MANLIO CERRONI

On. Ursula Von der Leyen
Presidente Commissione Europea
200 Rue de la Loi
Palazzo Berlaimont – Bruxelles

Roma, 12 febbraio 2024

Io sottoscritto, Manlio Cerroni, ideatore e creatore del complesso industriale della Città delle Industrie Ambientali di Malagrotta (Roma –Italia) autorizzato dal Piano Regionale dei Rifiuti della Regione Lazio del 2012 a trattare una quota rilevante dei rifiuti indifferenziati di Roma,

con la presente espongo quanto segue:

ad oggi, 12 febbraio 2024, sono in fase di assegnazione i bandi pubblicati il 28 e 31 luglio 2023 dal "Commissario Unico della Presidenza del Consiglio dei Ministri per la realizzazione degli interventi necessari all'adeguamento alla normativa vigente delle discariche abusive presenti sul territorio nazionale", Gen.Vadalà, incaricato con Determinazione PCDM del 18.02.2022.

Ricordo in sintesi:

A) I bandi riguardano:

1) "*Appalto integrato su progetto di fattibilità tecnica ed economica (PFTE) per la progettazione esecutiva e i lavori di realizzazione della nuova cinturazione (Polder) della discarica di Malagrotta, al fine di permettere la costituzione di un nuovo sistema di confinamento/isolamento laterale della discarica medesima"* per un importo complessivo di € 89.341.421,46 e termine per il ricevimento delle offerte al 6.10.2023

2) *"Appalto integrato su progetto di fattibilità tecnica ed economica (PFTE) per la progettazione esecutiva e i lavori di copertura della discarica, la realizzazione dell'impianto di emungimento e trattamento del percolato e della captazione del biogas, presso la discarica di Malagrotta"* per un importo complessivo di € 123.450.799,43 e termine per il ricevimento delle offerte al 10.10.2023

B) Con Delibera della PDCM del 24.03.2017 il Gen.Vadalà è stato nominato Commissario Unico alla bonifica delle discariche considerate **abusive** e **inquinate** dal diritto comunitario, per la riconduzione a norma delle quali è prevista la possibilità di avvalersi di un apposito Commissario e di fondi comunitari e/o nazionali, in sostanza di fondi pubblici.

Per quanto riguarda la discarica di Malagrotta non sono validi entrambi i requisiti invocati dalla norma europea e nazionale in quanto:

Viale del Poggio Fiorito n. 63 – 00144 Roma - Tel. 065920341 Fax 065916871
www.manliocerroni.it - manlio9gennaio14@gmail.com

la qualifica di abusiva

Tale circostanza viene esclusa da ben 36 titoli autorizzativi succedutisi nell'arco temporale di attività della discarica di Malagrotta, dal 1975 al 31.09.2013 (data di cessazione dei conferimenti) e dalla decisione del Parlamento Italiano che in sede di conversione del D.l. n.13 del 24.02.2023 ha emendato la stesura originaria sopprimendo la parola "abusiva" (cfr.art.52, comma 2, Legge 21 aprile 2023, n.41).

Ciò nonostante In entrambi i bandi, ancora oggi, pubblicati sul sito **utanapoli.it/bandi.asp**, la discarica di Malagrotta viene qualificata come abusiva.

la qualifica di sito inquinato

Il concetto di bonifica è spesso erroneamente richiamato in tutta questa vicenda. Va tenuto in proposito presente che l'attività di "bonifica di siti contaminati" è prevista al Titolo V del D.lgs. n.152/06, "Norme in materia ambientale" quale intervento conseguente ad una procedura di indagine preliminare finalizzata ad accertare l'effettivo stato di contaminazione del sito.
D'altra parte l'art.240 comma 1 lettera e) del T.U Ambiente definisce sito contaminato il "*sito nel quale i valori delle concentrazioni soglia di rischio "CSR", determinati con l'applicazione della procedura di analisi di rischio di cui all'allegato 1 alla parte quarta del presente decreto sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, risultano superati*"

Per Malagrotta, questa procedura, incentrata sull'elaborazione di un appropriato Piano di Caratterizzazione, è tuttora in corso.

Dalle Campagne di monitoraggio non sono ancora state determinate le CSR previste dalla normativa tecnica di riferimento quale conseguenza del Piano di Caratterizzazione.

Anzi in particolare va rilevato che:

Il Piano di caratterizzazione è iniziato nel 2018 e prevedeva all'inizio 8 Campagne di Monitoraggio. Le prime due sono state affidate alla SPE che è stata poi sostituita, per volontà dell'Amministratore Giudiziario della E. Giovi, dott. Palumbo, con la Terre Logiche S.r.l e si è arrivati alla 12° Campagna di Monitoraggio rispetto alle 8 originariamente programmate. Ad oggi però non si rileva alcuna conclusione di qualche evidenza, se non certa, almeno provata. Infatti non è possibile individuare alcuna tendenza, nella potenziale distribuzione spaziale dei potenziali inquinanti, che consenta di stabilire con ragionevole attendibilità un nesso di causalità fra stato di contaminazione delle acque sotterranee, nei piezometri interni ed in quelli esterni alla discarica.
Nessuno degli analiti rilevati in concentrazioni superiori ai valori delle CSC, siano essi organici o metalli, presenta una persistenza tale nei superamenti che abbia consentito di stabilire la ricostruzione del plume di contaminazione per nessuno di essi e questo è stato ammesso anche dai tecnici della Terre Logiche Srl[1]

Ad oggi quindi a commento dei risultati delle campagne di monitoraggio si può affermare che non è stato possibile né è possibile stabilire un nesso di causa ed effetto fra la presenza della discarica e lo stato di potenziale contaminazione dell'acquifero soggiacente l'area esterna al Polder di Malagrotta.

[1] Terre Logiche S.r.l – rapporto Intermedio – Indagini di caratterizzazione ambientale – 8° campagna di monitoraggio

Il Polder di Malagrotta, su suggerimento del dott. Amendola, è stato realizzato in funzione di fare della discarica "Un'ISOLA nella valle Galeria" per isolarla da eventuali contaminazioni "esterne", tra queste anche le 11 discariche abusive rilevate intorno alla discarica.

C) La perizia tecnica di incidente probatorio

Per l'accertamento del quantitativo di percolato esistente all'interno della discarica di Malagrotta è stata disposta dal Gip, in sede di udienza preliminare nell'ambito del procedimento penale 10455/2017 che ha portato al sequestro di Malagrotta e alla nomina dell'Amministratore Giudiziario, una perizia tecnica affidata ad un collegio composto da 4 tecnici dell'ISPRA (Istituto Superiore di Protezione e Ricerca Ambientale)

Il 23 febbraio 2021[2] i consulenti tecnici del GIP depositavano la Perizia tecnica conclusiva di incidente probatorio.

Dopo una attività sul campo durata 15 mesi con 38 verbali di sopralluogo, i periti dell'Ispra hanno stimato in 240.000 mc il quantitativo minimo e in c.a 800.000 mc il massimo di percolato all'interno della discarica

Nelle conclusioni della Relazione scrivono inoltre che "**non c'è stata fuoriuscita diretta di percolato all'esterno del Polder**" e "**non è emersa alcuna evidenza che siano presenti fuoriuscite di questo tipo**".

Di fatto ad oggi questo è ancora l'unico documento tecnico ufficiale - perché richiesto dal Tribunale - per l'accertamento dello stato dei fatti relativo a Malagrotta – e sarebbe dovuto essere il punto di riferimento unico per indirizzare le scelte relative a qualsiasi intervento su Malagrotta invece così non è stato e si è preferito accreditare le tesi contenute nella Relazione Technital.

Infatti:

D) La Relazione Technital

TRE MESI DOPO il deposito della Perizia Tecnica di incidente probatorio dei tecnici Ispra l'Amministratore Giudiziario della E.Giovi Srl conferisce IMMOTIVATAMENTE alla Technital Spa l'incarico[3] di redigere una Relazione Tecnica sulla discarica di Malagrotta nella quale la Technital quantificherà in 11 milioni di metri cubi il percolato presente nella discarica di Malagrotta.

Per quanto riguarda le opere oggetto dei bandi citati in precedenza va ricordato che la motivazione principale, contenuta nelle Relazioni Tecniche dei Bandi ed esposta anche pubblicamente dallo stesso Commissario Unico della Presidenza del Consiglio gen.Vadalà sia nel corso della sua audizione resa il 31.05.2023 innanzi alla Commissione Ambiente della Camera dei Deputati sia in sede di presentazione dei bandi in Campidoglio il 3.08.2023, è costituita dalla asserita presenza di "***oltre 11 milioni di percolato all'interno della discarica di Malagrotta***" .

[2] La perizia conclusiva è stata asseverata nel corso dell'udienza del 20.05.2021

[3] La E.Giovi conferisce a Technital l'incarico di redigere un nuovo progetto di copertura finale della discarica. Il contratto verrà poi risolto consensualmente il 30.09.2022 a fronte del pagamento da parte della E.Giovi di un importo di oltre 500.000€.

Viale del Poggio Fiorito n. 63 – 00144 Roma - Tel. 065920341 Fax 065916871
www.manliocerroni.it - manlio9gennaio14@gmail.com

Questo dato, diventato il presupposto di tutta l'operazione, è contenuto solo ed esclusivamente nella Relazione redatta dalla Technital Spa su incarico conferito il 12.05.2021 dall'Amministratore Giudiziario della E.Giovi dott.Palumbo.

E) La Relazione Montana Spa del 10.09.2023

Il **14 giugno 2023**, preso atto della situazione determinatasi, l'ex Amministratrice della E.Giovi Srl Carmelina Scaglione ha richiesto alla società Montana Spa, e per essa al dott. Pietro Simone, una **Nota tecnica di valutazione per una determinazione dei volumi di percolato nella discarica di Malagrotta.**

La Montana Spa è una società qualificata e specializzata che oltretutto conosce molto bene Malagrotta avendo già realizzato i due progetti di Capping della discarica, il primo nel 2007 e il secondo, aggiornato nel 2014 e approvato dalla Regione Lazio il 3.12.2018 con la Determinazione G15612 (All.1) per un importo di € 120.748.672,60.

Da notare che le risorse finanziarie per la realizzazione del Progetto di Capping approvato per € 120.748.672,60 erano state appostate nel bilancio 2013 della E.Giovi Srl nel fondo di cui alla scheda contabile "Ratei passivi – Oneri pluriennali – Capping n. 0228010002" con la somma arrotondata di € 120.750.000,00.

La richiesta alla Montana Spa riguardava una analisi approfondita dei risultati dei **due studi tecnici** condotti sul percolato della discarica, e cioè:

1) la **Relazione conclusiva della perizia tecnica di incidente probatorio** (cd **Relazione Tecnici ISPRA 2021**) a firma di 4 consulenti tecnici di ISPRA, nominati dal Tribunale di Roma al fine di rispondere ai quesiti formulati dal GIP De Robbio nelle udienze del 7/05/2019 e 24/07/2019 nell'ambito dell'Incidente Probatorio P.P. n.10455/2017 RGNR n.13930/18 Gip.

2) La **Relazione Tecnica Gestione del percolato** (cd **Relazione Technital 2022**) a firma della società Technital Spa, nella persona del Direttore Tecnico Ing.Venturini, commissionata il 12.05.2021 dall'Amministratore Giudiziario della E.Giovi Palumbo per un progetto del valore di 250 milioni di euro, **nonostante fosse già stato approvato dalla Regione Lazio il 3.12 2018 il progetto di Capping della Montana Spa che avrebbe dovuto soltanto essere realizzato (al costo preventivato di circa € 120.750.000)**

Nella Relazione Technital si afferma che all'interno della discarica di Malagrotta siano contenuti **11.707.403 mc di percolato** e questo **dato mostruoso**, che supera di 3 volte addirittura la quantificazione indicata dall'ing.Boeri, consulente tecnico della Procura, nella sua relazione del 2018 che portò all'emissione del decreto di sequestro della E.Giovi e di Malagrotta, **ha impressionato tutti i soggetti istituzionali oltre che la stampa.**

La Relazione Montana Spa datata **11 settembre 2023**, così conclude:

°°

4.1 DETERMINAZIONI CONCLUSIVE
Considerando i due studi, risultano maggiormente rappresentative della situazione della discarica di Malagrotta le stime seguenti:

- *Determinazione del Collegio peritale dei tecnici ISPRA: Volume di percolato presente compreso tra **277.502mc** e **925.007 mc**;*

- *Determinazione della società Technital: Volume di percolato minimo presente pari a **270.876 mc** con stima verosimile di un volume pari a **1.334.065 mc***

Pertanto le condizioni di minimo e di massimo del volume di percolato variano tra 270.502/270.876 mc per il livello minimo e 925.007/1.334.065 mc per il livello massimo.

*La semplice media aritmetica dei dati presentati nei due studi conduce un **volume di percolato estraibile in discarica pari a 700.113 mc***

Va evidenziato come il quantitativo di 11.707.343 mc indicato dalla Technital quale percolato, sia, come descritto compiutamente alla pag.20, il risultato di una stima del tutto errata, di fatto superata dalla medesima Technital, che può essere grave fonte di travisamento.

Per stime più accurate si condivide la necessità, espressa nei due studi, di eseguire ulteriori prove di campo al fine della determinazione dei parametri sito-specifici utili per una più precisa determinazione dei volumi di percolato presenti ed estraibili.

A parere degli scriventi è importante anche approfondire l'influenza del biogas sui livelli del percolato nei pozzi di monitoraggio ed estrazione, in quanto le pressioni sottese al battente nei pozzi potrebbero portare a sovrastime delle misure.

A tale riguardo preme sottolineare come, per quanto di nostra conoscenza, Malagrotta sia dotata di turbine e gruppi elettrogeni in grado di trasformare il biogas, estratto da una fitta rete di pozzi di captazione, in energia.

°°

In sintesi, l'analisi della Relazione Montana dimostra che i dati tecnici della Relazione Technital (prodotta a seguito dell'incarico ricevuto dalla E.Giovi il 12.05.2021) e poi confluiti nella Relazione Generale del progetto definitivo contenuta nei bandi di gara, sono "**frutto di una stima del tutto errata**" (cfr pag.21) e **non possono essere in alcun modo considerati attendibili. (All.2)**

Va ricordato tra l'altro che Malagrotta dispone già dal 2017 di un impianto di trattamento del percolato della capacità di 160.000 tonn/anno attualmente autorizzato a trattare 60.000 tonn/anno.

F) La realizzazione del secondo Polder

La rappresentazione **"tecnicamente" falsata** fornita dalla Technital è alla base della decisione di porre a gara la realizzazione di una nuova cintura di perimetrazione (secondo Polder), con la presunta realtà del percolato che tracima oltre la barriera, cioè il diaframma plastico. Questa circostanza non è mai stata rilevata nel corso dell'incidente probatorio di natura tecnica durato quasi 20 mesi, dal 2019 al 2021, in contraddittorio tra le parti, come attesta la conclusione di pag.232 della già citata Relazione Conclusiva Tecnica ISPRA da cui risulta che "***benchè la configurazione altimetrica che è stata ricostruita per il diaframma risulti compatibile con il verificarsi di tale ipotesi dagli accertamenti non è emersa alcuna evidenza che allo stato attuale siano presenti fuoriuscite di questo tipo***".

Viale del Poggio Fiorito n. 63 – 00144 Roma - Tel. 065920341 Fax 065916871
www.manliocerroni.it - manlio9gennaio14@gmail.com

A ciò si aggiungono le conclusioni della Pubblicazione del 7.3.2022 dell'Università La Sapienza di Roma, sull' **Italian Journal of Engineering Geology and Environment**, dal titolo " **Il diaframma di cemento e bentonite della discarica di rifiuti urbani di Malagrotta: analisi di efficienza**", nel quale i proff.Braga e Prestininzi hanno dimostrato con dati scientifici come il Polder di Malagrotta continui a garantire una perfetta tenuta e una protezione totale dell'area evitando ogni rischio di fuoriuscita del percolato dall'area circostante, così concludendo.

"**Le indagini eseguite nell'area di Malagrotta (Roma-Italia) orientate alla valutazione dello stato di conservazione del diaframma plastico costruito tra il 1986 e 1987, mostrano che l'opera è nella condizione di garantire la totale discontinuità idraulica dell'area che contiene la grande discarica di RSU, così come previsto dalle Direttive emanate dal Consiglio delle Comunità Europee n.75/442 del 15 luglio 1975. Si tratta di un'opera di grande dimensione e importanza che forma una barriera di sicurezza ambientale intorno ai 161 ha dell'area di smaltimento dei rifiuti. Ai fini della sicurezza, i singoli lotti di 161 ha (11 in totale n.d.a) posti all'interno del diaframma, sono dotati delle normali opere di isolamento, così come previsto per le discariche RSU.**
Le analisi idrogeologiche e meccaniche effettuate hanno mostrato che il comportamento del diaframma plastico è in linea con i dati previsti dal progetto e i controlli del collaudo. I risultati complessivamente ottenuti, sottoposti ad elaborazione statistica, confermano l'efficienza del diaframma.
***A distanza di oltre 35 anni dalla sua costruzione il diaframma plastico di cemento e bentonite mostra un eccellente stato di conservazione che consente di garantire la totale discontinuità idraulica dell'area che contiene la grande discarica di Malagrotta*" (All.2)**

Sempre sul **Polder** va ricordato infine che le **Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)** indicano per opere simili (Diaframmi impermeabili per Dighe) verifiche di efficienza tenendo conto di una **vita utile di 200 anni**, un tempo cioè di gran lunga superiore a quello necessario per la completa mineralizzazione dei rifiuti abbancati in discarica.

G) Il Politecnico di Torino

A supporto dell'ipotesi di un cedimento da parte del Polder e quindi di un possibile contatto tra l'interno e l'esterno della discarica sono state portate le conclusioni dei verificatori del Politecnico di Torino nominati nel 2012 dal Consiglio di Stato, chiamato a pronunciarsi in sede giurisdizionale di appello sulla Sentenza del TAR Lazio n. 6617/2011.

In esito all'incarico, i Verificatori del Politecnico di Torino hanno redatto una Relazione conclusiva, depositata in data 14.02.2014.

In estrema sintesi, nella loro relazione i Verificatori affermano di aver rilevato una variazione contemporanea in due piezometri (V7 e Z7) posti rispettivamente all'interno e all'esterno del Polder in corrispondenza di alcuni prelievi effettuati. Questo è bastato per sostenere la tesi che il Polder, almeno in quel punto, non garantiva la piena tenuta ed efficienza.

Anche questa tesi è stata smentita scientificamente nella Pubblicazione dell'Università la Sapienza di Roma del 7.03.2022. Nel capitolo dedicato all'analisi idrogeologica scrivono infatti :

°°

Viale del Poggio Fiorito n. 63 – 00144 Roma - Tel. 065920341 Fax 065916871
www.manliocerroni.it - manlio9gennaio14@gmail.com

Attraverso le programmate prove di emungimento, effettuate nei pozzi all'interno del diaframma cemento bentonite, grazie alla trasmissività dei terreni ivi presenti, è stato possibile variare il carico idraulico nei pressi della sezione di misura. Tali variazioni sono registrate dal piezometro V7. La contemporanea lettura del piezometro Z7 ha dimostrato inequivocabilmente che il diaframma interposto inibisce il flusso dall'interno all'esterno e viceversa. Infatti non devono trarre in inganno le minime variazioni delle quote piezometriche registrate esternamente, sul piezometro Z/7, a seguito della variazioni registrate in V7. In primo luogo si deve rilevare che le due quote, interna ed esterna, risultano sempre differenti, con la quota piezometrica interna sempre più elevata rispetto a quella esterna. A seguito dei cicli di emungimento, a fronte di abbassamenti/sollevamenti interni dell'ordine di un metro, esternamente alla paratia si sono registrate variazioni, in abbassamento o sollevamento, dell'ordine di un centimetro. Tali minime variazioni indicano però soltanto una modifica di pressione e non di flusso idrico. Infatti anche ragionando per assurdo non è possibile ipotizzare un flusso attraverso il diaframma, in quanto il livello di falda interno resta comunque sempre notevolmente maggiore di quello esterno. Poiché il flusso della falda è determinato dalla gravità (gradiente idraulico) è impossibile che l'acqua possa muoversi da livelli minori verso quelli maggiori. Nel caso opposto, ovvero ipotizzando un flusso dall'interno verso l'esterno, i livelli esterni ricevendo acqua dovrebbero mostrare una tendenza all'innalzamento e non all'abbassamento, sia pure molto limitatamente: in assenza di incremento del livello piezometrico esterno non è possibile che vi sia flusso.
Queste condizioni trovano una razionale spiegazione scientifica considerando il comportamento dei sistemi chiusi. Senza entrare nel merito è noto che i sistemi chiusi sono in grado di scambiare energia (in questo caso pressione) ma non materia (in questo caso acqua). Come dimostra il grafico sperimentale di figura5 le variazioni di carico osservate in V7 e Z7 presentano una risposta temporale istantanea per ogni time step. Questo aspetto è tipico dei sistemi chiusi, che non scambiano materia. Questo comportamento è noto in geotecnica con il nome di ***comportamento non drenato*** *dove le variazioni di pressione inducono modifiche nella massa di terreno, o nella struttura, a volume costante.*

……………. Questo dato non reale, ottenuto imponendo la soluzione di Darcy, per assurdo dimostra che la paratia di cemento-bentonite è totalmente "impermeabile" e quindi pienamente idonea a svolgere la funzione per la quale è stata progettata e realizzata (Prestininzi A, Romagnoli C. 1991). I dati riportati nella tabella 2 confermano questo assunto, ovvero che il carico idraulico in V7 e Z7 sono legati da un rapporto lineare di proporzionalità, connesso al trasferimento di energia (pressione) come si evince dai dati riportati nella tabella 2.

……………..L'analisi dei risultati conferma quanto già osservato attraverso le valutazioni di carattere idraulico. Il comportamento del sistema, sollecitato attraverso test di stress idraulico, è tipico dei sistemi non drenati che rispondono alle variazioni di sollecitazione con scambio di energia e deformazioni indotte a volume costante.

°°

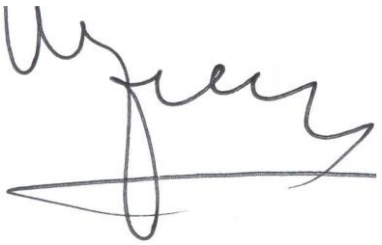
Stando così le cose è semplicemente una **FOLLIA** portare avanti il programma previsto che, tra l'altro, comporta l'utilizzo di fondi pubblici anche europei attingendo alle "*Disposizioni urgenti per l'attuazione del Piano Nazionale di ripresa e resilienza (PNRR) e*

del Piano nazionale degli investimenti complementari al PNRR (PNC) nonché per l'attuazione delle politiche di coesione e della politica agricola comune".

Bastava solo e basta ancora realizzare il Progetto di Capping approvato dalla Regione Lazio il 3.12.2018 per la chiusura definitiva della Discarica di Malagrotta e passare così alla fase di gestione post-operativa per almeno 30 anni.

Distintamente

Manlio Cerroni



Allegati

1) Determinazione G15612 Regione Lazio del 3.12.2018
2) Relazione Montana 11.09.2023
3) Pubblicazione Università La Sapienza di Roma

Viale del Poggio Fiorito n. 63 – 00144 Roma - Tel. 065920341 Fax 065916871
www.manliocerroni.it - manlio9gennaio14@gmail.com

REGIONE LAZIO

DIREZIONE POLITICHE AMBIENTALI E CICLO DEI RIFIUTI

Amministratore Giudiziario
E. Giovi
ammi.giudiziariaegiovi2018@pec.it

Città Metropolitana di Roma Capitale
protocollo@pec.cittametropolitanaroma.gov.it

Roma Capitale
Protocollo.tutelaambientale@pec.comune.roma.it

A.R.P.A. Lazio
direzione.centrale@arpalazio.legalmailpa.it

ASL ROMA 3
Servizi SPRESAL e SISP
protocollo@pec.aslroma3.it

Oggetto: Trasmissione Determinazione G15612 del 3 dicembre 2018.

In allegato alla presente si trasmette per opportuna conoscenza e per quanto di competenza, copia conforme della Determinazione G15612 del 3 dicembre 2018 avente ad oggetto: "Soc. E. Giovi s.r.l. – Comune di Roma - Modifica sostanziale al progetto di capping della discarica di Malagrotta approvato, con decreto n. 36 del 30/06/2008, dal Commissario regionale per l'emergenza rifiuti nel territorio della Regione Lazio – approvazione progetto.".

