai 20 Ωm). I sondaggi SG11 e SG12 hanno evidenziato come tali abbassamenti di resistività elettrica coincidano con un locale aumento del contenuto d'acqua di origine meteorica o sub-superficiale (Fig. 2 sez. B-B'). Infine, lo spessore dello strato di copertura non è univocamente definibile sulla base dell'elettrostrato superficiale. Tale strato superficiale, come verificato dallo scavo dei pozzetti geognostici, è da associare in parte al terreno di copertura del corpo rifiuti e in parte allo strato superiore dei rifiuti stessi insaturi (con basso o nullo contenuto di percolato).

Corpo rifiuti. Il corpo rifiuti presenta valori di resistività elettrica decisamente bassi (5÷15 Ωm) e valori di polarizzazione indotta medio-alti (40÷60 mV/V). La resistività elettrica della parte più superficiale del corpo rifiuti mostra valori simili ai terreni di copertura: ciò può essere messo in relazione al fatto che i rifiuti nella loro porzione più superficiale siano verosimilmente insaturi. Il confronto con i valori di IP, calibrati con le stratigrafie dei pozzetti geognostici eseguiti, mette in evidenza il contatto tra i rifiuti insaturi e i rifiuti saturi (percolato). Valori di resistività pressoché uguali lungo tutto lo spessore delle sezioni non consentono di definire con precisione la base di appoggio dei rifiuti. Al contrario, la presenza di un telo plastico impermeabile di contenimento continuo avrebbe, invece, evidenziato un passaggio netto a valori di resistività più elevati. In altre parole, il telo di contenimento presente in situ, mostra delle discontinuità che consentono il passaggio della corrente elettrica. L'unica sezione che mostra un possibile effetto del telo di contenimento laterale è visibile sulla sezione H-H' (Fig. 3). Nelle altre sezioni si rileva, talora, un'anomalia interna al corpo rifiuti riconducibile a una possibile strada di accesso realizzata per le operazioni di coltivazione della discarica (Fig. 3 sez. G-G').

Pozzetti esplorativi. Gli scavi effettuati in 12 punti della discarica (8 punti sulla vasca R.S.U., 4 punti sulla vasca R.S.A.U.) hanno consentito di verificare che lo spessore del materiale di copertura sovrastante i rifiuti è compreso tra 1.5÷2.5 m (Fig. 1). La natura di tale materiale, a prevalente composizione argillosa, suggerisce che derivi dalle terre di scavo prodotte dalle operazioni di riprofilatura del versante durante la operazioni di coltivazione. Si osserva infine come le anomalie di bassa resistività elettrica nei pozzetti SG11 e SG12 siano correlabili con la presenza di acqua negli scavi.

Prove di permeabilità. Le prove di permeabilità sono state effettuate sia in situ, con il permeametro di Boutwell, che in laboratorio su campioni indisturbati prelevati a lato della postazione in cui è stata realizzata la prova Boutwell (Fig. 1). In ciascun punto di prova è stato ottenuto un valore di conducibilità idraulica verticale, attribuibile al terreno sottostante e

direttamente circostante il permeametro. L'intervallo di variazione della conducibilità idraulica ottenuto è pari a $K_v = 9.08 \cdot 10^{-8} \div 1.23 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Se si assume come valore di riferimento per strati argillosi di copertura $K = 10^{-6}$ cm/s, solo le prove P1 e P4 hanno dato un valore di permeabilità leggermente superiore (Tab. 1). I risultati ottenuti dalle prove di permeabilità di laboratorio trovano corrispondenza con i valori ottenuti in situ, pur risultando sempre leggermente superiori, e nell'intervallo compreso tra $5.16 \cdot 10^{-7} \div 2.27 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Ciò è dovuto all'inevitabile disturbo nel campionamento in situ, nella confezione dei provini in laboratorio e al tipo di terreno marnoso-argilloso facilmente fratturabile e con basso contenuto naturale d'acqua.

Tab. 1 - Risultati prove di permeabilità.

Punto di prova	Prova Boutwell K (cm/s)	Prova con permeametro in laboratorio K (cm/s)
P1	1.34·10-6	3.40·10-6
P2	9.08·10-8	2.06·10-7
P3	1.32·10-7	4.26·10-7
P4	1.23·10-6	2.27·10-6
P5	3.65·10-7	4.07·10-7
P6	1.98·10-7	5.16·10-7

Considerazioni conclusive. Le indagini geoelettriche (resistività elettrica e polarizzazione indotta), associate a misure puntuali di permeabilità dei terreni e a indagini geognostiche di esplorazione del sottosuolo di calibrazione, si sono rilevate un valido strumento per la caratterizzazione stratigrafica e idrogeologica del sottosuolo dell'area di discarica.

L'utilizzo di tale metodologia d'indagine indiretta ha permesso di verificare come lo strato di copertura (spessore 1.5÷2.5 m) di entrambe le vasche della discarica non possieda caratteristiche idrauliche soddisfacenti a prevenire infiltrazioni di acqua verso il corpo rifiuti. Esso non è composto da materiale a prevalenza argillosa, ma bensì da terreno vegetato e suolo marnoso debolmente argilloso. I risultati dell'indagine mettono in luce pertanto l'analogia tra il terreno di marnoso debolmente limoso-argilloso, che costituisce il versante sul quale si appoggia la discarica, e il materiale posto a copertura dei rifiuti; tale considerazione è ulteriormente suffragata dai risultati delle sezioni geoelettriche, le quali individuano in tutti i casi un livello superficiale con valori di IP molto bassi. Inoltre, la presenza di acqua in due pozzetti esplorativi nella vasca superiore, suggerisce una possibile provenienza meteorica, connessa ad acque di ruscellamento provenienti dal versante a monte, con successiva "stagnazione" nello strato argilloso-marnoso di copertura. Tale ipotesi è suffragata dall'assenza di flussi canalizzati di acqua sotterranea all'interno della formazione rocciosa a monte della discarica, come verificato dall'analisi delle sezioni geoelettriche elaborate.

I valori di conducibilità idraulica misurata in situ risultano superiori in almeno due casi al valore di riferimento di 10^{-6} cm/s. Le prove di laboratorio evidenziano valori di conducibilità idraulica ancora maggiori, giustificabili dal disturbo inevitabile provocato nella fase di prelievo e di lavorazione dei campioni. Infine, le indagini geoelettriche non hanno evidenziato la presenza di uno strato di discontinuità resistiva alla base e lateralmente al corpo rifiuti: ciò non esclude la presenza del telo in HDPE di impermeabilizzazione, ma evidenzia come per presenza di diffuse discontinuità del telo non siano in grado di isolare elettricamente la discarica.

Bibliografia

Loke, M.H., Barker, R.D.; 1996: Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophysical prospecting, 44, 499-523.

Piana F., Fioraso G., Irace A., Mosca P., d'Atri A., Barale L., Falletti P., Monegato G., Morelli M., Tallone S., Vigna G.B.; 2017: Geology of Piemonte Region. Journal of Maps, Francis & Taylor Group Publ., UK.

Servizio Geologico d'Italia; 1970: Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 100.000, Foglio 81 Ceva II edizione. Roma