IL Direttore Regionale
(Ing. Flaminia Tosini)

VIA DEL GIORGIONE, 129
00147 ROMA

TEL +39.06.51680000
FAX +39.06.51680000

WWW.REGIONE.LAZIO.IT
@REGIONE.LAZIO.IT

REGIONE LAZIO

REGIONE LAZIO

Direzione: POLITICHE AMBIENTALI E CICLO DEI RIFIUTI

Area:

DETERMINAZIONE

N. G15612 **del** 03/12/2018 **Proposta n.** 20096 **del** 03/12/2018

Oggetto:

Soc. E. Giovi s.r.l. – Comune di Roma - Modifica sostanziale al progetto di capping della discarica di Malagrotta approvato, con decreto n. 36 del 30/06/2008, dal Commissario regionale per l'emergenza rifiuti nel territorio della Regione Lazio – approvazione progetto.

Proponente:

Estensore	FELICI CRISTINA	
Responsabile del procedimento	TOSINI FLAMINIA GR 29 00	
Responsabile dell' Area		
Direttore Regionale	F. TOSINI	
Protocollo Invio		
Firma di Concerto		

Richiesta di pubblicazione sul BUR: SI

Oggetto: Soc. E. Giovi s.r.l. – Comune di Roma - Modifica sostanziale al progetto di capping della discarica di Malagrotta approvato, con decreto n. 36 del 30/06/2008, dal Commissario regionale per l'emergenza rifiuti nel territorio della Regione Lazio – approvazione progetto.

IL DIRETTORE DELLA DIREZIONE

POLITICHE AMBIENTALI E CICLO DEI RIFIUTI

VISTO lo Statuto della Regione Lazio;

VISTA la L.R. n. 6 del 18/02/2002, "Disciplina del sistema organizzativo della Giunta e del Consiglio e disposizioni relative alla dirigenza e al personale regionale";

VISTO il R.R. n. 1 del 06/09/2002, "Regolamento di organizzazione degli uffici e dei servizi della Giunta regionale" e s.m.i.;

VISTA la D.G.R. n. 714 del 03/11/2017, con la quale è stato conferito l'incarico di Direttore della Direzione Regionale "Politiche Ambientali e Ciclo dei Rifiuti" all'Ing. Flaminia Tosini;

VISTO il D.lgs. n. 152 del 03/04/2006 e s.m.i. "Norme in materia ambientale";

VISTO il D.M. 31/01/2005 "Linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili per le attività elencate nell'allegato I del D.lgs. 372/99";

VISTA la L.R. n. 27 del 09/07/1998 e s.m.i. "Disciplina regionale della gestione dei rifiuti";

VISTA la D.C.R. n. 14 del 18/01/2012, che approva il Piano regionale gestione dei rifiuti;

VISTA la D.G.R. n. 239 del 17/04/2009, recante nuovi criteri riguardanti la prestazione delle garanzie finanziarie previste per il rilascio delle autorizzazioni all'esercizio delle operazioni di gestione dei rifiuti nel territorio regionale;

VISTA la D.G.R n. 239 del 18/04/2008, recante le modalità dei procedimenti per il rilascio delle autorizzazioni all'esercizio delle operazioni di gestione dei rifiuti nel territorio regionale;

VISTA la D.D. G15439 del 15/11/2017 avente ad oggetto "Soc. E.Giovi srl – comune di Roma – Modifica sostanziale al progetto di capping della discarica di Malagrotta approvato con decreto 36 del 30/6/2008, dal Commissario regionale per l'emergenza rifiuti nel territorio della Regione Lazio – Chiusura del procedimento di autorizzazione integrata ambientaLe"

CONSIDERATO che:

- successivamente, a seguito dell'interdittiva antimafia emessa nei confronti dei soggetti afferenti al sito di Malagrotta non sono state emesse nuove autorizzazioni;

- solo recentemente è stato individuato un Amministrato giudiziario della E.Giovi relativamente alla discarica.
- Con nota prot. 535166 del 6/9/2018 l'amministratore giudiziario ha chiesto l'emissione dell'autorizzazioni integrata ambientale relativa alla determinazione G15439 del 15/11/2017

VALUTATO che sono in corso degli approfondimenti con l'attuale amministratore giudiziario nonché amministratore straordinario per definire l'iter di approvazione in via amministrativa di tutte le attività afferenti al sito di Malagrotta

RITENUTO di dover comunque approvare in linea tecnica il progetto di variante sostanziale al capping per il quale si era già conclusa la conferenza dei servizi con la richiamata determinazione G15439/2017

STABILITO CHE a breve sarà trasmesso un atto ricognitivo in merito alle autorizzazioni necessarie alle attività nel sito di Malagrotta;

VISTO il D.Lgs. n. 36/2003;

VISTO il D.Lgs. n.152/2006;

DETERMINA

Per quanto premesso che integralmente si richiama

1) Di approvare in linea tecnica il progetto di modifica sostanziale al progetto di capping della discarica di Malagrotta approvato, con decreto n. 36 del 30/06/2008, dal Commissario regionale per l'emergenza rifiuti nel territorio della Regione Lazio composto dai seguenti elaborati:
    - Elaborato denominato "Relazione Tecnica";
    - Allegato 01 denominato "Indagini geognostiche e geotecniche";
    - Allegato 02 denominato "Rilievo dell'area"
    - Tav. 01 denominata "Planimetria di inquadramento generale";
    - Tav. 02 denominata "Planimetria stato di fatto lotto B";
    - Tav. 03 denominata "Piano di indagini lotto B - ubicazione delle indagini (Tav. 03a) e Elaborazione dei risultati (Tav. 03b)";
    - Tav. 04 denominata "Planimetria stato di progetto e recupero finale";
    - Tav. 05 denominata "Sezioni di progetto";
    - Tav. 06 denominata "Sistema di regimazione acque meteoriche";
    - Tav. 07 denominata "Particolari costruttivi";
    - Tav.08 denominata "piano di indagini dell'intera area di discarica";
    - Tav.09 denominata "Recupero finale - rendering fotorealistico".
- Integrazioni di cui alla nota 66 del 25/05/2017

2) Di tenere conto dell'istruttoria già allegata alla determinazione G15439 del 15/11/2017

3) Di disporre le seguenti prescrizioni

- Il progetto di landfill mining, come stabilito nella Conferenza dei Servizi del 14/09/2016, viene stralciato dal presente provvedimento.
- Il progetto di impianto fotovoltaico, come stabilito nella Conferenza dei Servizi del 14/09/2016, viene stralciato dal presente provvedimento.
- Il progetto indicato come "bosco" nel decreto 36/2008, viene stralciato dal presente provvedimento in quanto, in questa fase, gli apparati radicali possono perforare la copertura provvisoria e quindi diminuirne la impermeabilità. La sistemazione finale delle aree in assestamento sarà oggetto di aggiornamento al termine del previsto periodo di monitoraggio.
- La richiesta di utilizzo della FOS per le operazioni di rimodellamento e copertura viene stralciata dal presente provvedimento. Per le operazioni di rimodellamento, che rientrano nelle normali attività della post gestione, non si ritiene necessario l'uso di nuovi materiali ma la rimovimentazione di quello esistente, o, in caso di assoluta necessità, l'uso di inerti.
- Gli interventi devono essere realizzati secondo i tempi dettati dal cronoprogramma allegato alla Relazione Tecnica. A tale proposito, al fine di semplificare le operazioni di controllo, si prescrive alla società di consegnare alla scrivente Autorità, entro il tempo massimo di 30 giorni dalla notifica del presente atto, una nuova versione.
- Viene previsto un tavolo tecnico che a partire da 1 anno a partire dalla notifica valuti l'evoluzione dei cedimenti e dei lavori
- Il Direttore dell'impianto dovrà verificare se le indagini geotecniche svolte fino ad ora siano sufficienti per garantire la stabilità dei versanti all'interno della discarica. Inoltre, sarà sua cura monitorare regolarmente l'andamento dei cedimenti e, nel caso in cui, intraveda la possibilità di creazione di potenziali situazioni di pericolo deve avvertire con congruo anticipo il competente ufficio della Regione Lazio per concordare le azioni di emergenza da intraprendere.
- La copertura provvisoria dovrà essere oggetto di continua ispezione e manutenzione al fine di garantire la sua impermeabilità nonché il regolare deflusso delle acque meteoriche;
- Nelle zone a verdi, comunque oggetto di coltivazione prima dell'entrata in vigore del decreto legislativo 36/03, prescrivere le verifiche richieste da ARPA il 03/11/2016
- Nella porzione occidentale del lotto " L", già dotato di copertura definitiva, effettuare opportune verifiche finalizzate alla valutazione dell'efficacia del sistema di copertura come chiede ARPA;
- Nel lotto "B", come prescritto da ARPA, verificare le caratteristiche prestazionali del materiale geocomposito che andrà a sostituire lo strati drenante di ghiaia (prevista ogni 25.000 mq di materiale.
- Nelle zone di argine dovranno essere prelevati, in tutte le 42 stazioni di campionamento proposte, campioni indisturbati alle quote di 1,5 e 3,0 metri dal piano campagna. Tali indagini dovranno confermare quanto osservato nella campagna eseguita nel 2015 per tutte le aree argini della discarica.
- Di disporre una compagna di indagini geofisiche atta a definire la presenza di percolato all'interno del corpo della discarica al fine di definire la sua estensione areale e verticale.

4) Con riferimento alla gestione del percolato, nonché agli altri elementi relativi all'intero insediamento di Malagrotta, quali emissioni in atmosfera, scarichi ecc, verrà emesso successivamente apposito atto.

Il presente atto sarà notificato all'amministratore giudiziario della Soc. E.Giovi s.r.l. e trasmesso Città Metropolitana di Roma Capitale, al Comune di Roma Capitale, alla ARPA Lazio, ai Servizi SPRESAL e SISP della ASL RM 3 e pubblicato sul Bollettino Ufficiale e sul sito web della Regione Lazio www.regione.lazio.it/rl_rifiuti.

Avverso il presente provvedimento è ammesso ricorso giurisdizionale innanzi al Tribunale Amministrativo Regionale del Lazio nel termine di 60 giorni dalla comunicazione (*ex* artt. 29, 41 e 119 del D.Lgs. 104/2010), ovvero, ricorso straordinario al Capo dello Stato entro il termine di 120 giorni .

Il Direttore
Ing. Flaminia Tosini

Copia

SETTEMBRE 2023

CARMELINA SCAGLIONE

DISCARICA MALAGROTTA

COMUNE DI ROMA

VALUTAZIONE DI STIME PREGRESSE IN RELAZIONE AI VOLUMI DI PERCOLATO PRESENTI NELLA DISCARICA DI MALAGROTTA

Redazione

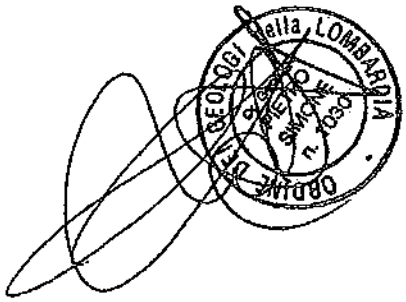
Geol. Pietro Simone (Ord. Geologi della Lombardia n. 1030)

Codice elaborato

3155_5640_R01_Rev0.docx

Memorandum delle revisioni

Cod. Documento	Data	Tipo revisione	Redatto	Verificato	Approvato
3155_5640_R01_Rev0.docx	09/2023	Prima emissione	G.d.L.	PM	Angeloni



Gruppo di lavoro

Nome e cognome	Ruolo nel gruppo di lavoro	N° ordine
Dott. Geol. Pietro Simone	Coordinamento e redazione	Ordine Geologi Lombardia n. 1030
Dott. Geol. Alessandro Cantelli	Valutazioni tecniche e redazione	-
Dott. Ing. Silvia Lenzu	Valutazioni tecniche e redazione	Ordine Ingegneri Prov. Cagliari n 7080

INDICE

1. PREMESSA 4
1.1 DOCUMENTAZIONE CONSULTATA 4
2. ASSUNZIONI ED ESITI DELLA RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021 5
2.1 OBIETTIVI DELLA RELAZIONE 5
2.2 DATI DI BASE UTILIZZATI E INDAGINI SPECIFICHE CONDOTTE NELL'AMBITO DELLA PERIZIA 5
2.3 DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI PERCOLATO ATTUALMENTE PRESENTE IN DISCARICA 9
3. ASSUNZIONI ED ESITI DELLA RELAZIONE TECHNITAL 2022 13
3.1 OBIETTIVI DELLA RELAZIONE 13
3.2 DATI DI BASE UTILIZZATI E INDAGINI SPECIFICHE CONDOTTE NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DEFINITIVA 13
3.3 DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI PERCOLATO ATTUALMENTE PRESENTE IN DISCARICA 15
3.3.1 Approfondimento sulle valutazioni volumetriche relative al percolato nell'ambito del Progetto definitivo 18
4. VALUTAZIONE COMPARATA DELLE STIME DEI DUE STUDI 20
4.1 DETERMINAZIONI CONCLUSIVE 23

1. PREMESSA

La presente nota illustra valutazioni tecniche inerenti la stima del percolato presente ed estraibile nella discarica di Malagrotta, ubicata nel territorio di Ponte Galeria, ad Ovest dell'area metropolitana di Roma.

Le valutazioni sono state effettuate dallo scrivente Dott. Geol Pietro Simone, iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Lombardia (n. iscrizione 1030), in qualità di perito di parte nell'ambito del Procedimento Penale N. 13930/18 GIP – 10455/17 RGNR, su incarico della Sig.ra Carmelina Scaglione.

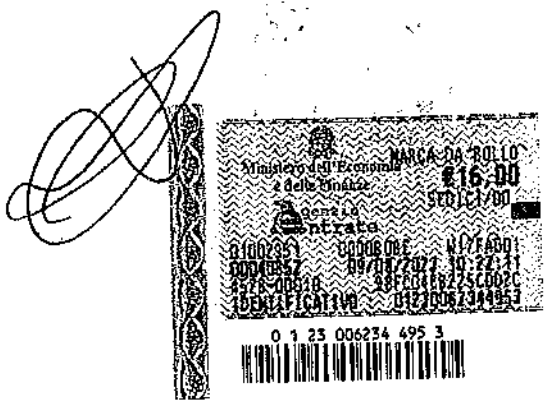
Le valutazioni hanno considerato e messo a confronto due studi tecnici condotti sul percolato della discarica Malagrotta, non perfettamente coincidenti sui valori finali:

1. Relazione conclusiva della perizia tecnica per incidente probatorio (anche **RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021** nel seguito del presente documento) a firma dei Consulenti Tecnici di ISPRA, nominati dal Giudice per le Indagini Preliminari dott. Francesco Patrone (dott. Ing. Fabio Ferranti, dott.ssa Maria Grazia Finoia, dott. Michele Fratini, dott. Pier Luigi Gallozzi) – febbraio 2021- al fine di rispondere ai quesiti formulati dal GIP De Robbio nell'ambito dell'Incidente Probatorio P.P. n. 10455/17RGNR n. 13930/18GIP.
2. Relazione tecnica Gestione del percolato (anche **RELAZIONE TECHNITAL 2022** nel seguito del presente documento), a firma della società Technital S.p.A. nella persona del Direttore Tecnico Ing. Simone Venturini – luglio 2022, redatta nell'ambito della predisposizione del Progetto Definitivo della copertura superficiale finale della discarica di Malagrotta, di cui è un allegato (codice documento II141I-PD-RT-0003-C0). L'incarico per la redazione del progetto definitivo è stato conferito dalla società E. Giovi S.r.l., in amministrazione controllata, alla società Technital S.p.A. in data 12/05/2021.

Nei successivi paragrafi è riportata una sintesi dei due documenti sopracitati, dei rispettivi assunti e delle metodologie di calcolo adottate. A tale sintesi fa seguito una valutazione comparativa del grado di affidabilità delle stime quantitative condotte in relazione al percolato presente nella discarica di Malagrotta.

1.1 DOCUMENTAZIONE CONSULTATA

Per le valutazioni condotte nel presente studio, oltre alle due relazioni citate in premessa, sono stati consultati alcuni documenti di interesse del Progetto Definitivo della copertura superficiale finale della discarica di Malagrotta, redatto dalla società Technital S.p.A. nel 2022 su incarico della E. Giovi in amministrazione controllata, con particolare riferimento alla RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, alla quale si fa riferimento nella RELAZIONE TECNICA SULLA GESTIONE PERCOLATO, e alla RELAZIONE GENERALE del Progetto Definitivo.



2. ASSUNZIONI ED ESITI DELLA RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021

Nel presente capitolo viene sintetizzata la **RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021**, della quale si riportano i passaggi ritenuti maggiormente di interesse per l'obiettivo del presente documento, cioè la valutazione del volume di percolato estraibile dalla discarica di Malagrotta; si ritiene utile suddividere l'esposizione in termini di:

- Obiettivi dell'incarico dello studio in esame (di interesse per il presente documento);
- Dati di base utilizzati e indagini specifiche condotte nell'ambito della progettazione definitiva;
- Determinazione del volume di percolato.

2.1 OBIETTIVI DELLA RELAZIONE

La **RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021** è stata redatta con la finalità di rispondere ai quesiti formulati dal GIP De Robbio nell'ambito dell'Incidente Probatorio P.P. n. 10455/17RGNR n. 13930/18GIP, quesiti emersi durante le udienze del 07/05/2019 e del 24/07/2019 e di seguito sintetizzati:

1. *Effettuare una stima del quantitativo di percolato prodotta negli anni, fino al luglio 2018 ed attualmente all'interno dei lotti della discarica di Malagrotta, anche procedendo se ritenuto necessario a richiedere l'ausilio per effettuare eventuali indagini geologiche, mediante procedure ufficiali la cui efficacia e pertinenza siano riconosciute dalla comunità scientifica e le cui metodiche siano riscontrabili da chiari riferimenti nella letteratura di settore ed operando ove possibile in condizioni di staticità, evitando cioè le procedure che possano provocare una qualsiasi movimentazione del liquido e la conseguente perturbazione del sistema.*
2. *Verificare la massa di liquido che ha abbandonato il corpo dei rifiuti che si trova abbancato nei lotti se vi è contaminazione tra l'acqua di MISE e il percolato.*
3. *Individuare l'appropriato codice CER delle acque interne al polder che possono essere venute a contatto con il percolato, anche avvalendosi di specifico ausilio per eventuali caratterizzazioni analitiche.*
4. *Appurare, anche richiedendo ausilio per eventuali ulteriori caratterizzazioni analitiche, se le acque eventualmente emunte all'interno del TMB1 siano state canalizzate fino all'esterno del polder e, nell'eventualità, se tali acque siano da considerarsi rifiuti liquidi oppure acque di scarico.*
5. *Determinare, sulla base della conformazione degli originari piani d'imposta della discarica i volumi di percolato presenti all'interno del corpo discarica ed indicare quali sarebbero stati i costi che la società E. Giovi avrebbe dovuto sostenere se avesse proceduto allo smaltimento di quantitativi di percolato necessari a mantenere basso il battente idraulico nonché ad ottemperare a tutte le altre previsioni normative dettate dal d.lv 2003/36 in materia di estrazione del percolato.*
6. *omissis...l'estensione dei quesiti 3 e 4 anche alla verifica dello stato di conservazione del diaframma plastico della discarica.*

2.2 DATI DI BASE UTILIZZATI E INDAGINI SPECIFICHE CONDOTTE NELL'AMBITO DELLA PERIZIA

Per ottemperare alle richieste formulate dal GIP sono state eseguite diverse indagini di campo, di seguito si elencano quelle ritenuti di maggiore interesse per le finalità del presente documento:

- sopralluoghi per verifica pozzi di estrazione percolato e pozzetti di estrazione biogas;
- acquisizione quote e rilievi topografici;
- sopralluoghi per verifica piezometri di monitoraggio della falda interni al diaframma e misure di livello nei piezometri;
- misure di livello pozzi del percolato/pozzetti biogas;
- prove di recupero del percolato.

L'acquisizione delle quote e dei rilievi topografici riveste particolare importanza per le finalità del presente documento, in quanto tali dati rappresentano la base per la valutazione del volume di percolato presente all'interno della discarica. La descrizione dell'attività condotta dal Collegio peritale dei tecnici ISPRA è riportata nel Capitolo 6 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021.

Durante l'esecuzione della perizia è stato accertato che nessuno dei rilievi topografici disponibili conteneva tutti i punti necessari alle elaborazioni da svolgere, pertanto al fine della costruzione di una base di dati di riferimento e sono stati acquisiti differenti rilievi per i quali è stata effettuata un'analisi comparativa per la definizione della significatività delle differenze di misura tra gli stessi, che ha portato a selezionare, quale base di riferimento, il rilievo effettuato dallo Studio Tecnico Chericoni nel marzo 2018 (rilievo STC), integrato dal rilievo fornito dall'Amministratore Giudiziario in data 25/11/2020 (rilievo AG_2020) per i dati non disponibili nel primo rilievo.

Nei giorni 13 e 14 luglio 2020 è stata eseguita una **campagna di misure freatimetriche** che ha interessato n. 77 piezometri, di cui n. 13 interni al perimetro del diaframma e n. 64 esterni. La descrizione dell'attività condotta dal Collego peritale dei tecnici ISPRA è riportata nel Capitolo 8 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021. Le misure effettuate sono state comparate con i dati storici disponibili, relativi alle annualità dal 2009 al 2019, consultati al fine di verificare l'attendibilità della misura di luglio 2020 sulla base della variabilità dei dati storici. Dall'analisi e dalla comparazione dei risultati è emerso che *"la misura di luglio 2020 si colloca ai limiti inferiori, o poco al di sotto, della fascia di oscillazione dei dati storici considerati"*.

Nei giorni 18 e 19 luglio 2020 sono state eseguite le **misure di soggiacenza del percolato** nei pozzi che compongono la rete di raccolta ed estrazione, previa disattivazione dell'estrazione nelle 24 ore precedenti il rilievo; nei lotti A e C della discarica il Piano di Indagine predisposto nell'ambito della consulenza prevedeva la realizzazione di n. 2 pozzi di estrazione del percolato, ma non essendo stati realizzati entro tempi utili, in data 24 settembre 2020 sono state effettuate le misure di soggiacenza del percolato in alcuni pozzetti di estrazione del biogas presenti nei lotti A e C, considerando trascurabile l'effetto dell'aspirazione del biogas sulle misure eseguite.

La descrizione dell'attività condotta dal Collego peritale dei tecnici ISPRA è riportata nel Capitolo 9 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021.

Per la definizione della quota assoluta sul livello del mare del livello di percolato si è fatto riferimento al rilievo STC, integrato dal rilievo AG_2020 per i dati non disponibili nel primo rilievo.

Le misure effettuate sono state comparate con i dati storici disponibili che non presentavano un quadro informativo completo e omogeneo. In analogia alle considerazioni condotte sulle misure freatimetriche, le misure eseguite a giugno 2020 sul livello di percolato si collocano in prossimità dei valori minimi dei dati storici, *"con i valori di differenza massima che vengono raggiunti nei due pozzi del lotto L dove i livelli misurati risultano inferiori ai minimi storici, rispettivamente di 3,8 e 6,7 m"*. I periti indicano inoltre che la *"condizione di abbassamento generalizzata può essere ricondotta all'effetto combinato sia del prolungato periodo siccitoso che ha preceduto le misurazioni, sia dell'emungimento sistematico che attualmente viene svolto sui pozzi* e che *ai fini della stima dei quantitativi di percolato presente nella discarica, l'impiego dei valori misurati a giugno 2020 rappresenta sicuramente un'ipotesi conservativa"*.

Sono stati oggetto di misurazione n. 13 pozzi di percolato, di cui n. 2 rivelatisi poi non misurabili, e n. 7 pozzi di captazione biogas.

Sulla base degli esiti della campagna di misure, nell'ambito della perizia tecnica si è proceduto con la determinazione del battente del percolato per ciascun lotto della discarica, considerando quale quota base del lotto quella indicata nelle stratigrafie dei pozzi del percolato, ove disponibili, e negli altri casi la quota della base del lotto indicata dal progetto; per i lotti A e C, avendo utilizzato pozzi di captazione biogas per la misura del livello di percolato, il battente di percolato è stato calcolato considerando il fondo del pozzetto e non il fondo del lotto, ritenendo che tali livelli potrebbero avere una *"minore rappresentatività rispetto all'altezza effettiva del battente sopra il fondo del lotto"*.

L'analisi della distribuzione planimetrica dei livelli di percolato ha mostrato che *"i livelli più elevati si trovano nell'area centrale della discarica, mentre i valori tendono a diminuire nelle porzioni periferiche"*, con una lieve eccezione nell'area orientale della discarica. Le diverse analisi condotte convergono

sull'ipotesi, seppur preliminare, di una *"limitata ma effettiva comunicazione idraulica"* all'interno del corpo rifiuti.

ID pozzo	quota s.l.m. base lotto (*)	quota fondo pozzo misurata	spessore materiali su fondo pozzo	quota livello percolato in pozzo	altezza battente su base lotto (***)
B	24.5 (s)	24.5	-	28.1	3.6
D1bis	28.2 (s)	36.6	8.4	53.6	25.4
Ebis	22.85 (s)	27.3	4.4	30.1	7.2
F1	23.7 (s)	30.2	6.5	60.7	37.0
F2bis	23.7 (s)	32.6	8.9	51.0	27.3
Gbis	31.2 (s)	33.3	2.1	49.2	18.0
H1	24.3 (s)	48.2	23.9	62.3	38.0
H2bis	24.3 (s)	n.d.	n.d.	34.6(**)	10.3
I1bis	10.6 (s)	9.2	-	19.4	8.8
I2	10.6 (s)	25.6	15.0	26.3	15.7
L1	27 (p)	21.5	-	31.8	4.8
L2	27 (p)	26.4	-0.6	40.7	13.7
M	29 (p)	n.d.	-	33.3(**)	4.3
C-397(biogas)	26 (p)	31.2	-	43.8	17.8 *(12,6)*
C-423(biogas)	26 (p)	31.1	-	48.3	22.3 *(17,2)*
C-868(biogas)	26 (p)	56.8	-	61.9	35.9 *(5,1)*
C-2106(biogas)	26 (p)	57.4	-	67.9	41.9 *(10,5)*
A-1282(biogas)	29 (p)	42.5	-	57.7	28.7 *(15,2)*
A-315(biogas)	29 (p)	46.5	-	59.0	30.0 *(12,4)*
A-1315(biogas)	29 (p)	49.1	-	62.9	33.9 *(13,8)*

Note (*) quota base lotto determinata da: s = stratigrafia pozzo: p = elementi progettuali
(**) livello percolato non misurabile e sostituito con livello minimo da set dati storici
(***) per i pozzetti biogas è indicata, tra parentesi, anche l'altezza del battente sul fondo pozzo

Tabella 2.1: Valori battente percolato (Tabella 9.6 della RELAZIONE TECNICI ISPRE 2021, pag. 107/252)

Nei giorni 24, 25 e 26 giugno 2020 sono state effettuate **prove di estrazione del percolato** attraverso il pozzi B, D1bis e I1bis; nei giorni 2, 3 e 4 luglio sono stati oggetto di prova di estrazione percolato i pozzi F2bis, Gbis e L1. Tali pozzi sono rappresentativi di n. 6 lotti distinti. La descrizione dell'attività condotta dal Collego peritale dei tecnici ISPRA è riportata nel Capitolo 10 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021.

La prova è consistita nella misura in continuo del livello del percolato in pozzo, ove è stato applicato l'emungimento per una durata di 3 ore, con successiva misura della ricarica del livello a seguito della disattivazione dell'emungimento; la prova è stata ripetuta con le medesime modalità nel giorno successivo.

Tabella 10.1 Prove di recupero - Sintesi volumi estratti/abbassamenti

Pozzo di prova	data	abbassamento (m)	volumi estratti (mc)
B	24-giu-2020	-3.39	11.52
B	25-giu-2020	-3.17	13.20
D1bis	24-giu-2020	-12.97	5.85
D1bis	25-giu-2020	-13.92	6.05
I1bis	24-giu-2020	-6.27	5.42
I1bis	25-giu-2020	-5.63	4.22
F2bis	2-lug-2020	-18.86	6.99
F2bis	3-lug-2020	-14.79	5.78
Gbis	2-lug-2020	-7.73	2.51
Gbis	3-lug-2020	-7.18	2.46
L1	2-lug-2020	-4.23	3.37
L1	3-lug-2020	-5.11	3.56

Tabella 2.2: Prove di recupero – Sintesi volumi estratti/abbassamenti (Tabella 10.1 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 112/252)

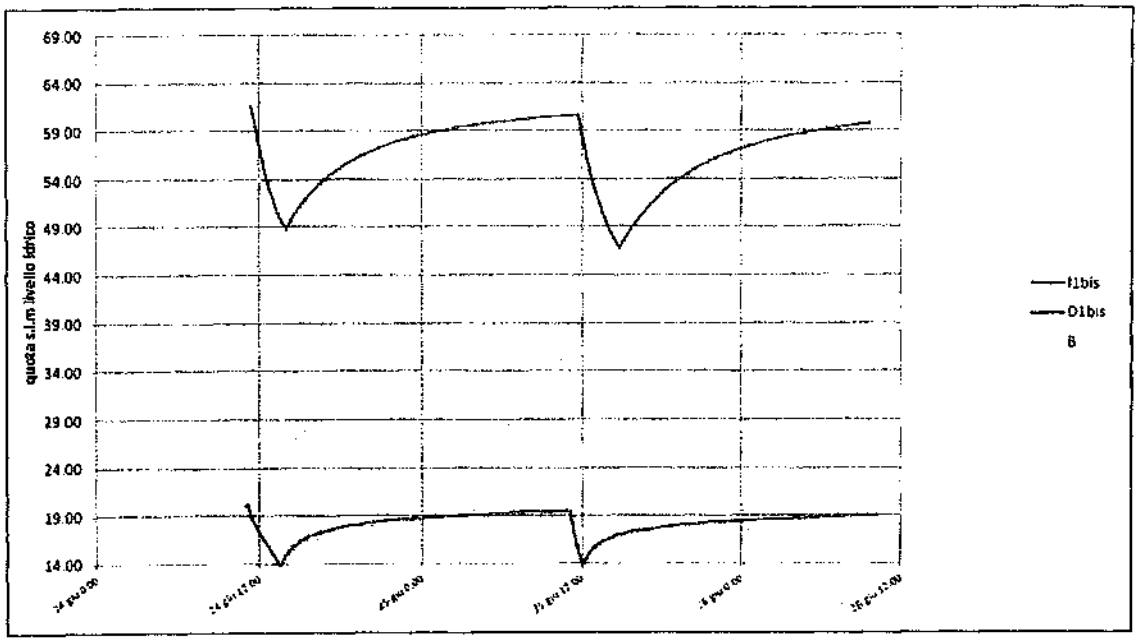


Figura 2.1: Prove di recupero del percolato – Pozzi B, D1bis, I1bis – Curve abbassamenti/tempo (Figura 10.2 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 114/252)

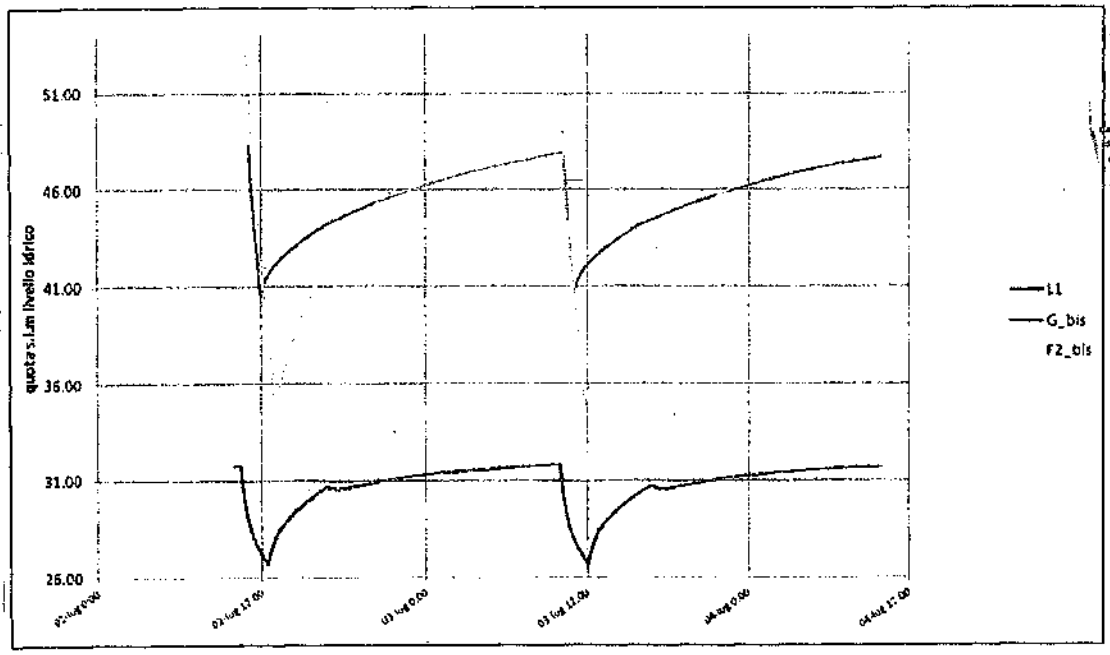


Figura 2.2: Prove di recupero del percolato – Pozzi G, F2bis, L1 – Curve abbassamenti/tempo (Figura 10.3 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 114/252)

Dall'esame delle curve di abbassamento e ricarica ricostruite utilizzando i dati registrati dai datalogger nel corso degli emungimenti è stata evidenziata una differente risposta dei vari pozzi alla sollecitazione indotta dall'emungimento. I pozzi D1bis e F2bis hanno fatto registrare abbassamenti del livello superiori ai 10 m a fronte di un volume medio di emungimento di circa 6 mc, mentre l'abbassamento medio registrato nel pozzo B è risultato di circa 3m a fronte di un volume medio estratto nel corso delle due prove di circa 12 mc. Il diverso comportamento può essere ricondotto alla differente efficienza dei pozzi

di recupero, con particolare riferimento al tratto filtrante, oltre che alle differenti caratteristiche di permeabilità del corpo rifiuti.

Le prove hanno evidenziato una ricarica costante del percolato nei pozzi a seguito dell'emungimento, attraverso il quale si riesce a richiamare il liquido dal volume dei rifiuti; gli esiti delle prove confermano dunque la connessione idraulica tra il pozzo ed il corpo rifiuti e la rappresentatività della misura del livello del percolato per la stima del volume di percolato presente in discarica.

In riferimento alle caratteristiche geometriche della discarica, il Collego peritale dei tecnici ISPRA ha raccolto e riepilogato le informazioni disponibili riportandole nella seguente tabella.

Tabella 14.1 Riepilogo dei parametri geometrici di riferimento utilizzati per ciascun lotto

Parametri di riferimento	u.m.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M
Quota fondo lotto	m slm	29	25	26	28	23	24	31	24	11	27	29
Superficie di base	ha	8.9	25.2	17.2	17.2	13	11.9	11.5	13.2	14.2	4.7	4.56
Superficie sommitale	ha	4.9	16	14.3	14.6	11	11.3	9.7	10.6	10.6	3.5	2.7
Superficie media	ha	6.90	20.60	15.75	15.90	12.00	11.60	10.60	11.90	12.40	4.10	3.63
Volumi invaso di progetto	Mln mc	1.5	5.3	4.5	4.6	2.7	3.1	2.7	3.5	3.4	1	0.9
Inizio esercizio	anno	1985	1986	1991	2003	1992	1993	1988	2001	1998	1998	2006
Fine abbancamenti prima fase	anno	1987	1988	1993	2008	1997	2001	1990	2008	2003	2001	2007
h media strati prima fase	m	8.6	6.2	9.5	6.7	7.1	7.9	16.7	7.1	7.2	6.5	5.8
Superf. fase di ricarica	ha	-	13.70	9.18	-	13.61	8.7.	4.70	5.31	5.03	-	-
Inizio fase di ricarica	anno	-	2009	2009	-	2009	2012	2009	2009	2009	-	-
Fine abbancamenti ricarica	anno	-	2011	2013	-	2011	2013	2011	2009	2011	-	-
h media strati fase ricarica	m	-	3.40	5.40	-	1.70	5.10.	5.00	5.50	5.90	-	-

Tabella 2.3: Riepilogo dei parametri geometrici di riferimento utilizzati per ciascun lotto (Tabella 14.1 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 160/252 e 161/252)

2.3 DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI PERCOLATO ATTUALMENTE PRESENTE IN DISCARICA

La descrizione delle modalità di determinazione del volume di percolato attualmente presente in discarica è riportata nella Sezione 4 - Capitolo 20.2 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021. Tale valutazione è stata eseguita per ottemperare al quesito n. 1 formulato dal GIP De Robbio nell'ambito dell'Incidente Probatorio P.P. n. 10455/17RGNR n. 13930/18GIP (cfr. par. 2.1).

I dati utilizzati per la stima sono:

- le misure di soggiacenza del percolato eseguite tra giugno e settembre 2020, citate nel paragrafo 2.2 del presente documento;
- le caratteristiche geometriche del corpo rifiuti, con particolare riferimento al volume che si trova in condizioni sature, determinato moltiplicando l'estensione media del fondo di ciascun lotto per lo spessore medio del battente idraulico di percolato identificato sulla base delle misure di cui al punto precedente;
- le caratteristiche fisiche del corpo rifiuti, in termini di percentuale dei vuoti corrispondente al valore della porosità efficace.

In riferimento alle caratteristiche fisiche del corpo rifiuti, la RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021 riporta le definizioni di porosità complessiva del corpo rifiuti, che è composta dalla *Porosità efficace* e dal suo valore complementare *Capacità di ritenzione*. La Porosità efficace in particolare indica la parte dei vuoti da cui l'acqua può essere rilasciata per l'effetto della gravità, per cui utilizza tale parametro per la definizione dell'aliquota dei fluidi soggetta a movimenti gravitativi.

Nello specifico sono state effettuate n. 2 stime per la determinazione del volume dei rifiuti saturi:

- la stima del volume totale di percolato presente, considerando l'altezza totale del battente medio presente in ogni lotto;
- la stima del volume del percolato estraibile, considerando un battente minimo tecnicamente raggiungibile pari ad un franco medio di 2 m di percolato non estraibile sul fondo della vasca.

Lotto	Quota fondo lotto	Superficie media	ID Pozzi e altezza battente considerato	battente medio	volume rifiuti saturi	Valori ridotti (per stima perc. estraibile)	
						battente medio	volume rifiuti saturi
	m slm	ha	m	m	mc	m	mc
A	29	6.90	A-1282 (15.2 m)(*) A-315 (12.4 m)(*) A-1315 (13.8 m)(*)	13.8(*)	952.200	11.8(*)	814.200
B	25	20.60	B (3.6 m)	3.6	741.600	1.6	329.600
C	26	15.75	C-397 (12.6 m)(*) C-423 (17.2 m)(*) C-868 (5.1 m)(*) C-2106 (10.5 m)(*)	11.3(*)	1.779.750	9.3(*)	1.464.750
D	28	15.90	D1bis (25.4 m)	25.4	4.038.600	23.4	3.720.600
E	23	12.00	Ebis (7.2 m)	7.2	864.000	5.2	624.000
F	24	11.60	F1 (37. m) F2bis (27.3 m)	32.2	3.723.600	30.2	3.491.600
G	31	10.60	Gbis (18. m)	18.0	1.908.000	16.0	1.696.000
H	24	11.90	H2bis (10.3 m)	24.2	2.867.900	22.2	2.629.900
I	11	12.40	I1bis (8.8 m)	8.8	1.091.200	6.8	843.200
L	27	4.10	L1 (4.8 m) L2 (13.7 m)	9.3	377.200	7.3	295.200
M	29	3.63	M (4.3 m)	4.3	156.090	2.3	83.490
Totali		125.38		14.8(**)	18.500.140	12.8(**)	15.992.540

(*) Valori del battente determinati rispetto alla misura effettiva dal fondo pozzo anziché dal fondo lotto
(**) Valore della media ponderata in funzione della superficie dei lotti

Tabella 2.4: Sintesi dei parametri utilizzati per il calcolo del volume di rifiuti saturo (Tabella 20.2 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 213/252)

Attraverso i calcoli sopra descritti è stato stimato un **volume di rifiuti saturi pari a 18.500.140 mc; applicando una riduzione di 2m al battente di percolato**, volendo così considerare la sola aliquota estraibile, il **volume di rifiuti saturi è pari a 15.992.540 mc**.

Successivamente, per ciascun lotto, al volume di rifiuto saturo è stata applicata la Porosità efficace, desunta dalla letteratura tecnica. In particolare, nella stessa RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, nel Capitolo 18, sono riportati i riferimenti scientifici consultati e selezionati per gli scopi della perizia. In particolare è stato selezionato il range di valori individuato da Hudson et alii (2004) in quanto ritenuti *maggiormente conservativi e specificamente riferiti a condizioni sotto carico*; i valori variano tra 1,5% e 14,5% a fronte di una Porosità totale che varia tra 45,5% e 55%. Nello studio di Hudson i valori di Porosità efficace sono stati correlati con la pressione verticale; nella seguente tabella si riportano i valori relativi agli studi sperimentali condotti. In particolare la RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021 evidenzia che i **massimi valori di pressione verticale pari a 463 kPa** (equivalenti ad oltre 47 m di colonna d'acqua), **cui corrisponde una Porosità efficace dell'1,5%, *"sono ampiamente significativi anche per le condizioni presenti nella discarica di Malagrotta"*.**

Average vertical stress kPa	Dry density ρ_{dry} Mg m^{-3}	Volumetric water content at field capacity (FC), θ_{FC} %	Drainable porosity θ_d %	Volume of voids V_v %	Volume of solids V_s %	Specific volume v	Average particle density ρ_s Mg m^{-3}
34	0.39	41.1	14.4	55.5	44.5	2.247	0.876
65	0.43	43.0	12.6	55.6	44.4	2.252	0.968
120	0.50	44.5	6.5	51.0	49.0	2.041	1.020
241	0.62	45.0	2.0	47.0	53.0	1.887	1.170
463	0.71	44.0	1.5	45.5	54.5	1.835	1.303

Tabella 2.5: Dati caratteristici degli RSU determinati in prove sperimentali sotto carico in celle di grandi dimensioni (da Hudson et alii, 2004) (Tabella 18.2 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 186/252)

Si riporta inoltre un grafico comparativo tra i valori di Porosità efficace individuati da Hudson ed i valori dello stesso parametro per alcune tipologie di terreni naturali, evidenziando che il range individuato da Hudson contiene *"valori comparabili a quelli minimi dei limi fino a comprendere buona parte di quelli tipici delle sabbie"*.

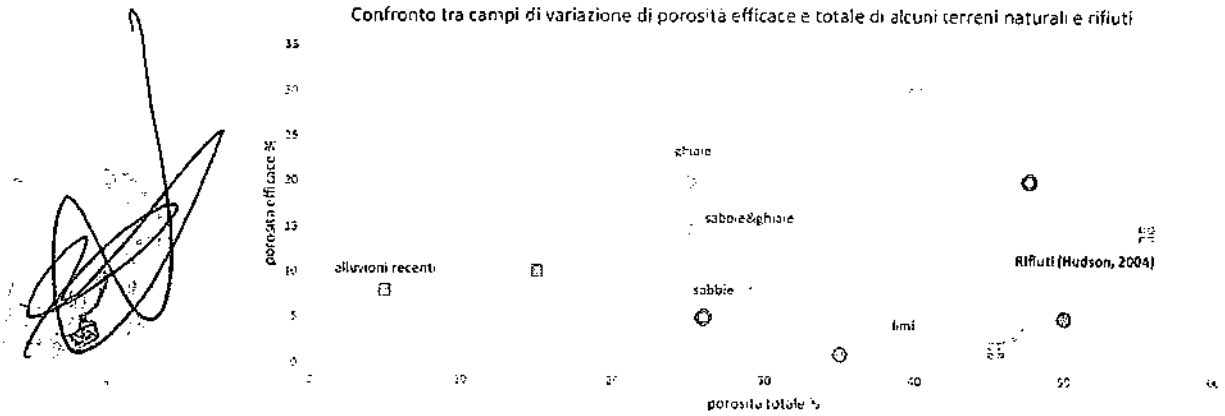


Figura 2.3: Confronto tra valori caratteristici di porosità di alcuni terreni naturali (da Celico, 1986) e rifiuti (da Hudson et alii, 2004) (Figura 18.2 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 187/252)

In sintesi il Collego peritale dei tecnici ISPRA conclude con l'individuazione di un **intervallo di riferimento per la Porosità efficace compreso tra 1,5% (minimo di Hudson) e 5% (massimo dei limi)** indicando che *"tale assunzione, benché fortemente compressa sui valori inferiori delle distribuzioni riferite per gli R.S.U. in letteratura, si ritiene comunque tecnicamente accettabile, soprattutto se riferita agli strati inferiori, in considerazione dei forti spessori che caratterizzano la discarica di Malagrotta e, pertanto, dell'elevato grado di compattazione dei rifiuti"*.

Applicando tali valori ai volumi dei rifiuti saturi indicati nella Tabella 2.4, si ottengono i volumi di percolato totale ed estraibile riportati nella seguente tabella.

Lotti	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	Totale
Stima max mc (por.eff. 5%)	47.610	37.080	88.988	201.930	43.200	186.180	95.400	143.395	54.560	18.860	7.805	**925.007**
Stima min mc (por.eff. 1.5%)	14.283	11.124	26.696	60.579	12.960	55.854	28.620	43.019	16.368	5.658	2.341	**277.502**
Valori ridotti calcolati per battente minimo tecnicamente raggiungibile pari a 2m (stima volumi estraibili)												
Stima max mc (por.eff. 5%)	40.710	16.480	73.238	186.030	31.200	174.580	84.800	131.495	42.160	14.760	4.175	**799.627**
Stima min mc (por.eff. 1.5%)	12.213	4.944	21.971	55.809	9.360	52.374	25.440	39.449	12.648	4.428	1.252	**239.888**

Tabella 2.6: Valori stimati dei quantitativi di percolato presenti nei lotti della discarica (Tabella 20.3 della RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, pag. 214/252)

Dai calcoli effettuati dal Collego peritale dei tecnici ISPRA si evince che il volume del percolato presente in discarica è stato stimato all'interno del range 277.502 mc ÷ 925.007 mc, mentre il volume del percolato estraibile è stato stimato all'interno del range 239.888 mc ÷ 799.627 mc.

3. ASSUNZIONI ED ESITI DELLA RELAZIONE TECHNITAL 2022

Nel presente capitolo viene sintetizza la RELAZIONE TECNICA GESTIONE PERCOLATO allegata al Progetto Definitivo della copertura superficiale finale della Discarica di Malagrotta, a firma della società Technital S.p.A., della quale si riportano i passaggi ritenuti maggiormente di interesse per l'obiettivo del presente documento, cioè la valutazione del volume di percolato estraibile dalla discarica di Malagrotta; si ritiene utile suddividere l'esposizione in termini di:

- Obiettivi dello studio in esame (di interesse per il presente documento);
- Dati di base utilizzati e indagini specifiche condotte nell'ambito della progettazione definitiva;
- Determinazione del volume di percolato.

3.1 OBIETTIVI DELLA RELAZIONE

La RELAZIONE TECNICA GESTIONE PERCOLATO è stata redatta nell'ambito del Progetto Definitivo della copertura superficiale finale della Discarica di Malagrotta, di cui costituisce un allegato. La relazione ha lo scopo di:

- Illustrare gli esiti principali dedotti dall'analisi dei dati disponibili relativi al percolato e ai livelli di falda;
- Stimare il quantitativo di percolato formato annualmente nel periodo 2010-2021 per effetto della sola infiltrazione superficiale;

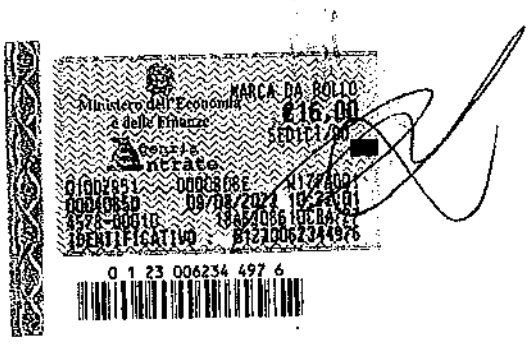
  Stimare preliminarmente il quantitativo di percolato attualmente presente e di quello effettivamente estraibile;
- Implementare, a partire da una condizione di riferimento rappresentativa dello stato attuale, una serie di possibili scenari di progetto che abbiano come scopo la riduzione del battente di percolato interno alla discarica tramite una modellazioe numerica di flusso.

3.2 DATI DI BASE UTILIZZATI E INDAGINI SPECIFICHE CONDOTTE NELL'AMBITO DELLA PROGETTAZIONE DEFINITIVA

Per la redazione della RELAZIONE TECNICA GESTIONE PERCOLATO è stata acquisita la documentazione storica inerente il sito, propedeutica alla progettazione definitiva dell'intervento di copertura finale della discarica.

Per quanto riguarda i dati di base, sono stati acquisiti ed elaborati i livelli di percolato rilevati all'accensione e allo spegnimento delle pompe di estrazione tra il 2018 ed il 2021. Tuttavia i dati sono risultati incompleti per la maggior parte dei pozzi, mentre sono risultati piuttosto completi per i pozzi B, Ebis, Gbis, L2 e M.

Nella seguente tabella si riporta una tabella estratta dal documento II141I-PD-RD-0001-C0 RELAZIONE TECNICA GENERALE del Progetto Definitivo, che riporta le misure effettuate tra novembre 2018 e dicembre 2021, le misure effettuate nell'ambito dell'incidente probatorio di giugno 2020 e le misure effettuate da Technital nell'ambito della progettazione definitiva nel maggio 2022.



	Livelli Misurati			Stato pozzo	
	m slmm				
Periodo	11/2018 - 12/2021	18-19/06/2020	31/05/2022	Status al 2020	Status al 2022
Soggetto	Amministratore Giudiziario	Incidente Probatorio	Misura Technital		
	Intervallo				
Nome					
B	27-28	28.1	26.929	attivo	attivo
D1bis	50-56	53.56	Tappato	attivo	inattivo
D2bis	62-63,5	-	67.094	-	inattivo
Ebis	29,5-30	30.09	28.939	attivo	inattivo
F2bis	48-54	51	54.313	attivo	inattivo
F1	55-59	60.75	59.704	inattivo	inattivo
G	-	ostruito	53.9	inattivo	inattivo
Gbis	47-50	49.24	52.267	attivo	inattivo
H2bis	36-38	ostruito	45.708	inattivo	inattivo
H1	-	62.33	63.238	inattivo	inattivo
H1bis	56-62	-		-	sconosciuto
I2	27-30	26.34	27.395	inattivo	attivo
I1bis	18-20	19.36	29.659	attivo	inattivo
L1	30-36	31.79	38.58	attivo	inattivo
L2	35-51	40.69	50.592	attivo	inattivo
M	33-39	non misurabile	37.97	attivo	inattivo
Note: Livelli misurati su Pozzi diametro 600 mm, tranne Gbis e D2bis che hanno D=355mm. Intervallo Livelli indicato per periodo 2018-2021 dedotti da misure giornaliere a inizio pompaggio, la momento dell'accensione quotidiana del pozzo					

Tabella 3.1: Pozzi di estrazione del percolato. Livelli misurati da Novembre 2018 a Maggio 2022 (Tabella 9-3 della RELAZIONE TECNICA GENERALE DEL PROGETTO DEFINITIVO, pag. 123)

Nell'ambito della progettazione definitiva sono state svolte indagini geognostiche, la cui descrizione di dettaglio è riportata nell'elaborato allegato al Progetto Definitivo II141I-PD-RI-0001-C0 RELAZIONE SULLE INDAGINI 2022; in generale sono state eseguite

- indagini interne, consistite nella realizzazione di sondaggi sul corpo della discarica e sondaggi lungo gli argini perimetrali interni, prelievo di campioni di terreno e di rifiuto, esecuzione di prove di laboratorio e misure sulla strumentazione installata (inclinometri, assestimetri e piezometri);
- indagini esterne, consistite nella realizzazione di sondaggi sugli argini perimetrali esterni ed esternamente al perimetro della discarica ed al diaframma plastico, prelievo di campioni di terreno, esecuzione di prove di laboratorio e misure sulla strumentazione installata (piezometri), esecuzione di prove penetrometriche continue di tipo CPTU;
- Accertamenti sul diaframma plastico, attraverso la realizzazione di pozzetti esplorativi;
- Indagini geofisiche, consistite in tomografie elettriche disposte lungo il perimetro della discarica e uno stendimento longitudinale lungo l'intera sommità della discarica; sono state inoltre condotte prove MASW e HVSR per dettagli locali;
- Interferometria satellitare;
- Rilievo topografico;
- Rilievo del biogas.

Focalizzando l'attenzione sulle indagini interne si annoverano le seguenti attività:

- Realizzazione di n. 17 sondaggi sul corpo discarica e sugli argini perimetrali; la quasi totalità dei sondaggi è stata attrezzata a piezometro, mentre su n. 2 sondaggi (SI02A e SI10A) sono stati installati dispositivi per il monitoraggio dei cedimenti della discarica;
- Campionamento di n. 24 campioni di terreno rimaneggiati, n. 30 campioni di terreno indisturbati, n. 13 campioni di rifiuti indisturbati; nella specifica di indagine erano previsti n. 17 campioni indisturbati di rifiuti, ma il campionamento è stato *"ostacolato/limitato dalla elevata consistenza del materiale e dalla presenza di elementi metallici"* (cit. par. 6.1 doc. II141I-PD-RI-0001-C0 Relazione sulle indagini 2022); l'attraversamento dei rifiuti per spessori importanti ha subito difficoltà operative a causa della forte presenza di biogas e alla

presenza di percolato messo in pressione dal biogas; pertanto sono stati prelevati ulteriori n. 5 campioni di rifiuti dai sondaggi realizzati lungo gli argini della discarica;

- Esecuzione di prove Lefranc;
- Esecuzione di prove SPT (Standard Penetration Test);
- Esecuzione di prove pressiometriche in corrispondenza di n. 2 sondaggi (SI02 e SI14);
- Prove geotecniche di laboratorio su campioni di terreno e rifiuti indisturbati (determinazione del contenuto d'acqua, del peso di volume, dei limiti di Attemberg, delle granulometrie, esecuzione di prove di taglio di tipo triassiale e di prove di permeabilità in cella edometrica).

3.3 DETERMINAZIONE DEL VOLUME DI PERCOLATO ATTUALMENTE PRESENTE IN DISCARICA

La descrizione delle modalità di determinazione del volume di percolato attualmente presente in discarica è riportata nel paragrafo 7.4 della RELAZIONE TECNICA SULLA GESTIONE PERCOLATO, rimandando all'elaborato II141I-PD-RT-0002-C0 RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO per la trattazione completa.

I dati utilizzati per la stima sono:

- Il modello 3D della discarica dedotto dal rilievo topografico considerato nell'ambito della Progettazione definitiva;
- La quota media della superficie libera del percolato, che si attesta attorno alla quota di +40 m s.l.m., che separa il corpo di rifiuti in condizione di totale saturazione, posto al di sotto, dal corpo rifiuti in condizioni di parziale saturazione, posto al di sopra;
- le caratteristiche fisiche del corpo rifiuti, in termini di porosità e grado di saturazione.

La quota media della superficie libera del percolato, posta pari a circa +40 m s.l.m., che separa il corpo di rifiuti in condizione di totale saturazione, posto al di sotto, dal corpo rifiuti in condizioni di parziale saturazione, posto al di sopra, è stata determinata attraverso l'interpretazione dalla tomografia elettrica.

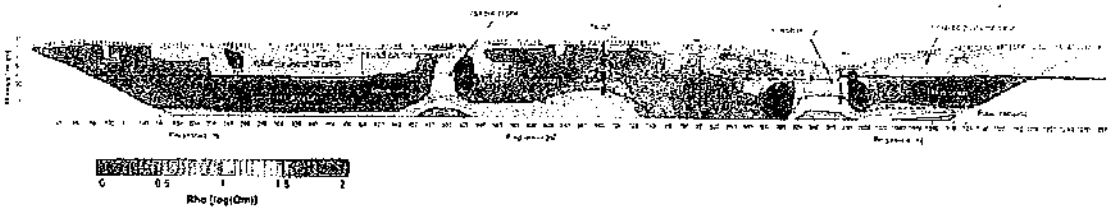


Figura 3.1: Stendimento geoelettrico sommitale (ERT sommitale) – Sezione con definizione della quota della fascia di saturazione dei rifiuti (Figura 6-12 della RELAZIONE TECNICA GESTIONE DEL PERCOLATO, pag. 61)

Al fine della modellazione numerica di flusso, condotta nell'ambito della Progettazione Definitiva, è stato assunto quale carico piezometrico di riferimento per i piezometri interni la quota di +40 m s.l.m., mentre per i piezometri perimetrali è stato considerato il carico piezometrico medio annuo registrato nel periodo 2007-2021. La seguente figura mostra l'interpolazione dei valori di riferimento effettuata con il metodo Kriging.

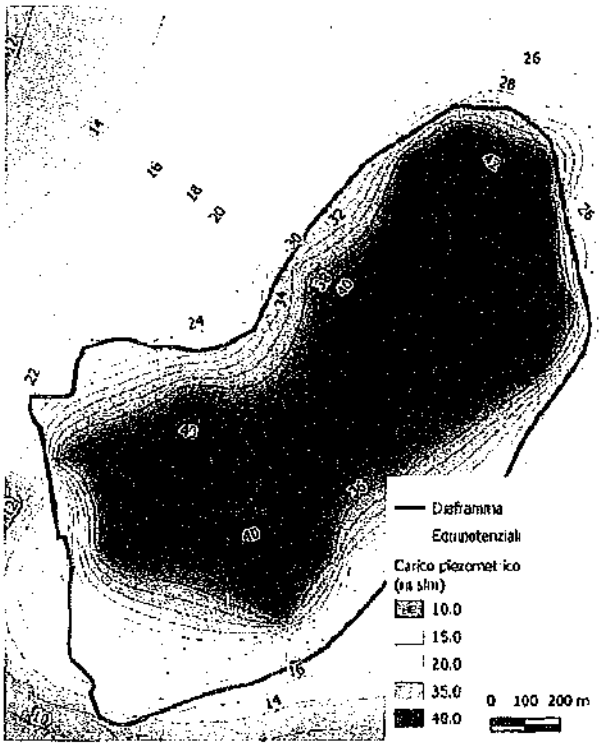


Figura 3.2: Andamento delle linee equipotenziali internamente alla discarica ottenuto dai valori di riferimento (Figura 7-4 della RELAZIONE TECNICA GESTIONE DEL PERCOLATO, pag. 66)

Attraverso l'intersezione tra il modello 3D della discarica e la superficie libera del percolato sono stati stimati 18.058.416 m^3 di rifiuti saturi e 28.881.655 m^3 in condizioni di parziale saturazione. Nella relazione è inoltre specificato che questa valutazione include *"anche argini e copertura, la cui entità volumetrica è comunque trascurabile rispetto al volume globale"*.

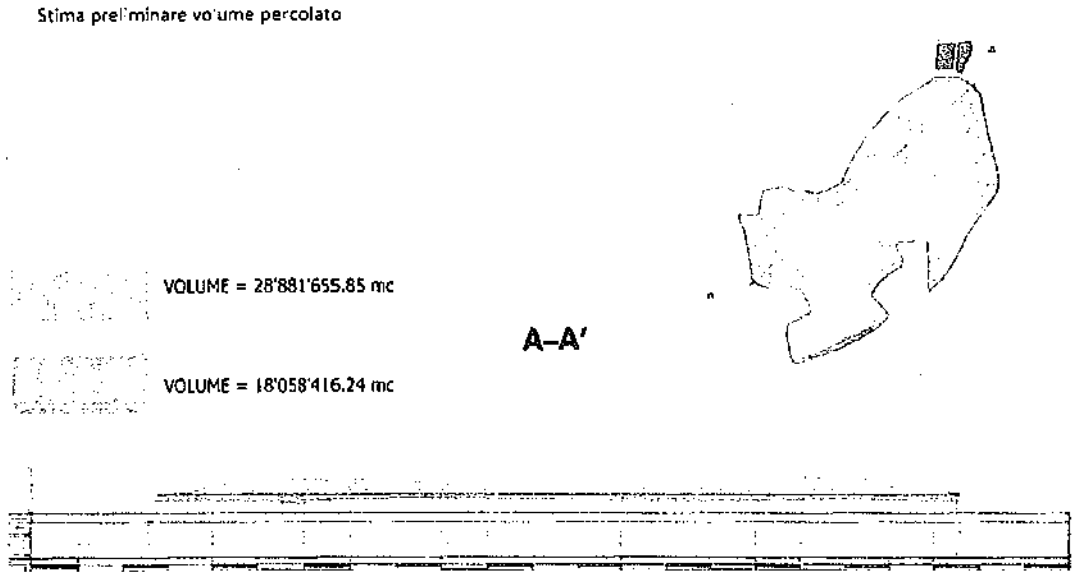


Figura 3.3: Volumi di deposito saturo e parzialmente saturo (Figura 7-7 della RELAZIONE TECNICA GESTIONE DEL PERCOLATO, pag. 70)

Dalla consultazione del documento If141I-PD-RT-0002-C0 RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, si evince che le indagini di laboratorio condotte nell'ambito della Progettazione definitiva hanno permesso di stimare l'andamento dei valori di porosità totale e del grado di saturazione dei rifiuti in corrispondenza dei campioni indisturbati. Si precisa altresì che il prelievo di campioni indisturbati è stato possibile nella sola coltre di rifiuti in condizioni di parziale saturazione.

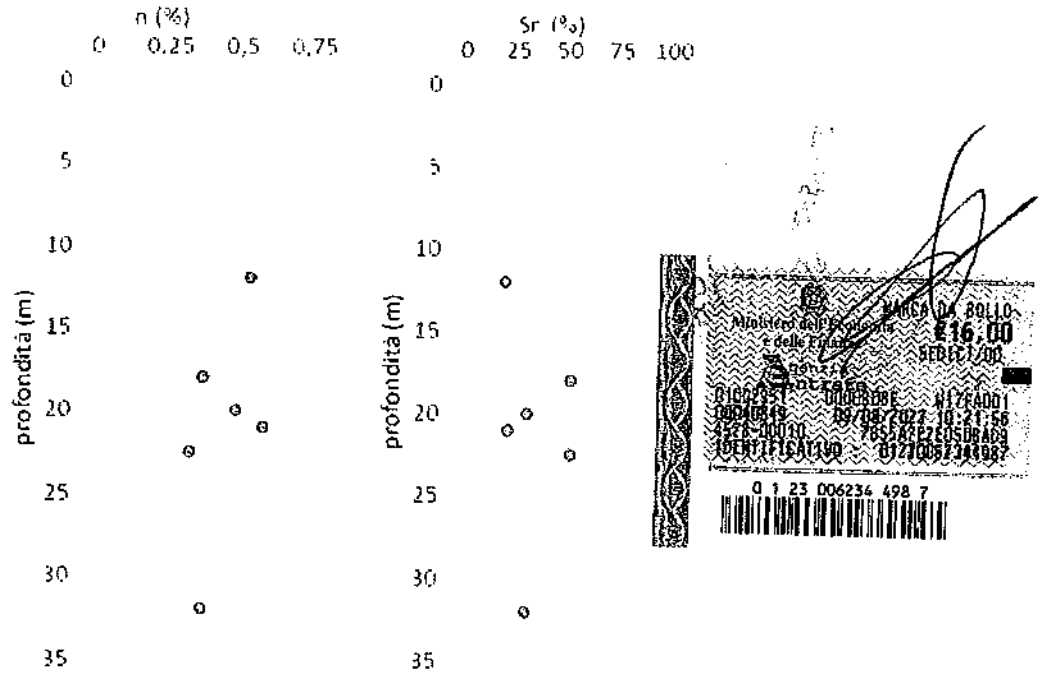


Figura 3.4: Indagini geognostiche 2022 – RSU – Caratteristiche fisiche generali dei campioni indisturbati in funzione della profondità di prelievo (Figura 11-2 della RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, pag. 70)

Il valor medio della porosità totale è risultato pari a 44.6%, mentre il valore medio del grado di saturazione risulta pari a 34.5%. Tuttavia per tenere conto della riduzione della porosità con la pressione di confinamento, nella stima del volume di percolato è stata considerata una porosità totale pari a 45% per la zona non satura, pari alla media dei valori sperimentali, e pari a 40% per la zona satura, valore sul margine inferiore dell'intervallo sperimentale e dei dati di letteratura (45,5%-55,5% - range di Hudson per la porosità sotto tensione).

Sulla base delle valutazioni volumetriche, sulla porosità totale e sul grado di saturazione, è stato stimato il volume di percolato moltiplicando il volume rifiuti per il grado di saturazione Sr (1 per lo strato saturo e 0,345 per lo strato in parziale saturazione) e per la porosità totale n (0,4 per lo strato saturo e 0,45 per lo strato in parziale saturazione), ottenendo:

$$V_{w\_sat} = S_r \cdot n \cdot V = 1 \cdot 0.40 \cdot 18.058.416 = 7.223.366\ \mathrm{m^3}$$

$$V_{w\_unsat} = S_r \cdot n \cdot V = 0.345 \cdot 0.45 \cdot 28.881.656 = 4.483.877\ \mathrm{m^3}$$

Nella relazione successivamente si sommano i due contributi delle porzioni satura e parzialmente satura del corpo rifiuti, ottenendo il seguente volume di percolato presente in discarica:

$$V_{w\_tot} = V_{w\_sat} + V_{w\_unsat} = 11.707.243\ \mathrm{m^3}$$

Nel successivo paragrafo 7.5 della relazione in oggetto è riportata la sintesi della stima preliminare del volume di percolato estraibile, rimandando all'elaborato II141I-PD-RT-0002-C0 RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO per la trattazione completa.

La stima proposta fa riferimento al volume di percolato *"che drena liberamente per gravità dal rifiuto, in condizioni di totale saturazione"*, facendo riferimento al concetto di porosità efficace. Per tale parametro non sono disponibili valori sperimentali sito-specifici, ma sono utilizzati valori di letteratura derivanti da sperimentazioni; sono stati considerati i valori caratteristici di porosità efficace dei rifiuti proposti da Hudson, in funzione dello stato tensionale efficace di riferimento.

Il relatore considera per lo scopo dello studio i due estremi dei valori di porosità efficace n_e, rispettivamente pari a 1,5% e 14,4%, rispettivamente corrispondenti alle tensioni verticali medie di 463 kPa e 34 kPa, ottenendo il seguente intervallo di valori, in funzione della porosità efficace:

$$V_{w\_d} = V_t^{sat} \cdot n_e = 18.058.416 \cdot 0{,}015 = 270.876\ m^3$$

$$V_{w\_d} = V_t^{sat} \cdot n_e = 18.058.416 \cdot 0.144 = 2.600.412\ m^3$$

Technital precisa a seguire che ***"è importante ribadire come la precisione della stima del percolato estraibile può essere aumentata e confermata solo sulla base di prove di emungimento di pozzi in sito, preferibilmente con rilievo del cuneo di depressione ad opera di piezometri: in questo modo, si riusciranno ad avere conferme dirette sulla porosità efficace e sulla permeabilità su macro-scala del rifiuto. Tali attività dovranno essere necessariamente previste sotto forma di campi prova nelle prime fasi di progettazione della copertura provvisoria e del sistema di aggottamento"***.

3.3.1 *Approfondimento sulle valutazioni volumetriche relative al percolato nell'ambito del Progetto definitivo*

Considerato che la RELAZIONE TECNICA SULLA GESTIONE PERCOLATO fa riferimento all'elaborato RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO per una trattazione completa del calcolo dei volumi di percolato presente ed estraibile, tale elaborato è stato consultato nell'ambito della predisposizione del presente documento, così come la RELAZIONE GENERALE del Progetto Definitivo.

Nella RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO si riscontra al paragrafo 11.3 un approfondimento riguardante il concetto di Porosità efficace e della variabilità di tale parametro, approfondimento riportato anche nella Relazione tecnica generale del Progetto definitivo (paragrafo 17.2), non citato nella RELAZIONE TECNICA SULLA GESTIONE PERCOLATO. La relazione riporta la medesima tabella tratta dalla pubblicazione di Hüdson et al. (2004), riportata anche nella RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021, che mostra la diminuzione del parametro porosità efficace al crescere della tensione media verticale.

Average vertical stress kPa	Dry density ρ_d, Mg m^{-3}	Volumetric water content at field capacity WC_{ad} %	Drainable porosity n_e %	Volume of voids V_v %	Volume of solids V_s %	Specific volume v	Average particle density ρ_s, Mg m^{-3}
34	0.39	41.1	14.4	55.5	44.5	2.247	0.876
68	0.43	43.0	12.6	55.6	44.4	2.252	0.968
120	0.50	44.5	6.5	51.0	49.0	2.041	1.020
241	0.62	45.0	2.0	47.0	53.0	1.887	1.170
463	0.71	44.0	1.5	45.5	54.5	1.835	1.303

Tabella 3.2: Valori di porosità efficace (drainable porosity) in funzione della tensione media verticale (da Hudson ed al. 2004) (Tabella 11-1 della RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, pag. 71)

Nella RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO e nella RELAZIONE GENERALE si aggiunge inoltre:

"Definito questo intervallo di variabilità, una stima più verosimile può essere realizzata introducendo una variazione della porosità con la profondità e quindi con la tensione di confinamento. Nell'ipotesi che tale variazione sia lineare tra le quote di 40 m s.l.m.m. 20 m s.l.m.m., si ottiene un valore di 1.3 milioni di m³ come rappresentato nella Tabella seguente."

Quota	Porosità efficace	Volume saturo	Volume estraibile
(m s.l.m.m.)		m³	m³
40	14,4%		
35	10,8%	4.514.604	567.711
30	7,2%	4.514.604	405.186
25	3,7%	4.514.604	244.917
20 (fondo discarica)	1,5%	4.514.604	116.251
	Totale	**18.058.416**	**1.334.065**

Tabella 3.3: Variazione della porosità con la profondità e volume di percolato estraibile (Tabella 11-2 della RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, pag. 72)

Nella valutazione condotta è stato applicato quindi un valore di porosità crescente ai diversi strati della discarica, procedendo dallo strato più profondo (cui è associata la massima tensione verticale, dovuto al carico dei rifiuti sovrastanti, e quindi la minima porosità efficace) allo strato più superficiale; si evidenzia che nel calcolo non è stato applicato il valore di porosità efficace massimo pari a 14,4% ma il valore massimo applicato è pari a 10,8%.

Nella relazione si conclude asserendo che *"la componente di percolato effettivamente estraibile è una porzione del volume presente nella sola zona satura: secondo le stime basate su dati di letteratura, questo volume varia tra 0,27 e 2,6 milioni di m³, con una stima verosimile di 1,3 milioni di m³".*

4. VALUTAZIONE COMPARATA DELLE STIME DEI DUE STUDI

L'analisi approfondita delle due relazioni, RELAZIONE TECNICI ISPRA 2021 e RELAZIONE TECHNITAL 2022, ha permesso di giungere alle considerazioni di seguito illustrate.

I due studi hanno basato le proprie stime sui medesimi dati e documenti pregressi, disponibili per la discarica Malagrotta.

Per entrambi gli studi sono state svolte alcune attività di campo che, tra le altre finalità, hanno avuto lo scopo di approfondire la tematica relativa alla quantificazione del volume di percolato presente/estraibile nella discarica di Malagrotta.

Technital, pur avendo realizzato sondaggi ed effettuato alcune misure piezometriche nel 2022, non ha utilizzato tali dati per le stime del percolato di interesse. Diversamente, il Collegio peritale dei tecnici ISPRA ha provveduto ad effettuare una specifica campagna di monitoraggio piezometrico e ha utilizzato i dati derivati dalla medesima per le stime del percolato di interesse.

I tecnici ISPRA hanno operato approfondimenti lotto per lotto, identificando un battente di percolato medio per ciascun lotto, derivante dalla campagna di misura del 2020, al fine della determinazione del volume saturo dei rifiuti. Technital, differentemente, non ha effettuato approfondimenti lotto per lotto, né ha utilizzato misure piezometriche di campo; bensì ha identificato una quota media comune a tutto il corpo rifiuti, ipotizzata a partire da una indagine indiretta (tomografia elettrica), alla quale si attesterebbe la superficie libera del percolato, pari a +40 m s.l.m..

Calcolo del volume dei rifiuti in condizioni di saturazione

Le stime operate dai tecnici ISPRA risultano maggiormente approfondite e sito-specifiche, basate anche su rilievi puntuali di tipo diretto (misure freatimetriche) e non solo su indagini indirette (geofisiche), come invece operato per la relazione Technital. Nonostante il diverso approccio, i risultati finali ISPRA e Technital sono i medesimi: la quantificazione del volume di rifiuti in condizioni di totale saturazione ottenuta dai tecnici ISPRA, pari a 18.500.140 mc, è pienamente confrontabile a quella ottenuta da Technital, pari a 18.058.416 mc (la differenza di 441.724 mc, pari al 2-3%, è scientificamente trascurabile).

Nell'ambito della perizia tecnica per incidente probatorio, i tecnici ISPRA hanno anche provveduto ad effettuare prove di pompaggio nei pozzi di captazione del percolato i cui esiti hanno permesso di confermare la connessione idraulica tra il pozzo oggetto di prova ed il corpo rifiuti, avvalorando la rappresentatività delle misure effettuate. Tali verifiche dirette non sono presenti nello studio Technital.

Calcolo del percolato presente in discarica

In riferimento alle **modalità di stima operate nella RELAZIONE TECHNITAL**, non risulta né pertinente né corretto l'utilizzo del parametro ***porosità totale*** per il calcolo del volume di percolato presente in discarica; da tale errore derivano indicazioni del tutto fuorvianti per le finalità del calcolo. Infatti, come anche espresso dalla stessa Technital nei documenti analizzati, *"al fine di valutare il* percolato estraibile da una discarica si deve fare riferimento alla ***porosità efficace***".

Giammai deve farsi riferimento alla porosità totale per il calcolo del percolato di discarica.

La *porosità efficace*, infatti, è il parametro corretto che indica il volume liquido soggetto a movimenti gravitativi. Diversamente, la *porosità totale* comprende anche la quota parte di liquidi trattenuta dalla capacità di campo, di fatto impossibile da estrarre. Pertanto al fine di addivenire ad una quantificazione del volume di percolato di una discarica, è imprescindibile considerare la sola quota parte soggetta a movimenti gravitativi e quindi correlata alla porosità efficace. Non per nulla la parola italiana "percolato" indica un liquido che percola, in movimento nel mezzo saturo, e pertanto estraibile! Per analogia concettuale, l'utilizzo della porosità totale per stabilire un volume di percolato in discarica, equivale a considerare come pioggia caduta anche l'umidità presente nell'aria che respiriamo, come pure porterebbe a considerare falda anche la sola umidità presente nei primi strati di terreno vegetale.

L'applicazione di tale approccio non corretto, nella RELAZIONE TECHNITAL 2022, è all'origine del calcolo di 11.707.243 mc di percolato presente in discarica. Un volume che, di fatto, non è percolato. Tale dato, risultato di una stima del tutto errata, può essere grave fonte di incomprensione e travisamento.

La stessa Technital supera il proprio errore operando nel seguito del proprio studio un calcolo del percolato estraibile utilizzando, questa volta, la *porosità efficace* e pervenendo a volumi inferiori di oltre 1 ordine di grandezza. Purtroppo Technital, pur superandolo, non elimina l'errore iniziale dal proprio studio.

Differentemente, le modalità di stima operate dai tecnici ISPRA 2021 hanno considerato, correttamente, la porosità efficace.

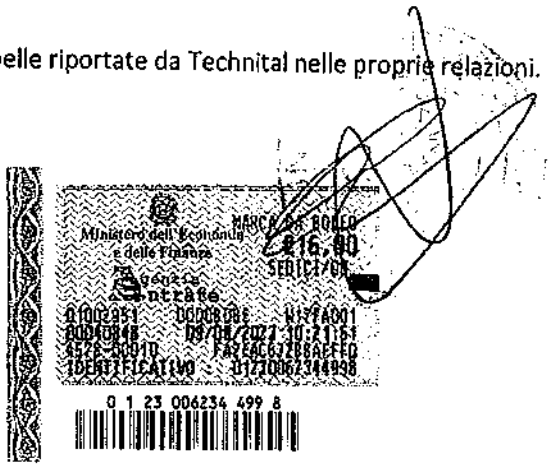
Entrando più approfonditamente nel merito dei calcoli eseguiti, con particolare riferimento ai coefficienti utilizzati, oltre a ribadire come il coefficiente di porosità totale non sia un indice tecnicamente valido per la stima del percolato di discarica, va anche osservato come i valori di porosità utilizzati da Technital per i propri calcoli non siano sito-specifici, pur avendo eseguito indagini di campo: tali valori non sono infatti relativi alla porzione di rifiuti in condizione di totale saturazione, in quanto il campionamento dei rifiuti condotto *"è stato ostacolato/limitato dalla elevata consistenza del materiale e dalla presenza di elementi metallici"*, come affermato dalla medesima Technital.

Calcolo del percolato estraibile presente in discarica

Per quanto riguarda il coefficiente di porosità efficace, i valori utilizzati in entrambe le valutazioni non sono sito-specifici e fanno riferimento a valori di letteratura condivisi tra i due studi (Hudson et ali., 2004); nel dettaglio il limite inferiore del range è pienamente condiviso tra gli studi (1,5%) e dà origine a volumi di percolato comparabili (239.888 mc vs 270.876 mc), mentre gli studi differiscono per il limite massimo del parametro utilizzato, pari a 5% per i tecnici ISPRA (riferito al limite massimo del campo dei limi) e pari a 14,4% per Technital (limite massimo del campo dei rifiuti (vedi Figura 2.3). Tale ultimo dato è del tutto fuorviante, in quanto non tiene in debito conto lo spessore del corpo rifiuti della discarica, un parametro che per la discarica di Malagrotta è estremamente rilevante e, pertanto, da tenere in opportuna considerazione (il corpo rifiuti di Malagrotta supera i 20 metri di spessore, un palazzo di 7 piani!). La stessa Technital, infatti, in un distinto elaborato allegato al Progetto Definitivo (RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, del 2022) e nella stessa RELAZIONE GENERALE del progetto definitivo, considera una porosità efficace variabile, a diverse profondità del corpo rifiuti e quindi in funzione della tensione verticale dovuta al peso della coltre della discarica, come suggerito nella stessa pubblicazione di Hudson, valutazione incomprensibilmente omessa nella RELAZIONE GESTIONE PERCOLATO.

In tale documento Technital perviene alla stima, definita ***"verosimile"*** dalla medesima Technital, di percolato estraibile pari a **1.334.065 mc.**

Si riportano di seguito gli estratti delle tabelle riportate da Technital nelle proprie relazioni.



Average vertical stress kPa	Dry density ρ_{dry} Mg m^{-3}	Volumetric water content at field capacity θ_{FC} %	Drainable porosity θ_d %	Volume of voids V_v %	Volume of solids V_s %	Specific volume v	Average particle density ρ_s Mg m^{-3}
34	0.39	41.1	14.4	55.5	44.5	2.247	0.876
65	0.43	43.0	12.6	55.6	44.4	2.252	0.968
120	0.50	44.5	6.5	51.0	49.0	2.041	1.020
211	0.62	45.0	2.0	47.0	53.0	1.887	1.170
403	0.71	44.0	1.5	45.5	54.5	1.835	1.303

Tabella 4.1: Valori di porosità efficace (drainable porosity) in funzione della tensione media verticale (da Hudson ed al. 2004) (Tabella 11-1 della RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, pag. 71)

Quota	Porosità efficace	Volume saturo	Volume estraibile
(m s.l.m.m.)		m^3	m^3
40	14,4%		
35	10,8%	4.514.604	567.711
30	7,2%	4.514.604	405.186
25	3,7%	4.514.604	244.917
20 (fondo discarica)	1,5%	4.514.604	116.251
	Totale	**18.058.416**	**1.334.065**

Tabella 4.2: Variazione della porosità con la profondità e volume di percolato estraibile (Tabella 11-2 della RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO, pag. 72)

Si rileva, inoltre, come la medesima Technital, nella valutazione condotta per strati, riveda la propria posizione, escludendo dalle valutazioni il limite massimo di 14,4%, utilizzato invece nella determinazione del range di volume di percolato estraibile.

La stima Technital di 1.334.065 mc di percolato estraibile , pur se superiore di circa il 30% ai valori massimi stimati dal Collegio peritale dei tecnici ISPRA, risulta paragonabile al limite superiore del range individuato dai tecnici ISPRA (925.007 mc); entrambi gli studi convergono pertanto verso una contrazione del valore di porosità efficace a causa dello spessore dei rifiuti abbancati in discarica.

I due studi convergono in merito alla necessità di eseguire ulteriori prove di campo al fine della determinazione dei parametri sito-specifici utili per una più precisa determinazione dei volumi di percolato presenti ed estraibili.

Nella seguente tabella si riporta un confronto tra le grandezze ottenute nelle due valutazioni.

VALUTAZIONI	COLLEGIO PERITALE ISPRA	TECHNITAL
Volume dei rifiuti in condizione di totale saturazione	18.500.140 mc	18.058.416 mc
Volume dei rifiuti in condizione di parziale saturazione	Non determinato	28.881.656 mc
Volume di percolato presente in discarica calcolato erroneamente in	Non determinato	Strato in totale saturazione 7.223.366 mc *(calcola operato erroneamente utilizzando la porosità totale)*

VALUTAZIONI	COLLEGIO PERITALE ISPRA	TECHNITAL
funzione della porosità totale	Non determinato	Strato in parziale saturazione 4.483.877 mc *(calcolo operato erroneamente utilizzando la porosità totale)* Range 270.876÷2.600.412 mc *(calcolati considerando porosità efficace min e max, pari rispettivamente a 1,5% e 14,4%)*
Volume di percolato presente in discarica calcolato in funzione della porosità efficace	Range 277.502÷925.007 mc *(valori calcolati considerando porosità efficace min e max, pari rispettivamente a 1,5% e 5%)*	Nel documento RELAZIONE SULL'ANALISI PRELIMINARE DEI CEDIMENTI E DEI VOLUMI DI PERCOLATO la stima è stata affinata da Technital con una *"stima verosimile di 1.334.065 mc calcolata considerando la variabilità della porosità efficace in funzione della tensione di confinamento"*
Volume di percolato estraibile considerando battente idraulico tecnicamente raggiungibile	Range 239.888÷799.627 mc *(valori calcolati considerando un battente idraulico ridotto di 2 m e porosità efficace min e max, pari rispettivamente a 1,5% e 5%)*	Non determinato

Tabella 4.3: Confronto tra le valutazioni del Collegio peritale ISPRA e di Technital

4.1 DETERMINAZIONI CONCLUSIVE

Considerando i due studi, risultano maggiormente rappresentative della situazione della discarica di Malagrotta le stime seguenti:

- Determinazione del Collegio peritale dei tecnici ISPRA: volume di percolato presente compreso tra **277.502** mc e **925.007** mc;
- Determinazione della società Technital: volume di percolato minimo presente pari a **270.876** mc, con stima verosimile di un volume pari a **1.334.065** mc.

Pertanto le condizioni di minimo e di massimo del volume di percolato variano tra 270.502÷270.876 mc per il livello minimo e 925.007÷1.334.065 mc per il livello massimo.

La semplice media aritmetica dei dati presentati nei due studi, conduce un volume di percolato estraibile in discarica pari a **700.113** mc.

Va evidenziato come il quantitativo di 11.707.343 mc, indicato dalla Technital quale percolato, sia, come descritto compiutamente alla pag.20, il risultato di una stima del tutto errata, di fatto superata dalla medesima Technital, che può essere grave fonte di travisamento.

Per stime più accurate, si condivide il suggerimento, espresso nei due studi, di eseguire ulteriori prove di campo al fine della determinazione dei parametri sito-specifici utili per una più precisa determinazione dei volumi di percolato presenti ed estraibili.

A parere degli scriventi, è importante anche approfondire l'influenza del biogas sui livelli del percolato nei pozzi di monitoraggio ed estrazione, in quanto le pressioni sottese al battente nei pozzi potrebbero portare a sovrastime delle misure. A tale riguardo preme sottolineare come, per quanto di nostra conoscenza, Malagrotta sia dotata di turbine e gruppi elettrogeni in grado di trasformare il biogas, estratto da una fitta rete di pozzi di captazione, in energia.

8 Settembre 2023

MARCA DA BOLLO €16,00 Ministero dell'Economia e delle Finanze Agenzia Entrate
0 1 23 006234 500 9

TRIBUNALE ORDINARIO DI MILANO

Verbale di giuramento perizia stragiudiziale

Modulo per periti non iscritti all'Albo

L'anno 2023 e questo giorno 11 del mese di OTTOBRE, nella Cancelleria dell'intestato Ufficio, avanti al sottoscritto Cancelliere è personalmente comparso il Signor Pietro Simone nato a Padova il 18/03/1965, residente in Milano prov. (MI) in via Tortona n° 13, identificato con documento C.I. CA41402AN n° rilasciato da COMUNE MILANO il ___/___/___ il/la quale esibisce la relazione che precede da lui/lei effettuata in data 04/12/2017 e chiede di poterla asseverare con giuramento.

Ammonito ai sensi di legge[1] il comparente presta il giuramento ripetendo le parole "Giuro di aver bene e fedelmente proceduto alle operazioni e di non aver altro scopo di quello di far conoscere la verità".

Si raccoglie il presente giuramento di perizia stragiudiziale per gli usi consentiti dalla legge.

Letto, confermato e sottoscritto.

TRIB.MI CRP 11/10/23 N. 04185

IL CANCELLIERE ESPERTO
Giuseppe RUSSO

Il dichiarante

NOTA BENE:

L'ufficio non assume alcuna responsabilità per quanto riguarda il contenuto della perizia asseverata con il giuramento di cui sopra.

[1] Art. 483 c.p.: "Falsità ideologica commessa dal privato in atto pubblico" ed art. 193 c.p.c.

ESTRATTO

UNIVERSITY OF ROME LA SAPIENZA
RESEARCH CENTER CERI
ON
PREDICTION, PREVENTION AND MITIGATION
OF GEOLOGICAL RISKS

JOURNAL OF

SEISMIC RISK
HYDROGEOLOGICAL RISK
SEA WAVE RISK ANALYSIS
GROUNDWATER RESEARCH
WATER RESOURCE MANAGEMENT
SOIL AND WATER POLLUTION
SITE REMEDIATION
ECONOMIC GEOLOGY
APPLIED GEOPHYSICS
LAND USE MANAGEMENT
ROCK AND SOIL CHARACTERIZATION

Italian Journal of Engineering Geology and Environment

SAPIENZA UNIVERSITÀ EDITRICE
2021
2

Scientific Editor-in-Chief

Gabriele SCARASCIA MUGNOZZA
Sapienza Università di Roma
Research Center CERI "Prediction, Prevention and Mitigation of Geological Risks"
Rome – Italy
gabriele.scarasciamugnozza@uniroma1.it

Editorial Managers

Tania RUSPANDINI
Stefano RIVELLINO
Sapienza Università di Roma
Research Center CERI "Prediction, Prevention and Mitigation of Geological Risks" - Rome, Italy
tania.ruspandini@uniroma1.it
stefano.rivellino@uniroma1.it

Associate Editors

Alberto PRESTININZI - Coordinator
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Giorgio BELLOTTI
Università degli Studi di Roma Tre - Rome, Italy

Francesca BOZZANO
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Domenico CALCATERRA - President AIGA
Università degli Studi di Napoli Federico II - Naples, Italy

Michele CERCATO
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

José DELGADO MARCHAL
Universidad de Alicante - Alicante, Spain

Marta DELLA SETA
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Carlo ESPOSITO
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Francesco FEDERICO
Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Rome, Italy

Aldo FIORI
Università degli Studi di Roma Tre - Rome, Italy

Giandomenico FOTI
Mediterranea University of Reggio Calabria - Reggio Calabria, Italy

Mario GAETA
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Roberta GIULIANI
Dipartimento della Protezione Civile - Rome, Italy

Luca LENTI
IFSTTAR - Champs sur Marne, France

Salvatore MARTINO
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Paolo MAZZANTI
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Marco PETITTA
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Marco PETRANGELI PAPINI
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Alessandra SAPONIERI
University of Salento - Lecce, Italy

Luca SCHILIRO'
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Rome, Italy

Advisory Board

Aronne ARMANINI
Università degli Studi di Trento - Trento, Italy

Mario BECCARI
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Céline BOURDEAUX
IFSTTAR - Champs sur Marne, France

Franco BRAGA
Sapienza Università di Roma - Rome, Italy

Luigi CARMIGNANI
Università degli Studi di Siena - Siena, Italy

Andrew COOPER
University of Ulster - Londonderry, United Kingdom

Andreas DAHMKE
Christian-Albrechts-Universität - Kiel, Germany

Sebastiano D'AMICO
University of Malta - Msida, Malta

Nicola CASAGLI
Università degli Studi di Firenze - Firenze, Italy

Stephen G. EVANS
University of Waterloo - Waterloo, Canada

Vincenzo FRANCANI
Politecnico di Milano - Milan, Italy

Rinaldo GENEVOIS
Università degli Studi di Padova - Padua, Italy

Francesco M. GUADAGNO
Università degli Studi del Sannio - Benevento, Italy

Piotr MIGON
University of Wroclaw - Wroclaw, Poland

Wolfgang SCHWANGHART
Universität Potsdam - Potsdam, Germany

Alexander STROM
Russian Academy of Sciences - Moscow, Russia

DOI: 10.4408/IJEGE.2021-02.O-05

THE CEMENT-BENTONITE DIAPHRAGM OF THE MALAGROTTA MUNICIPAL WASTE LANDFILL (ROME, ITALY): EFFICIENCY ANALYSIS

Franco BRAGA(*) & Alberto PRESTININZI(**)

(*)Former Professor of construction technique and construction in seismic areas - Sapienza University of Rome - Rome (Italy)
(**)Former Professor of geological risks - Sapienza University of Rome, Honorary president of the Nhazca start-up - Sapienza University of Rome, Professor of risk analysis - eCampus University, School of engineering - Via Isimbardi, 10 - 22060 Novedrate (Como, Italy)
Corresponding author: alberto.prestininzi@uniroma1.it

DOI: 10.4408/IJEGE.2021-02.O-05

THE CEMENT-BENTONITE DIAPHRAGM OF THE MALAGROTTA MUNICIPAL WASTE LANDFILL (ROME, ITALY): EFFICIENCY ANALYSIS

Franco BRAGA(*) & Alberto PRESTININZI(**)

(*)Former Professor of construction technique and construction in seismic areas - Sapienza University of Rome - Rome (Italy)
(**)Former Professor of geological risks - Sapienza University of Rome, Honorary president of the Nhazca start-up - Sapienza University of Rome, Professor of risk analysis - eCampus University, School of engineering - Via Isimbardi, 10 - 22060 Novedrate (Como, Italy)
Corresponding author: alberto.prestininizi@uniroma1.it

EXTENDED ABSTRACT

La discarica di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) della Città di Roma, una delle più estese d'Europa, nasce nell'area di Malagrotta dove erano presenti, tra gli anni '50 e i primi del 1960, importanti attività di estrazione di sabbia e ghiaia utilizzate come inerti nelle costruzioni, destinate alla rapida espansione urbana della Città di Roma del dopoguerra, ma anche alla realizzazione di importanti infrastrutture come le piste dell'Aeroporto Leonardo da Vinci di Fiumicino (Roma). La complessa stratigrafia dell'area, schematizzata, dall'alto verso il basso, è caratterizzata dalla presenza di depositi vulcanici, sabbie e ghiaie. Questi depositi si trovano al di sopra della importante formazione geologica delle argille grigio-azzurre di età Plio-pleistocenica, ad elevata consistenza e bassa permeabilità (Carboni, 1980). Lo spessore delle argille grigio-azzurre è molto importante e presenta, nell'area di indagine, valori non inferiori ai 100 metri. Il contatto con le soprastanti sabbie e ghiaie è molto irregolare e si sviluppa su una superficie trasgressiva. Lo spessore delle ghiaie, pertanto, varia da pochi metri fino a decine di metri (Galeotti *et alii*, 1990; Carboni, 1980). E' in questo ambiente geologico che lo smaltimento dei Rifiuti Solidi Urbani ha trovato le condizioni ideali, grazie alla presenza di molte cavità, ereditate dall'asporto di grandi quantità di materiali inerti per un volume stimato, nel 1987, in oltre 200×10^6 m^3.

A seguito del Decreto del Presidente della Repubblica (DPR) 915/82 del 10 settembre 1982, emanato in accoglimento di tre Direttive europee, fra le quali la Direttiva 75/442/CEE del Consiglio, del 15 luglio 1975, relativa ai rifiuti, la discarica è stata sottoposta a interventi di bonifica e di messa in sicurezza. L'intervento più importane di adeguamento alle nuove normative, dal punto di vista sia economico sia tecnico-scientifico, è rappresentato dall'isolamento idraulico dell'area destinata a discarica, costituito da un diaframma cemento-bentonite fondato a profondità variabile (Fig. 1, 2, 3) e ammorsato per oltre due metri nelle argille grigio-azzurre sovraconsolidate di base. Le miscele di cemento-bentonite, utilizzate per costruire diaframmi plastici, costituiscono materiali speciali che hanno il fondamentale obiettivo della protezione di particolari siti, dovendo fornire prestazioni caratterizzate da bassa conducibilità idraulica e, allo stesso tempo, da elevati valori di resistenza e buon comportamento elastico. Il comportamento, soprattutto idraulico di queste miscele, è stato ampiamente studiato in laboratorio e in sito (Vespo *et alii*, 2021). Escludendo i diaframmi che hanno la parte sommitale emergente al di sopra del piano campagna, con conseguente esposizione di una porzione dell'opera agli agenti atmosferici (Jefferis, 1981; Opukumo *et alii*, 2021; Grisolia *et alii*, 2000), meno frequenti sono gli studi e le ricerche orientate a verificare lo stato di conservazione e di efficienza idro-meccanica nel tempo dei diaframmi plastici che si trovano interamente posizionati al di sotto del piano campagna. Nella presente nota, è stato esaminato il caso del diaframma plastico realizzato nell'area di Malagrotta (Roma, Italia), tra settembre 1988 e novembre 1989, con l'obiettivo di confinare i Rifiuti Solidi Urbani provenienti, per lo più, dalla città di Roma (Italia). Verificare il suo livello di efficienza è ora opportuno, specie a causa delle indagini giudiziarie che ipotizzano una perdita di efficienza di questa importante opera, in termini di conducibilità idraulica e comportamento elastico.

Per fare chiarezza al riguardo sono stati utilizzati i dati disponibili, ricavati da una serie di test idraulici effettuati nel sito di Malagrotta in prossimità del perimetro del diaframma plastico. E' stato possibile valutare le condizioni di flusso idraulico e gli spostamenti elastici teorici del diaframma (freccia e area della deformata) corrispondenti alle variazioni di carico. I risultati ottenuti sono stati analizzati attraverso l'equazione della linea elastica, utilizzando anche i dati contenuti nel progetto del diaframma plastico (Calenda & Esu, 1988). Dal confronto tra questi dati sperimentali e i risultati ottenuti dalle valutazioni analitiche, elaborati anche attraverso confronti statistici, sono emersi dati complessivamente tranquillizzanti che segnalano un eccellente stato di conservazione dell'opera e della sua efficienza, ad oltre 34 anni dalla sua realizzazione.

ABSTRACT

The MSW landfill of the city of Rome, one of the largest in Europe, was created in the area of Malagrotta. Between the 1950s and the early 1960s, this area hosted important sand and gravel quarries, which supplied aggregates for construction projects, such as those necessary for the rapid urban expansion of Rome after the second world war.

The area has a complex stratigraphy, schematically consisting (from top to bottom) of volcanic deposits, sands, gravels, and very compact gray-blue clays.

This geological setting, with cavities from the previous quarrying of large volumes of aggregates (estimated at over 200 × 106 m^3 in 1987), offered an ideal site for MSW disposal.

Remediation and safe confinement projects were undertaken at the landfill site after the issuing of Decree of the President of the Republic 915/82 of 10 September 1982, transposing three European Directives, including Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste, into the Italian legislation. From a financial and technical-scientific viewpoint, the most important project to make the landfill compliant with the new legislation was the construction of a hydraulic sealing wall around the internal subareas of the landfill that would accommodate MSW. The wall consisted in a plastic diaphragm of variable depth (Fig. 1).

This is one of the major barrier walls built in the world for the confinement of MSW landfills (Table 1).

As part of the activities undertaken at the Malagrotta landfill site, we investigated the functional efficiency of the diaphragm. Several in situ tests were thus planned and implemented. This paper analyses the results of hydraulic stress tests carried out in appropriate sections, provided with piezometers and other measuring instruments making part of the system for monitoring the entire surface area of the landfill (161 ha).

Figure 3 is a sketch of the section used for hydraulic tests, representing the entire confinement system (Fig. 2).

The entire set of data confirms the efficiency of the confinement system examined.

The results obtained, by imposing Darcy's solution based on a reductio ad absurdum argument, demonstrates that the cement-bentonite diaphragm is totally "impermeable" and thus fully suitable for performing the function for which it was designed and built (Prestininzi & Romagnoli, 1991). The data shown in Table 2 corroborates this assumption, i.e. the hydraulic heads in V_7 and in Z_7 are linked by a linear proportionality ratio, connected with a transfer of energy (pressure).

The findings from our hydrogeological analysis and the application of Darcy's law were validated by a mechanical analysis of the elastic behaviour of the diaphragm, made up of a cement-bentonite mixture. The results of the application of the equations of the elastic line revealed that the undrained behaviour of the soil-diaphragm system was in line with our analyses based on experimental data from hydraulic tests and statistical tests.

By using Equations (3) and (4), we computed the values u_{max} and Au_{max} for all the time steps ti. Statistical processing of the data enabled us to compare all the available results: piezometric heads in V_7, piezometric heads induced in Z_7, arrow umax (x = 0), and surface area Au_{max} acting on the diaphragm. In particular, the comparison highlighted their mutual relationships under the various conditions of stress q, thereby validating the linear proportionality of the diaphragm displacement and the origin of the piezometric changes ΔHZ_7. Indeed, the data of Tables 2 and 3 shows the linear proportionality of ratios (V_7/Z_7) and of changes in hydraulic head with the data connected with the diaphragm displacement, $\Delta H(Z_7)/[(Au)/(u_{max}\ (x = 0)]$.

The analysis of these results confirmed what we had observed during hydraulic investigations: the behaviour of the system, subjected to hydraulic stress tests, proved to be typical of undrained systems, which respond to stress changes with exchanges of energy and induced deformations at constant volume (Figs. 3, 5, 6 a) and b)).

After more than 34 years since its construction, the cement-bentonite plastic diaphragm retains an excellent hydromechanical efficiency, allowing it to perform its hydraulic sealing and mechanical elastic behaviour function in the future.

Keywords*: Municipal solid waste, cement-bentonite diaphragm, elastic behaviour, plastic diaphragm*

INTRODUCTION

Cement-bentonite mixtures are special materials that are employed to build plastic diaphragms. Their chief purpose is to protect specific sites, thanks to their low hydraulic conductivity and high strength values and good elastic behaviour. Extensive laboratory and field studies have been focused on the hydraulic behaviour of these mixtures. However, apart from diaphragms with their top protruding above ground level and thus exposed to weather agents (Jefferis, 1981; Opukumo *et alii*, 2021; Vespo *et alii*, 2021; Grisolia *et alii*, 2000), diaphragms lying entirely below ground have been less frequently investigated in terms of assessment of their long-term hydraulic and mechanical efficiency.

This paper deals with a plastic diaphragm that was built in the area of Malagrotta (Rome, Italy) between September 1986 and November 1987, with a view to confining Municipal Solid Waste (MSW), mostly originating from the city of

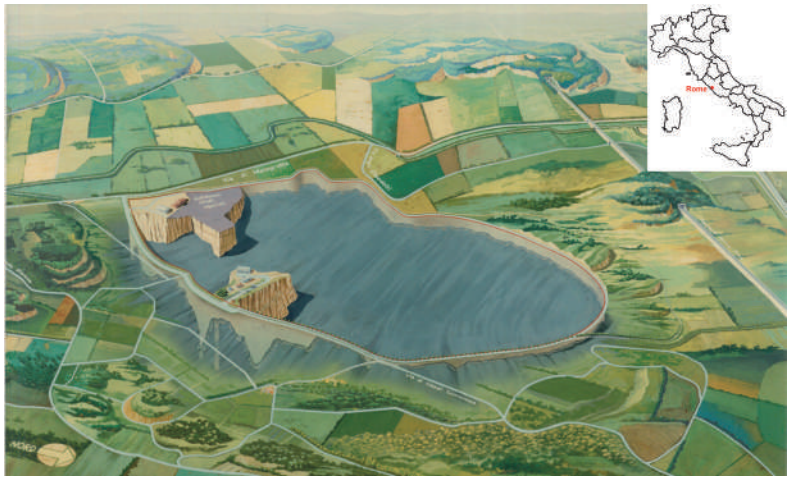


Fig. 1 - Malagrotta landfill. Perspective view of the plastic diaphragm. Eastern part of the area: trend of the top of the basal clays and configuration of the plastic diaphragm (modified from: Roma Capitale, 2017)

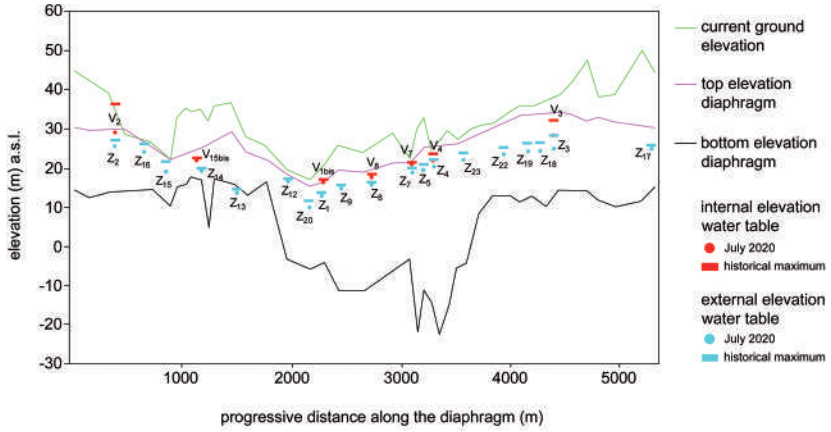


Fig. 2 - Contact between the diaphragm and the basal clays. The figure also shows the internal (V) and external (Z) monitoring piezometers, the topographic surface, and the top of the diaphragm. Elevations above sea level (a.s.l.) plotted against distances measured along the perimeter of the diaphragm

Excavation (m^3)	Length (m)	Circumscribed surface (m^2)	Depth (m)	Depth $V_7 - Z_7$ L (m)	Average thickness (m)	Surface diaphragm (m^2)	Hydraulic cement (quintals)	Bentonite (quintals)
2.3×10^6	5423	161×10^4	from −8 to −48	24.5	1	110782	177203	68120

Tab. 1 - Geometric and structural features of the diaphragm. Construction time: 2 years.(From, Calenda & Esu, 1988)

Rome. Assessing the level of efficiency of this important structure has become imperative, considering the current judicial investigations over its alleged loss of efficiency in terms of hydraulic conductivity and elastic behaviour. To gain an improved understanding of the issue, use was made of data available from a set of previous hydraulic tests carried out at the Malagrotta site, along the perimeter of the plastic diaphragm. Hydraulic flow conditions and theoretical elastic displacements of the diaphragm were thus assessed (arrow and surface area of the deformed shape). Results were analysed via both the equation of the elastic line and the design data of the plastic diaphragm (Calenda & Esu, 1988). A comparison between this experimental data and the findings from our theoretical assessments, processed with statistical methods, yielded an overall reassuring picture, i.e. the excellent hydromechanical efficiency of the structure after more than 34 years since its construction.

THE MALAGROTTA LANDFILL

The MSW landfill of the city of Rome, one of the largest in Europe, was created in the area of Malagrotta. Between the 1950s and the early 1960s, this area hosted important sand and

gravel quarries, which supplied aggregates for construction projects, such as those necessary for the rapid urban expansion of Rome after the second world war, and for major infrastructure, e.g. the runways of Leonardo da Vinci airport at Fiumicino (Rome). The area has a complex stratigraphy, schematically consisting (from top to bottom) of volcanic deposits, sands, gravels, and very compact gray-blue clays. These clays of Plio-Pleistocene age belong to a significant geological formation and, in the local stratigraphic succession, they were assumed to be the basic lithology. Their thickness is considerable and, in the area investigated, it exceeds 100 m. Their contact with the overlying sands and gravels occurs at depths ranging from a few to tens of metres from ground level (Galeotti *et alii*, 1990; Carboni, 1980). This geological setting, with cavities from the previous quarrying of large volumes of aggregates (estimated at over 200 × 10^6 m^3 in 1987), offered an ideal site for MSW disposal.

Remediation and safe confinement projects were undertaken at the landfill site after the issuing of Decree of the President of the Republic 915/82 of 10 September 1982, transposing three European Directives, including Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste, into the Italian legislation. From a financial and technical-scientific viewpoint, the most important project to make the landfill compliant with the new legislation was the construction of a hydraulic sealing wall around the internal subareas of the landfill that would accommodate MSW. The wall consisted in a plastic diaphragm of variable depth (Fig. 1). The diaphragm thus intersected the underlying gray-blue clays at different depths (Fig. 2). For construction of the diaphragm, use was made of a hydraulic cement-bentonite mixture. This is one of the major barrier walls built in the world for the confinement of MSW landfills (Table 1).

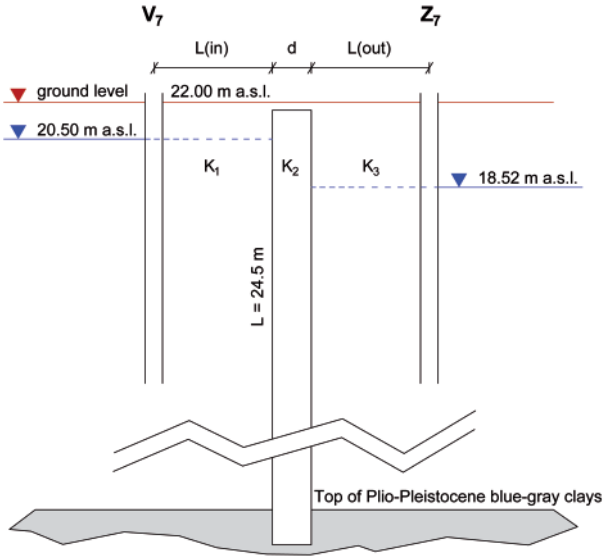


Fig. 3 - Not to scale. Location of piezometers V_7, Z_7, and of the cement-bentonite diaphragm under the initial conditions t_0 (no pumping). The figure shows the distance L = 8 m between the piezometers; the portions of soil L(in) and L(out) included between the piezometers and the diaphragm; the permeability coefficients k_1 and k_3 of the portions of soil L(in) and L(out), with average values of 10^{-5} m/s; the cement-bentonite diaphragm (average thickness d = 1 m); the design permeability coefficient K_2, with values not exceeding 10^{-9} m/s; and the diaphragm depth L = 24.5 m. The bottom line simulates the occurrence of the compact and "impermeable" gray-blue clays of Plio-Pleistocene age, into which the deep part of the diaphragm is stuck for about 2 m

HYDRAULIC CONDITIONS

As part of the activities undertaken at the Malagrotta landfill site, we investigated the functional efficiency of the diaphragm. Several in situ tests were thus planned and implemented. This paper analyses the results of hydraulic stress tests carried out in appropriate sections, provided with piezometers and other measuring instruments making part of the system for monitoring the entire surface area of the landfill (161 ha). As pointed out about, this area is confined by a cement-bentonite plastic diaphragm. The resulting data was integrated with data acquired from:

- studies for the construction of the plastic diaphragm (Calenda & Esu, 1988);
- specific scientific literature (Galeotti *et alii*, 1990; Grisolia *et alii*, 2000);
- the Malagrotta area characterisation plan (*Piano di Caratterizzazione della Discarica di Malagrotta,* Roma Capitale, 2017);
- from an archival data record built over time through surveys and analyses, but also through daily data collected from monitoring points present along the entire perimeter of the diaphragm.

The entire set of data confirms the efficiency of the confinement system examined.

Figure 3 is a sketch of the section used for hydraulic tests, representing the entire confinement system (Fig. 2). Along this section, tests were carried out with the specific goal of defining the hydraulic and mechanical efficiency of the cement-bentonite hydraulic sealing. Piezometer V_7, inside the landfill area, was separated from piezometer Z_7 by the interposed diaphragm. Thus, Z_7 was located outside the landfill area. Measurements of hydraulic heads in V_7 and effects in Z_7, expressed in metres above sea level (m a.s.l.), were carried out during the entire testing period from t_0 to t_{12} (Fig. 5). The different time steps were directly associated with pumping activities, alternating with no-pumping intervals. Changes in the internal piezometric head were expressed by the values of hydraulic head recorded in V_7. The monitoring piezometer Z_7

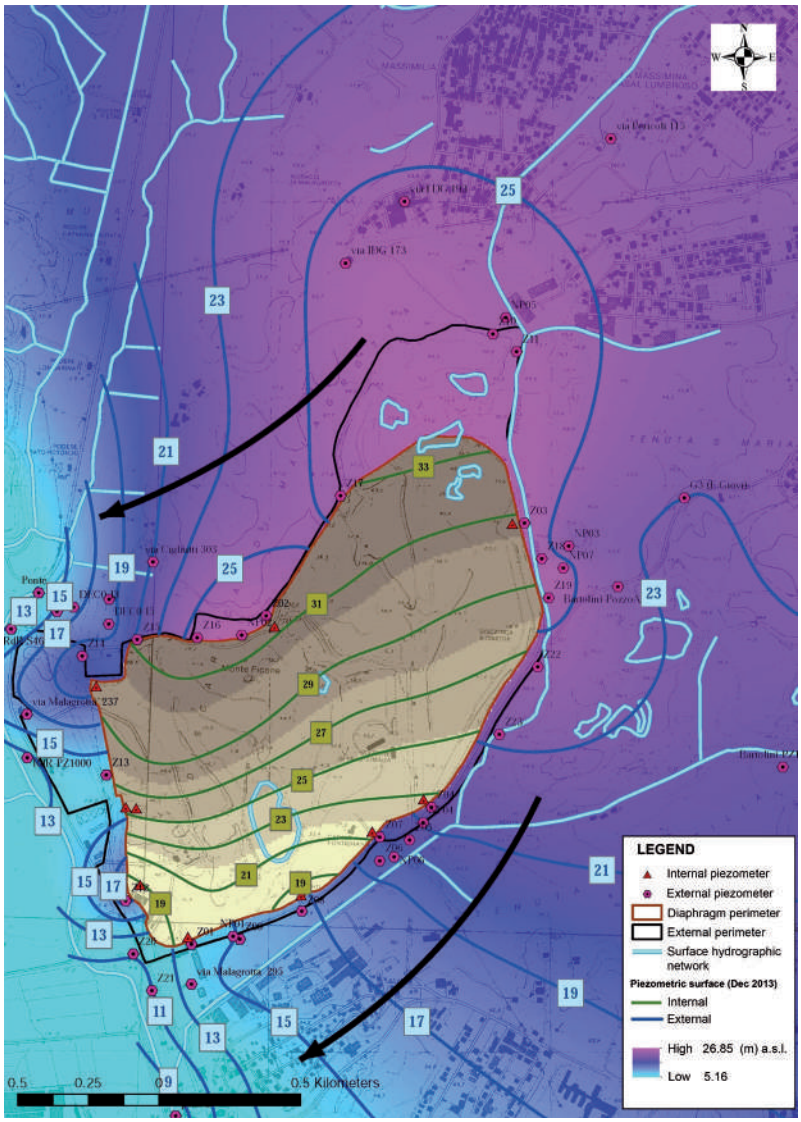


Fig. 4 - Hydraulic conditions in the Malagrotta area. Location of the plastic diaphragm and trend of isopiestic lines "internal" and "external" to the diaphragm. Location of internal and external monitoring piezometers (modified from Piano di Caratterizzazione, Roma Capitale (2017)

was placed outside the diaphragm. For all the time steps t_0-t_{12}, the external hydraulic heads recorded in Z_7 were constantly lower than the internal ones recorded in V_7. This experimental finding was in line with the data recorded over time by internal (V_i) and external (Z_i) piezometers along the entire perimeter of the diaphragm (Fig. 2).

INVESTIGATION APPROACH

As the motion of fluids through porous media between two generic points in a soil is governed only by the difference in their hydraulic head, studies quantifying the water flow in a soil make reference to Darcy's law. Using this law, we can identify the fundamental links that exist between the characteristics of motion and, in particular, flow velocity on the one hand, and the properties of a soil and the head loss between the points considered on the other hand. The study of a unidimensional laminar flow of water in a soil makes it possible to measure the discharge per unit area, which is directly proportional to the head loss between two points and inversely proportional to the length of the flow path. In practice (see Fig. 3), the discharge Q per unit area can be defined by the apparent or nominal seepage velocity.

Assessing the overall behaviour of the local hydrogeological system was a central element of the hydraulic tests carried out on section V_7-Z_7. The boundary conditions of this system (Fig. 3) were as follows:

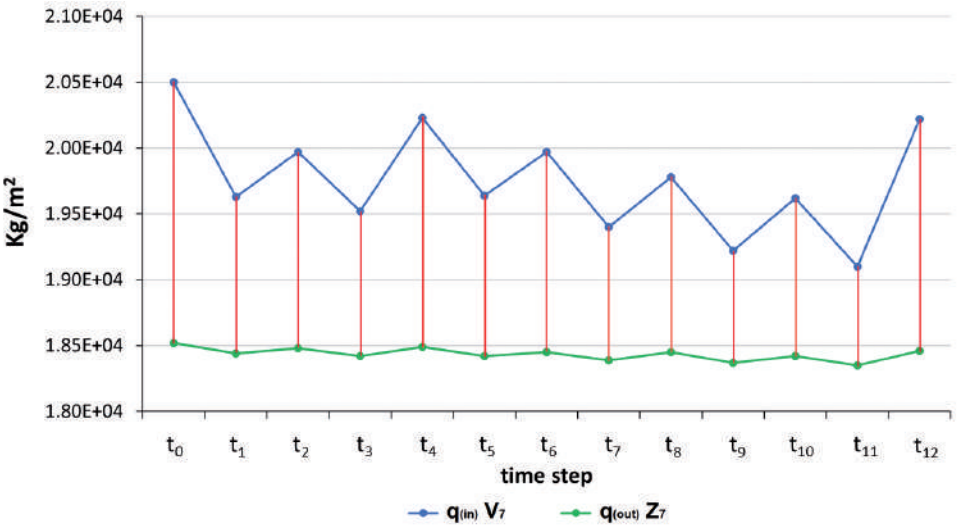


Fig. 5 - Hydraulic tests: trend of the piezometric head in V_7 and effects recorded in Z_7. t_0 = 15 July 2020. The graph shows 12 time steps (t_1-t_{12}) starting from t_0, the hydraulic heads (m a.s.l.) automatically recorded by piezometer V_7, and the effects induced in piezometer Z_7, located outside the cement-bentonite diaphragm. Note that the external piezometric head in Z_7 is constantly below the head measured in V_7 (modified from "Relazione finale incidente probatorio")

1. the cement-bentonite diaphragm with a thickness of 1 m and a length L = 24.5 m;
2. its internal lateral boundaries, consisting of the soil deposits occurring between V_7 and the diaphragm, $L(in)$;
3. its external lateral boundaries, consisting of the soil deposits occurring between the diaphragm and Z_7, $L_{(out)}$;
4. its upper and lower boundaries, consisting of the topographic surface and the top of the "basal" clays, respectively; the latter clays are known for their physico-mechanical properties that qualify the related clayey formation as "impermeable"; they have thicknesses of hundreds of metres and a grain size composition consisting of over 40% by weight of silty clays, with a very high clayey fraction < 2 μ (Galeotti *et alii*, 1990).

Hydraulic surveys were carried out with reference to the graphs of Figs. 3, 4, and 5.

HYDROGEOLOGICAL ANALYSIS

Figure 5 depicts the findings from the tests carried out on the section shown in Fig. 3. The graph in the figure allowed us to make useful assessments of the behaviour of the above-mentioned hydrogeological system, in particular to test the assumption that the cement-bentonite diaphragm might be penetrated by fluids, driven by the gravity-controlled hydraulic head.

Withdrawal tests were carried out from wells placed inside the cement-bentonite diaphragm. During the tests, because of the transmissivity of the local soils, we could change the hydraulic head near the measuring section. These changes were recorded through piezometer V_7. Simultaneous reading of piezometer Z_7 (Fig. 5) demonstrated unequivocally that the interposed diaphragm inhibited groundwater flow from the inside to the outside and vice versa. Indeed, we should not be misled by the minimum changes in piezometric heads recorded externally, in piezometer Z_7, in response to changes recorded in V_7. In this regard, we should point out that the two heads (internal and external) were always different and that the internal piezometric head was always higher than the external one. As a result of withdrawal cycles, internal groundwater level decreases/increases of the order of 1 m were accompanied by groundwater level decreases/increases of the order of 1 cm outside the diaphragm. However, these minimum changes were merely indicative of changes in pressure and not in hydraulic flow. Indeed, even by using a *reductio ad absurdum*, it would be impossible to assume water flow through the diaphragm, because the internal water level would always remain significantly higher than the external one. Moreover, as groundwater flow is controlled by gravity (hydraulic gradient), groundwater cannot flow from lower to higher levels. In the opposite instance, i.e. by assuming a flow from the inside to the outside, the external levels would receive water and thus show a tendency to increase and not to decrease, albeit to a very small extent: without an increase in the external piezometric level, there would be no flow.

These conditions have a rational scientific explanation if we consider the behaviour of closed systems. Basically, closed systems can exchange energy (in this instance, pressure) but not matter (in this instance, water). As displayed in the experimental graph of Fig.

5, the head changes observed in V_7 and Z_7 have an instantaneous temporal response ($\Delta t_i = 0$) at each time step. This is typical of closed systems, which do not exchange matter. In geological engineering, this behaviour is known as undrained behaviour, in which pressure changes induce changes in a soil mass or in a structure, at constant volume.

Time steps	Hydraulic head V_7 (m a.s.l.)	Hydraulic head Z_7 (m a.s.l.)	V_7/Z_7	Standard deviation
t_0	20.50	18.52	1.11	0.02
t_1	19.63	18.44	1.15	0.02
t_2	19.97	18.48	1.11	0.02
t_3	19.52	18.42	1.10	0.02
t_4	20.23	18.49	1.14	0.02
t_5	19.64	18.42	1.16	0.02
t_6	19.97	18.45	1.12	0.02
t_7	19,40	18,39	1.10	0.02
t_8	19.78	18.45	1.12	0.02
t_9	19.22	18.37	1.10	0.02
t_{10}	19.62	18.42	1.15	0.02
t_{11}	19.10	18.35	1.10	0.02
t_{12}	20.22	18.46	1.15	0.02

Tab. 2 - Proportionality ratio between the hydraulic heads in V_7 and Z_7, occurring on the walls of the "internal and external" cement-bentonite diaphragm at each time step. The statistical processing of the data shows linear proportionality, absence of water exchanges, and undrained behaviour of the system investigated

ANALYSIS WITH THE APPLICATION OF DARCY'S LAW

Our "hydrogeological" analysis was substantiated by Darcy's law, which applies to all two-phase systems (consisting of a solid phase and of a liquid phase, regarded as not compressible).

Considering the geometric conditions measured along the section V_7 - diaphragm - Z_7, we applied Darcy's law with:

- L = 8 (m): distance between V_7 and Z_7;
- D = average thickness of the diaphragm, equal to 1 (m);
- ΔH = initial piezometric head at t_0, equal to (20.50-18.52) = 1.98 m (14 July 2020);
- $i_t = \Delta H/d$ hydraulic gradient, calculated for each time step t_i, with i ranging from t_0 to t_{12}; note that the piezometric head in V_7 at each time step t was always higher than the piezometric head in Z_7 (Fig. 5);
- $K_1 \approx K_3$ = Darcy's permeability coefficients of soils occurring between V_7 and the diaphragm, and between Z_7 and the diaphragm, assumed to be equal to 10^{-4}-10^{-5} (m/s);
- K_2 = Darcy's permeability coefficient of the diaphragm, with design values not higher than 10^{-9} (m/s).

Both stratigraphic data and previous surveys, especially those needed for the Malagrotta site characterisation plan, indicated that $K_1 \approx K_3 >>> K_2$. Therefore, we assumed that $k_2/(k_1 = k_3) \approx 0$. Under these conditions, Darcy's flow along section L (8 m) would lose all of its head along the section of the diaphragm having the

permeability coefficient K_2, i.e. along the path $d = 1$ m. Thus, the hydraulic gradient would be equal to $i = \Delta H/d$ and the flow velocity would be $V = k_2 \cdot i$.

Considering a surface A, crossed by a water flow along the path between V_7 and Z_7 (1 m^2), the amount of fluid crossing section A at each time step shown in Fig. 5, i.e. at t_0, t_1……t_{12}, would be $Q = A \cdot k_2 \cdot it = A \cdot V$. We also resorted to a *reductio ad absurdum*, i.e. imposing a velocity consistent with physical conditions in the section considered, i.e. distance $d = 1$ m and fluid travel time consistent with the data recorded in the reference piezometers of Fig. 5: at each time step t_i, the time of departure of the flow from V_7 and its time of arrival at Z_7 would coincide, so that the difference between the time of departure and the time of arrival would be equal to $\Delta t = (t_{i(in)} - t_{i(out)}) = 0$.

Hence, the apparent flow velocity would be $V = L/\Delta t = 8/(0) = \infty$. If velocity takes on an infinite value, then for the relationship $V = k_2 \cdot i$ to be true, it should be expressed as $V = k_2 \cdot i = \infty = k_2 \cdot \Delta H/d$. Recalling that the hydraulic gradient $i = H/d$ takes on the value $0 < i < \infty$, to validate Darcy's equation, k_2 should be equal to ∞:

$$V = \frac{L}{\Delta t} = \frac{8}{0} = k_2 \cdot i = \infty \cdot \Delta H/d \text{ (non-real result)}$$

This *non-real result*, obtained by imposing Darcy's solution based on a *reductio ad absurdum* argument, demonstrates that the cement-bentonite diaphragm is totally "impermeable" and thus fully suitable for performing the function for which it was designed and built (Prestininzi & Romagnoli, 1991). The data shown in Table 2 corroborates this assumption, i.e. the hydraulic heads in V_7 and in Z_7 are linked by a linear proportionality ratio, connected with a transfer of energy (pressure), as shown in Tab 2.

ANALYSIS OF THE DEFORMED SHAPE OF THE DIAPHRAGM

The findings from our hydrogeological analysis and the application of Darcy's law were validated by a mechanical analysis of the elastic behaviour of the diaphragm, made up of a cement-bentonite mixture. The results of the application of the equations of the elastic line revealed that the undrained behaviour of the soil-diaphragm system was in line with our analyses based on experimental data from hydraulic tests and statistical tests.

Time steps	ΔH (Z_7) (± m)	U_x (x=0) Arrow ± (m)	ΔAu (± m²)	ΔH (Z_7)/ ($\Delta Au/u_x$ (x = 0))	Standard deviation
t_0	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
t_1	−0.08	−0.036	−0.36	−0.01	0.007
t_2	0.04	0.014	0.14	0.00	
t_3	−0.06	−0.019	−0.18	−0.01	
t_4	0.07	0.029	0.29	0.01	
t_5	−0.07	−0.024	−0.24	−0.01	
t_6	0.03	0.014	0.14	0.00	
t_7	−0.06	−0.023	−0.23	−0.01	
t_8	0.06	0.016	0.16	0.01	
t_9	−0.08	−0.023	−0.23	−0.01	
t_{10}	0.05	0.016	0.16	0.01	
t_{11}	−0.07	−0.021	−0.21	−0.01	
t_{12}	0.11	0.046	0.46	0.01	

Tab. 3 - Statistical linearity of the proportionality ratio $\Delta HZ_7/(C/ux$ (x= 0), obtained through the link between the change in hydraulic head (ΔHZ_7) and the displacements of the diaphragm (arrow ux (x = 0) and (ΔAu), induced by the internal hydraulic head (V_7).

Using Figs. 3, 6a, and 6b, we developed the equation of the elastic line to investigate the parameters governing the displacements of the system considered, which were controlled by the presence of the diaphragm.

Based on the data already used for hydraulic investigations, derived from the measurement of piezometric heads in V_7, and expressing all the values in kg and m, we had:

- q = head (kg/m²), evenly distributed and acting on the cement-bentonite diaphragm wall;
- L = free length of the diaphragm (m), equal to 24.5 m, near section V_7-Z_7;
- E = Young's modulus of the cement-bentonite diaphragm, taken to be equal to 1.4 × 10^{10} kg/m² (Jefferis, 1981; Opukumo *et alii*, 2021; Paggi *et alii*, 2013);
- J = moment of inertia, equal to 0.083 m⁴, for a 1 m wide diaphragm.

Through the equation of the elastic line, we defined the displacement $u(x)$ (m) of the diaphragm between its top position (x = 0) and its bottom position (x = 24.5), and the corresponding surface area Au between deformed and undeformed shape.

$$u_x = \frac{q\,x^4}{24EJ} - \frac{q\,L^3\,x}{6\,E\,J} + \frac{qL^4}{8EJ} \quad (1)$$

$$Au = \int_0^{l} \left(\frac{qx^4}{24EJ} - \frac{qL^3x}{6Ej} + \frac{qL^4}{8Ej}\right)dx \quad (2)$$

a) from Eq. (1), we calculated the maximum displacement recorded at the diaphragm top, arrow u_{max} (x = 0), for each value of q measured in V_7 and for the various time steps t_i:

$$U_{max}\,(x = 0) = \frac{q\,L^4}{8EJ} \quad (3)$$

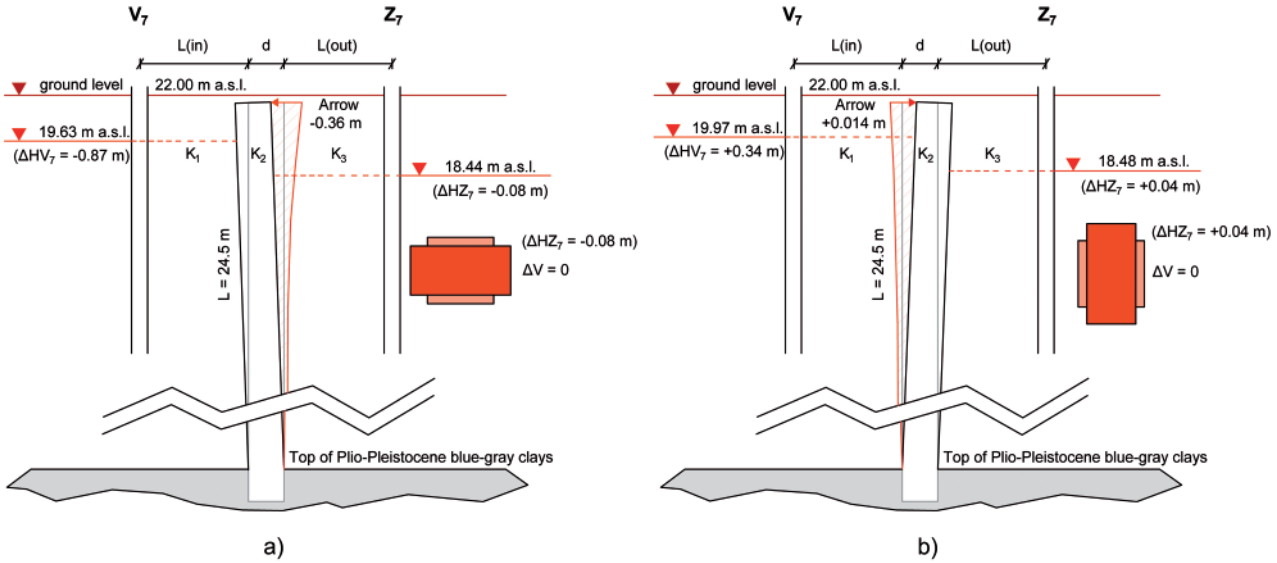


Fig. 6 - The link between the change in hydraulic head and the values of the arrow and surface area of the deformed shape is shown by the linearity of the $\Delta H(Z_7)/(\Delta Au/u_{max}(x=0)$ ratio. The figures simulate the overall displacement of the diaphragm, representing the deformation distributed between V_7 and Z_7

b) from Eq. (2), give the value of the surface area $Au_{(max)}$ related to the displacement of the diaphragm and based on the value of $u_{(max)}$ ($x = 0$):

$$Au_{max} = \frac{q\,L^5}{120\,E\,j} + \frac{q\,L^5}{12\,E\,j} + \frac{q\,L^5}{8\,E\,j} = \frac{q\,L^5}{20\,E\,j} \qquad (4)$$

By using Equations (3) and (4), we computed the values u_{max} and Au_{max} for all the time steps t_i. Statistical processing of the data enabled us to compare all the available results: piezometric heads in V_7, piezometric heads induced in Z_7, arrow u_{max} ($x = 0$), and surface area Au_{max} acting on the diaphragm. In particular, the comparison highlighted their mutual relationships under the various conditions of stress q, thereby validating the linear proportionality of the diaphragm displacement and the origin of the piezometric changes ΔHZ_7. Indeed, the data of Tables 2 and 3 shows the linear proportionality of ratios (V_7/Z_7) and of changes in hydraulic head with the data connected with the diaphragm displacement, $\Delta H(Z_7)/[(Au)/(u_{max}\ (x = 0)]$.

The analysis of our results confirmed what we had observed during hydraulic investigations: the behaviour of the system, subjected to hydraulic stress tests, proved to be typical of undrained systems, which respond to stress changes with exchanges of energy and induced deformations at constant volume (Figs. 3, 5, 6 a) and b)).

CONCLUSIONS

Investigations were carried out in the area of Malagrotta (Rome, Italy), accommodating a large MSW landfill, with a view to assessing the hydromechanical efficiency of the plastic diaphragm that had been put in place between 1986 and 1987. The investigations showed that the diaphragm can ensure the total hydraulic discontinuity of the landfill area, as set forth in Council Directive 75/442/EEC of 15 July 1975 on waste. This large-sized and very important structure (Figs. 1 and 2) forms an environmental safety barrier around the 161 ha landfill. For safety purposes, the individual subareas of the landfill, located inside the diaphragm, are equipped with ordinary confinement structures, as prescribed for MSW landfills.

Our hydrogeological and mechanical analyses demonstrated that the behaviour of the plastic diaphragm is in line with its design and test data. Our overall results, statistically processed, substantiated the efficiency of the diaphragm, as shown by the linearity of the proportionality ratios of V_7/Z_7 and $\Delta H(Z_7)/(\Delta Au/u_{max}\ (x = 0)$ (Tables 1 and 2).

After more than 34 years since its construction, the cement-bentonite plastic diaphragm retains an excellent hydromechanical efficiency, allowing it to perform its hydraulic sealing and mechanical elastic behaviour function in the future.

REFERENCES

Baconi A., Braga F., Caprili S., Gigliotti R. & Salvatore W. (2021) - *Seismic demand on steel reinforcing bars in reinforced concrete frame structures*. Bulletin of Earthquake Engineering (Article in Press).

Carboni M.G. (1980) - *Contributi alla stratigrafia del sottosuolo per la protezione della Campagna romana: il sondaggio Malagrotta.* Boll. Soc. Geol. It. n. **99**.

Calenda G. & Esu F. (1988) - *Progetto esecutivo per l'adeguamento al DPR n. 915 del 10.09.1982 della discarica controllata dei rifiuti solidi sita in località Malagrotta.* Progetto approvato dalla Consulta Regionale Lazio in data 19.05.1988 (Prot. n. 31488 del 27.06.1988).

Galeotti L., Gavasci R., Prestininzi A., & Romagnoli C. (1990) - *L'impatto delle attività atropiche sulle acque sotterranee dell'area di Malagrotta (Roma).* Geologia Applicata e Idrogeologia, n. **2** Carte allegate, Bari, Volume XXV.

Grisolia M., Napoleoni Q. & D'Aprile L. (2000) - *Permeability laboratory test on a large specimen of cement bentonite slurry*. Proc. GEOENG 2000 Melbourne (AUS).

Jefferis S.A. (1981) - *Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs*. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, June, Vol **1**: 435-440.

Opukumo A.W., Egirani D.E. & Reward K. (2021) - *Stress-strain characteristics of a cement-bentonite mix for a barrier system. The implication of time and curing.* Asian Journal of Engineering and Technology, Vol. **9** (2).

Paggi M., Ferro G. & Braga F. (2013) - *A multiscale approach for the seismic analysis of concrete gravity dams*. Computers and Structures, **122**: 230-238.

Prestininzi A. & Romagnoli C. (1991) - *La vulnerabilità degli acquiferi nello smaltimento dei rifiuti.* Ingegneria Sanitaria, Vol. **5**: 85-94.

Prestininzi A., Brunamonte F.P., Cosentino D., D'Amico L., Gavasci R. & Romagnoli C. (1987) - *Carta dei sistemi Idrogeologici del territorio della Regione Lazio. Studio per la realizzazione del Piano Regionale di smaltimento dei rifiuti, urbani, speciali, tossici e nocivi*. Assessorato ai Lavori Pubblici. Regione Lazio.

ROMA CAPITALE (2017) - *Piano di Caratterizzazione della discarica di Malagrotta.* Approvazione con Determinazione Dirigenziale n. QL/233/2017.

Vespo V. S., Musso G., Guida G. & Della Vecchia G. (2021) - *Studio della desaturazione di miscele cemento-bentonite indotta dall'evaporazione*. X Incontro Annuale Giovani Ingegneri Geotecnici.

Received December 2021 - Accepted January 2022

ITALIAN JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY AND ENVIRONMENT
Casa Editrice - *Università di Roma Sapienza*

IL DIAFRAMMA DI CEMENTO E BENTONITE DELLA DISCARICA DI RIFUTI URBANI DI MALAGROTTA (ROMA-ITALIA): ANALISI DI EFFICIENZA

FRANCO BRAGA[(*)] & ALBERTO PRESTININZI[(**)]

[(*)]Former Professor of construction technique and construction in seismic areas - Sapienza University of Rome - Rome (Italy)
[(**)]Former Professor of geological risks - Sapienza University of Rome, Honorary president of the Nhazca start-up - Sapienza University of Rome, Professor of risk analysis - eCampus University, School of engineering - Via Isimbardi, 10 - 22060 Novedrate (Como, Italy)
Corresponding author: alberto.prestininzi@uniroma1.it

ITALIAN JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY AND ENVIRONMENT
Casa Editrice - *Università di Roma Sapienza*

IL DIAFRAMMA DI CEMENTO E BENTONITE DELLA DISCARICA DI RIFUTI URBANI DI MALAGROTTA (ROMA-ITALIA): ANALISI DI EFFICIENZA

Franco Braga[(1)] & Alberto Prestininzi[(2)]

(1) FORMER FULL PROFESSOR OF CONSTRUCTION TECHNIQUE AND CONSTRUCTIONS IN SEISMIC AREAS. SAPIENZA ROME UNIVERSITY-

(2) FORMER FULL PROFESSOR OF GEOLOGICAL RISKS - SAPIENZA UNIVERSITY OF ROME. HONORARY PRESIDENT OF THE NHAZCA- START-UP SAPIENZA, ROME UNIVERSITY. PROFESSOR OF RISK ANALYSIS AT THE E-CAMPUS UNIVERSITY, FACULTY OF ENGINEERING.

Abstract

La discarica di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) della Città di Roma, una delle più estese d'Europa, nasce nell'area di Malagrotta dove erano presenti, tra gli anni '50 e i primi degli anni 600, importanti attività di estrazione di sabbia e ghiaia utilizzate come inerti nelle costruzioni, destinate alla rapida espansione urbana della Città di Roma del dopoguerra, ma anche per la realizzazione di importanti infrastrutture come le piste dell'Aeroporto Leonardo da Vinci di Fiumicino (Roma). La complessa stratigrafia dell'area, schematizzata, dall'alto verso il basso, è caratterizzata dalla presenza di depositi vulcanici, sabbie e ghiaie. Questi depositi si trovano al di sopra della importante formazione geologica delle argille grigio-azzurre di età Plio-pleistocenica, ad elevata consistenza e bassa permeabilità (Carboni M.G.,1980). Lo spessore delle argille grigio-azzurre è molto importante e presenta, nell'area di indagine, valori non inferiori ai 100 metri. Il contatto con le soprastanti sabbie e ghiaie è molto irregolare e si sviluppa su una superficie trasgressiva. Lo spessore delle ghiaie, pertanto, varia da pochi metri fino a decine di metri (Galeotti L. et al. 1990; Carboni M.G, 1980). E' in questo ambiente geologico che lo smaltimento dei Rifiuti Solidi Urbani ha trovato le condizioni ideali, grazie alla presenza di molte cavità, ereditate dall'asporto di grandi quantità di materiali inerti, per un volume stimato nel 1987 in oltre 200 x 10^6 m^3.

A Seguito del DPR 915/82, emanato dal Governo italiano (Decreto Presidente della Repubblica) del 10 settembre 1982, in accoglimento alle Direttive emanate dal Consiglio delle Comunità Europee n.75/442 del 15 luglio 1975, la discarica è stata sottoposta a interventi di bonifica e di messa in sicurezza. L'intervento più importane di adeguamento alle nuove normative, dal punto di vista sia economico, sia tecnico-scientifico, è stato rappresentato dall'isolamento idraulico dell'area destinata a discarica, costituito da un diaframma cemento-bentonite fondato a profondità variabile (Figure 1, 2, 3), ammorsato per oltre due metri nelle argille grigio-azzurre sovra consolidate di base. Le miscele di cemento-bentonite, utilizzate per costruire diaframmi plastici, costituiscono materiali speciali che hanno il fondamentale obiettivo della protezione di particolari siti, dovendo fornire prestazioni caratterizzate da bassa conducibilità idraulica e, allo stesso tempo, da elevati valori di resistenza e buon comportamento elastico.

Il comportamento, soprattutto idraulico di queste miscele, è stato ampiamente studiato in laboratorio e in sito (Vespo V.S et al, 2021). Escludendo i diaframmi che hanno la parte sommitale emergente al di sopra del piano campagna, con conseguente esposizione di una porzione dell'opera agli agenti atmosferici (Jefferis S., 1981; Opukumo A. W. et al., 2021; Grisolia M. et al., 2000), meno frequenti sono gli studi e le ricerche orientate a verificare lo stato di conservazione e di efficienza idro-meccanica nel tempo dei diaframmi plastici che si trovano interamente posizionati al di sotto del

piano campagna. Nella presente nota, è stato esaminato il caso del diaframma plastico realizzato nell'area di Malagrotta (Roma, Italy), tra settembre 1988 e novembre 1989, con l'obiettivo di confinare i Rifiuti Solidi Urbani provenienti, per lo più, dalla città di Roma (Italia). Verificare il suo livello di efficienza è ora opportuno, specie a causa delle indagini giudiziarie che ipotizzano una perdita di efficienza di questa importante opera, in termini di conducibilità idraulica e comportamento elastico. Per fare chiarezza al riguardo sono stati utilizzati i dati disponibili, ricavati da una serie di test idraulici effettuati nel sito di Malagrotta in prossimità del perimetro del diaframma plastico. E' stato possibile valutare le condizioni di flusso idraulico e gli spostamenti elastici teorici del diaframma (freccia e area della deformata) corrispondenti alle variazioni di carico. I risultati ottenuti sono stati analizzati attraverso l'equazione della linea elastica, utilizzando anche i dati contenuti nel progetto del diaframma plastico (Calenda G. & Esu F.,1988). Dal confronto tra questi dati sperimentali e i risultati ottenuti dalle valutazioni analitiche, elaborati anche attraverso confronti statistici, sono emersi dati complessivamente tranquillizzanti che segnalano un eccellente stato di conservazione dell'opera e della sua efficienza, ad oltre 34 anni dalla sua realizzazione.

Introduzione

Le miscele di cemento-bentonite, utilizzate per costruire diaframmi plastici, sono materiali speciali che hanno il fondamentale obiettivo della protezione di particolari siti, fornendo prestazioni caratterizzate da bassa conducibilità idraulica e, allo stesso tempo, da elevati valori di resistenza e comportamento elastico. Il comportamento, soprattutto idraulico, di queste miscele è stato ampiamente studiato in laboratorio e in sito. Escludendo i diaframmi che hanno la parte sommitale emergente al di sopra del piano campagna, con conseguente esposizione di una porzione dell'opera agli agenti atmosferici (Jefferis S., 1981; Opukumo A. W. et al., 2021; Vespo V.S et al, 2021; Grisolia et al. 2000), meno frequenti sono gli studi e le ricerche orientate a verificare lo stato di conservazione e di efficienza idro-meccanica nel tempo dei diaframmi plastici che si trovano interamente posizionati al di sotto del piano campagna. Nella presente nota, è stato esaminato il caso del diaframma plastico realizzato nell'area di Malagrotta (Roma, Italy), tra il 1988 e il 1989, con l'obiettivo di confinare i Rifiuti Solidi Urbani provenienti, per lo più, dalla città di Roma (Italia). Verificare il suo livello di efficienza è ora opportuno, specie a causa delle indagini giudiziarie che ipotizzano una sua perdita di efficienza di questa importante opera, in termini di conducibilità idraulica e comportamento elastico. Per fare chiarezza al riguardo sono stati utilizzati i dati disponibili, ricavati da una serie di test idraulici effettuati nel sito di Malagrotta in prossimità del perimetro del diaframma plastico. E' stato possibile valutare le condizioni idrauliche di flusso e gli spostamenti elastici teorici del diaframma (freccia e area della deformata) corrispondenti. I risultati ottenuti sono stati analizzati attraverso l'equazione della linea elastica, utilizzando anche i dati contenuti nel progetto del diaframma plastico (Calenda-Esu, 1988). Dal confronto tra questi dati sperimentali e i risultati delle valutazioni teoriche, elaborati attraverso confronti statistici, sono emersi dati complessivamente tranquillizzanti che segnalano un eccellente stato di conservazione dell'opera e della sua efficienza, ad oltre 34 anni dalla sua realizzazione.

La discarica di Malagrotta

La discarica di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) della Città di Roma, una delle più estese d'Europa, nasce nell'area di Malagrotta dove erano presenti, tra gli anni '50 e i primi degli anni '60, importanti attività di estrazione di sabbia e ghiaia utilizzate come inerti nelle costruzioni, destinate alla rapida espansione urbana della Città di Roma del dopoguerra, ma anche per la realizzazione di importanti infrastrutture come le piste dell'Aeroporto Leonardo da Vinci di Fiumicino (Roma). La complessa stratigrafia dell'area schematizzata, dal dall'alto verso il basso, vede la presenza di depositi vulcanici,

di sabbie e ghiaie e di argille grigio azzurre, molto compatte. Le argille grigio-azzurre, di età Plio-pleistocene, appartengono ad una importante formazione geologica e, nella successione stratigrafica presente sono state assunte, nel loro complesso, come la litologia di base. Lo spessore è molto importante e, nell'area descritta, presenta valori non inferiori ai 100 metri. La profondità del contatto con le soprastanti sabbie e ghiaie, misurata a partire dal piano campagna, si trova a quote variabili da pochi metri sino a decine di metri, (Galeotti et al. 1990; Carboni M.G. 1980). E' in questo ambiente geologico che lo smaltimento dei Rifiuti Solidi Urbani ha trovato le condizioni ideali, grazie alla presenza delle cavità ereditate dall'asporto di grandi quantità di materiali inerti, per un volume stimato nel 1987 in oltre 200 x 10^6 m^3.

A Seguito del DPR 915/82, emanato dal Governo italiano (Decreto Presidente della Repubblica) del 10 settembre 1982 in accoglimento alle Direttive emanate dal Consiglio delle Comunità Europee n.75/442 del 15 luglio 1975, la discarica è stata sottoposta a interventi di bonifica e di messa in sicurezza. L'intervento più importante di adeguamento alle nuove normative, dal punto di vista sia economico sia tecnico-scientifico, è rappresentato dalla costruzione di una cintura di isolamento idraulico dei vari lotti interni, che avrebbero ospitato i rifiuti, costituita da un diaframma plastico di profondità variabile (Fig. 1). L'intersezione con le sottostanti argille grigio-azzurre avviene quindi alle diverse profondità come si evince dalla figura 2. Per la realizzazione del diaframma è stata utilizzata una miscela di cemento idraulico-bentonite. Si tratta di una delle più importanti barriere idrauliche realizzate nel mondo per isolare discariche di RSU. (Tab.1).

Excavation [m^3]	Length [ml]	Circumscribed surface [m^2]	Depth [m]	Depth V_7-Z_7 L [m]	Medium thickness [m]	Surface diaphragm [m^2]	hydraulic cement [q.li]	Bentonite q.li
2,3^10^6	5.423	161^10^4	from-8 to-48	24,5	1,00	110.782	177.203	68.120

Tabella 1-Caratteristiche geometriche e costruttive del diaframma. Tempo di costruzione 2 anni.

Fig1- Discarica di Malagrotta. Visione prospettica del diaframma plastico. Nella parte Est, è visibile l'andamento del top delle argille di base e l'articolazione del diaframma plastico. (From Roma Capitale (2017, modificato).

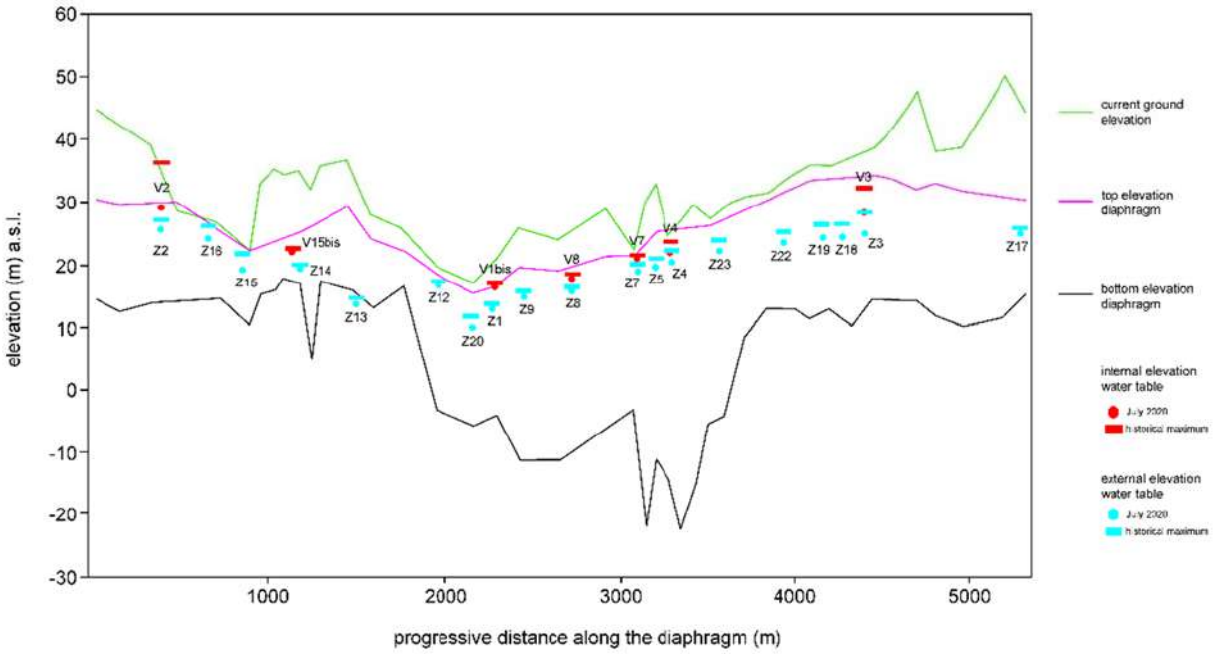


Figura 2- Articolazione del contatto Diaframma-Argille di base. Sono presenti, inoltre, i piezometri di controllo Interni (V) ed esterni (Z), la superficie topografica e il top del diaframma. Sulle ordinate si riportano le quote s.l.m. e, sulle ascisse le distanze rilevate lungo il perimetro del diaframma.

Condizioni idrauliche

Nell'ambito delle attività in atto, presso il sito della discarica di Malagrotta, è stata sviluppata una verifica dello stato di efficienza del diaframma impermeabile e, quindi, della sua funzionalità. Le attività programmate hanno riguardato, tra l'altro, una serie di test in sito. In questo paper, si analizzano i risultati delle prove di stress idraulico realizzate in apposite sezioni, ove sono presenti piezometri e strumenti di misura appartenenti all'ampio sistema di monitoraggio disposto sull'intera area della discarica, che si sviluppa su 161 Ha di terreno. Questa superficie è confinata dal diaframma plastico cemento-bentonite.

A questi dati sono stati aggiunti quelli acquisiti:

a) dagli studi realizzati per la costruzione del diaframma plastico (Esu F. & Calenda G., 1987);
b) dalla letteratura scientifica specifica (Galeotti et al, 1990; Grisolia M. et al. 2000);
c) dal *Piano di Caratterizzazione Discarica di Malagrotta* (Roma Capitale-2017);
d) dall'archivio costruito nel tempo attraverso rilievi e analisi effettuati, ma anche con i dati giornalieri provenienti dal monitoraggio presente lungo tutto il perimetro del Diaframma plastico.

Tutto il corredo di dati conferma l'efficienza del sistema di confinamento esaminato.

La figura 3 mostra lo schema della sezione utilizzata per i test idraulici, rappresentativa dell'intero sistema di confinamento così come si evince dall'esame della figura 2. Lungo la sezione 3 i test sono stati realizzati con lo specifico obiettivo di definire lo stato di efficienza e conservazione del confinamento idraulico cemento-bentonite. Il Piezometro V_7, ubicato all'interno dell'area della discarica, risulta separato dal piezometro Z_7 dall'interposto diaframma plastico. Z_7 è posizionato quindi all'esterno dell'area di discarica. I carichi rilevati in V_7 e gli effetti, misurati in Z_7, sono espressi in metri s.l.m. e riguardano l'intero arco temporale di durata dei test t_0-t_{12} (figura 5). I differenti time steps sono direttamente connessi alle attività di pompaggio, alternati a intervalli senza pompaggio. Le variazioni della quota piezometrica interna sono rappresentate dai valori di carico idraulico rilevati in V_7. Il piezometro Z_7 di controllo è ubicato all'esterno del diaframma. Per tutti gli intervalli di tempo t_0 - t_{12}, le quote idrauliche esterne rilevate in Z_7 sono risultate costantemente più

basse rispetto a quelle interne presenti in V_7. Questo risultato sperimentale è in linea con i dati rilevati nel tempo sui piezometri interni (V_i) ed esterni lungo tutto il perimetro (Z_i), (Fig. 2)

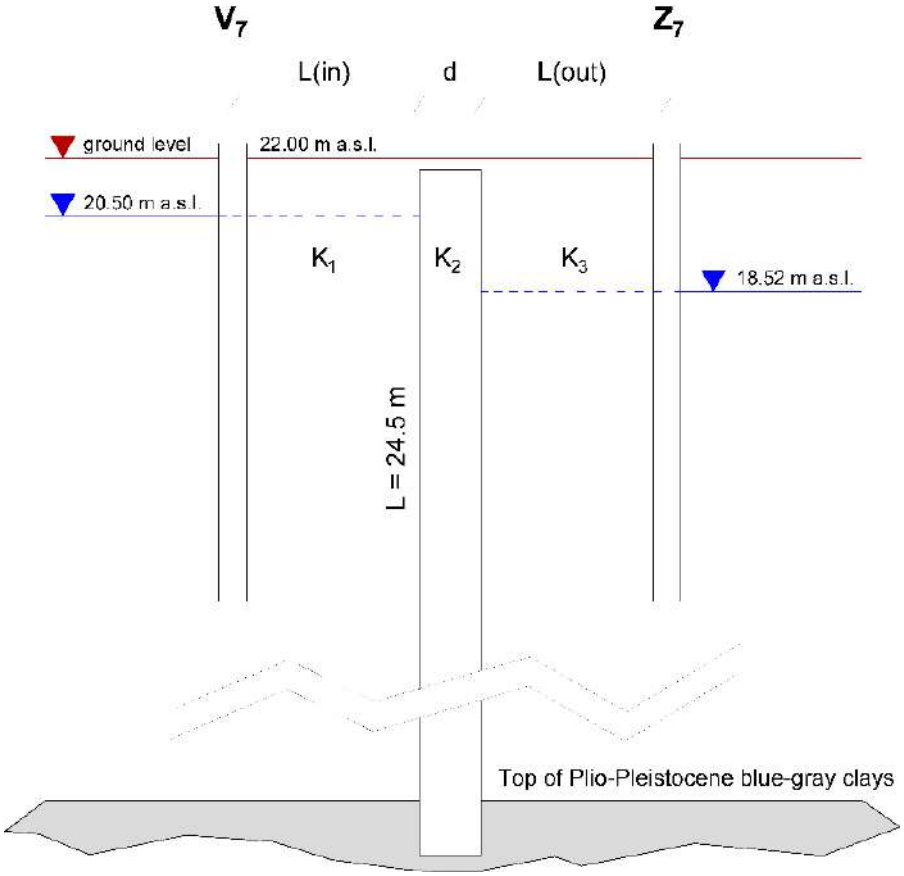


Figura 3- Senza scala. Schema della posizione dei piezometri V_7, Z_7 e del diaframma cemento-bentonite nelle condizioni iniziali t_0, (assenza di pompaggio). Sono riportati: la distanza L= 8 m tra i piezometri; le porzioni di terreno $L_{(in)}$ e $L_{(out)}$ compresi tra i piezometri e il diaframma; i coefficienti di permeabilità k_1 e k_3, delle porzioni di terreno di $L_{(in)}$ e $L_{(out)}$, con valori medi di 10^{-5} m/s; il diaframma cemento-bentonite, di spessore medio d=1 m, il coefficiente di permeabilità K_2 di progetto, con valori non superiore a 10^{-9} m/s, e la sua profondità L=24,5 m. La linea di fondo simula la presenza delle argille grigio-azzurre Plio-pleistoceniche, compatte e "impermeabili", nelle quali è ammorsata la parte profonda del diaframma per circa 2 metri.

Impostazione delle verifiche

Poiché il moto di filtrazione fra due generici punti del terreno è governato solo dalla loro differenza di carico idraulico, gli studi che consentono di quantificare il flusso dell'acqua fanno riferimento alla nota *Legge di Darcy*. In queste condizioni, è possibile identificare i legami fondamentali tra le caratteristiche del moto e, in particolare, della velocità di flusso, delle proprietà del terreno e della perdita di carico tra i punti considerati. Lo studio del flusso monodimensionale dell'acqua nel terreno, in condizioni di moto laminare, consente quindi di misurare la portata, per unità di superficie, che risulta direttamente proporzionale alla perdita di carico tra due punti e inversamente proporzionale alla lunghezza del percorso considerato. In sostanza, con riferimento alla Figura 3, tra la portata Q per unità di superficie, può essere definita dalla *velocità apparente,* o nominale, di filtrazione.

Elemento centrale del test idraulico effettuato sulla sezione V_7-Z_7 è stato quello di verificare il comportamento complessivo del sistema idrogeologico. Con riferimento alla figura 3, le condizioni al contorno considerate per questo sistema, sono costituite:

1) dal diaframma *Cemento-bentonite avente spessore di 1 metro e lunghezza L= 24,5 m;*

2) dai confini laterali interni, costituiti dai depositi di terreno presenti tra V7 e il diaframma impermeabile, $L_{(in)}$;
3) dai confini laterali esterni, costituiti dai depositi di terreno presenti tra il diaframma e Z7, $L_{(out)}$;
4) dai confini, superiori e inferiori costituiti, rispettivamente, dalla superficie topografica e dal top delle argille "*di base*", note per i loro caratteri fisico-meccanici che classificano questa formazione argillosa come "impermeabile", avente spessori di centinaia di qualche centinaio di metri e composizione granulometrica costituita da oltre il 40% in peso da argille limose, con frazione argillosa < 2 μ molto elevata (Galeotti et.al., 1990).

La analisi della verifica idraulica sono state sviluppate con riferimento ai grafici della figura 3, 4 e 5.

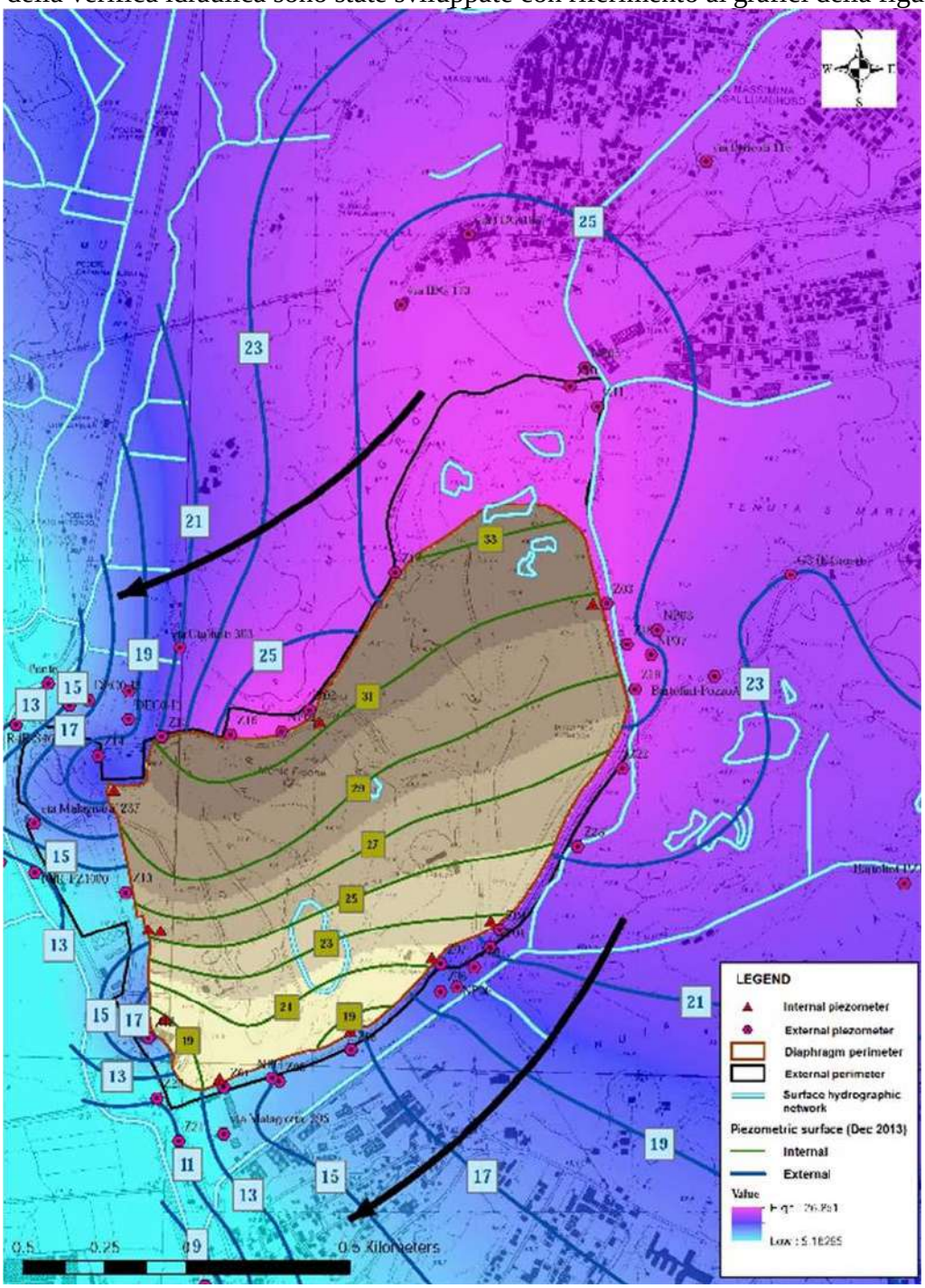


Figura 4- Condizioni idrauliche presente nell'area di Malagrotta. Posizione del Diaframma plastico e andamento delle isopieze "interne" ed "esterne" al diaframma. Posizione dei piezometri interni ed esterni utilizzate per il monitoraggio. (From-Piano di Caratterizzazione, area della discarica- modificato).

Analisi idrogeologica

Il grafico di figura 5, che registra i risultati del test effettuato sul grafico della figure 3, consente di produrre significative valutazioni sul comportamento del sistema idrogeologico sopra descritto. In particolare, sulla ipotesi che il diaframma, *cemento-bentonite*, possa essere attraversato da fluidi, sotto la spinta del carico idraulico governato dalla gravità.

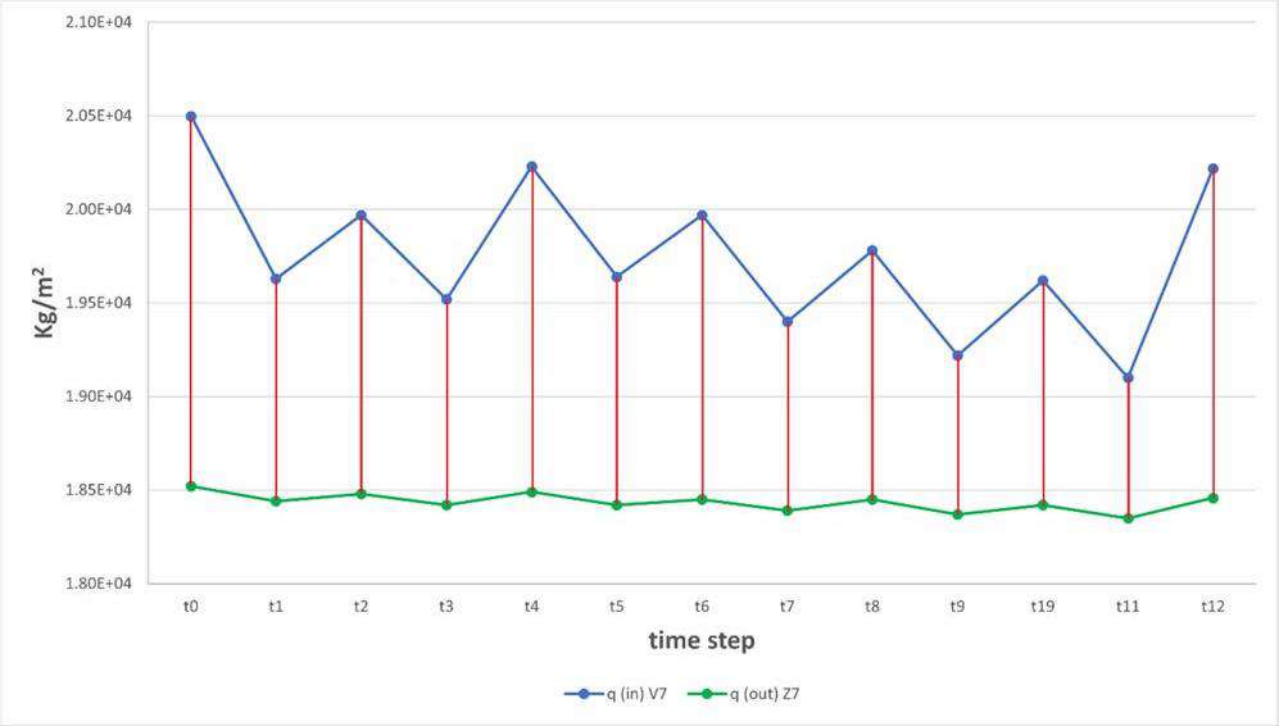


Figura 5 -Test idraulico: andamento del carico piezometrico in V7 ed effetti rilevati in Z7. T_0=15 luglio 2020. A partire da T_0 sono presenti n.12 time step (t_1-t_{12}). Sono riportati i carichi idraulici (m asl) rilevati in automatico nel piezometro V_7 e gli effetti indotti nel piezometro Z_7, ubicato all'esterno del diaframma cemento bentonite. Si può rilevare come il carico piezometrico esterno in Z_7 sia costantemente inferiore alla quota rilevata in V_7. (*From- Relazione Finale incidente probatorio…….mod..).*

Attraverso le programmate prove di emungimento, effettuate nei pozzi posti all'interno del diaframma cemento bentonite, grazie alla trasmissività dei terreni ivi presenti è stato possibile variare il carico idraulico nei pressi della sezione di misura. Tali variazioni sono registrate dal piezometro V7. La contemporanea lettura del piezometro Z_7, (Figura 5) ha dimostrato inequivocabilmente che il diaframma interposto inibisce il flusso dall'interno all'esterno e viceversa. Infatti, non devono trarre in inganno le minime variazioni delle quote piezometriche registrate esternamente, sul piezometro Z_7, a seguito delle variazioni registrate in V_7. In primo luogo, si deve rilevare che le due quote, interna ed esterna, risultano sempre differenti, con la quota piezometrica interna sempre più elevata rispetto a quella esterna. A seguito dei cicli di emungimento, a fronte di abbassamenti/sollevamenti interni dell'ordine di un metro, esternamente alla paratia si sono registrate variazioni, in abbassamento o sollevamento, dell'ordine del centimetro. Tali minime variazioni indicano però soltanto una modifica

di pressione e non di flusso idrico. Infatti, anche ragionando per assurdo non è possibile ipotizzare un flusso attraverso il diaframma, in quanto il livello di falda interno resta comunque sempre notevolmente maggiore di quello esterno. Poiché il flusso della falda è determinato dalla gravità (gradiente idraulico) è impossibile che l'acqua possa muoversi da livelli minori verso quelli maggiori. Nel caso opposto, ovvero ipotizzando un flusso dall'interno verso l'esterno, i livelli esterni ricevendo acqua dovrebbero mostrare una tendenza all'innalzamento e non all'abbassamento, sia pure molto limitatamente: in assenza di incremento del livello piezometrico esterno non è possibile che vi sia flusso.
Queste condizioni trovano una razionale spiegazione scientifica considerando il comportamento dei sistemi chiusi. Senza entrare nel merito, è noto che i sistemi chiusi sono in grado di scambiare energia (in questo caso *pressione*) ma non materia (in questo caso *acqua*). Come mostra il grafico sperimentale di figura 5, le variazioni di carico osservati in V_7 e Z_7 presentano una risposta temporale istantanea ($\Delta t_i=0$) per ogni time step. Questo aspetto è tipico dei sistemi chiusi, che non scambiano materia. Questo comportamento è noto in geotecnica con il nome di *comportamento non-drenato*, dove le variazioni di pressione inducono modifiche nella massa di terreno, o nella struttura, a volume costante.

Analisi con applicazione della legge di Darcy
L'interpretazione ottenuta con l'analisi "idrogeologica" trova conferma con quanto scientificamente si ottiene utilizzando la nota Legge di Darcy, valida per tutti i sistemi bifase (costituiti dalla fase solida e liquida, considerate "incomprimibili").

Considerando le condizioni geometriche rilevate lungo la sezione V_7-diaframma-Z7, possiamo applicare la legge di Darcy, con:

- L= 8 [m]: distanza tra V_7 e Z_7;
- d= spessore medio del diaframma pari a metri 1 [m];
- ΔH=carico piezometrico iniziale a t_0, pari a (20,50-18,52) =1,98 m (14.07.2020);
- $i_t=\Delta H/d$ gradiente idraulico, calcolato per ogni time step t_i, con i variabile tra t_o, e t_{12}.
  Si noti che il carico piezometrica in V_7 per ogni step temporale t'è sempre maggiore rispetto al carico piezometrico di Z_7. (figura 5);
- $K_1 \cong K_3$ = coefficienti di permeabilità Darcy dei terreni posti tra V_7 e il diaframma, e tra Z_7 e il diaframma, assunti pari 10^{-4}- 10^{-5} [m/s];
- K_2= coefficiente di permeabilità Darcy del diaframma, con valori di progetto non superiori a 10^{-9}[m/s].

Sulla base delle stratigrafie e delle considerazioni fatte, ricavate dai rilievi prodotti nel tempo e, soprattutto, da quelli provenienti dai dati contenuti nel Piano di Caratterizzazione del sito di Malagrotta, risulta che $K_1 \cong K_3 >>> K_2$, si assume quindi $k_2/(k_1=k_3) \cong 0$. In queste condizioni il flusso di Darcy che interessa il tratto L pari a 8 metri, perderà tutto il suo carico lungo il tratto del diaframma avente coefficiente di permeabilità K_2, ovvero lungo il percorso d=1 m. Il gradiente idraulico assume pertanto la dimensione $i=\Delta H/d$ e la velocità del flusso sarà $V=k_2 \cdot i$.

Considerando una superfice A, attraversata dal flusso idrico lungo il percorso tra V_7 e Z_7, pari a 1 m^2, la quantità di fluido che attraversa la sezione A, ad ogni time step riportato in Figura 5, ovvero ai tempi t_0, t_1.....t_{12}, sarà $Q=A \cdot k_2 \cdot i_t=A \cdot V$. Ricorrendo ad una *soluzione per assurdo*, imponendo cioè una velocita compatibile con le condizioni fisiche presenti nella sezione considerata, ovvero: distanza d=1 m e tempi di percorrenza del fluido compatibili con i dati registrati nei piezometri di riferimento di Figura 5, dove ad ogni time step t_i risulta che il tempo di partenza del flusso da V_7 e il tempo di arrivo

a Z_7 coincidono, tale che la differenza tra tempo di partenza e tempo di arrivo risulta pari a $\Delta t = (t_{i(in)} - t_{i(out)}) = 0$.

Pertanto, la velocità apparente del flusso sarebbe, $V = \frac{L}{\Delta t} = \frac{8}{0} = \infty$. Se la velocità assumesse un valore infinito, la relazione $V = k_2 \cdot i$, per essere vera, dovrebbe avere la seguente espressione:

$V = k_2 \cdot i = \infty = k_2 \cdot \Delta H/d$. Ricordando che il gradiente idraulico $i = H/d$ assume il valore $0 < i < \infty$, per rendere valida l'equazione di Darcy, k_2 dovrebbe assumere il valore ∞, ovvero:

$$V = \frac{L}{\Delta t} = \frac{8}{0} = k_2 \cdot i = \infty \cdot \Delta H/d \text{ (Risultato non reale).}$$

Questo dato *non reale*, ottenuto imponendo la *soluzione di Darcy per assurdo,* dimostra che la paratia di cemento-bentonite è totalmente "impermeabile" e quindi pienamente idonea a svolgere la funzione per la quale è stata progettata e realizzata (Prestininzi A. Romagnoli C. 1991). I dati riportati nella tabella 2 confermano questo assunto, ovvero che il carico idraulico in V_7 e in Z_7 sono legati da un rapporto lineare di proporzionalità, connesso al trasferimento di energia (pressione), come si evince dai dati riportati nella Tabella 2.

Time steps	Hydraulic load V_7 (m a.s.l.)	Hydraulic load Z_7 (m a.s.l.)	V_7/Z_7	Dev.St
t_0	20,50	18,52	1,11	0,02
t_1	19,63	18,44	1,15	0,02
t_2	19,97	18,48	1,11	0,02
t_3	19,52	18,42	1,10	0,02
t_4	20,23	18,49	1,14	0,02
t_5	19,64	18,42	1,16	0,02
t_6	19,97	18,45	1,12	0,02
t_7	19,40	18,39	1,10	0,02
t_8	19,78	18,45	1,12	0,02
t_9	19,22	18,37	1,10	0,02
t_{10}	19,62	18,42	1,15	0,02
t_{11}	19,10	18,35	1,10	0,02
t_{12}	20,22	18,46	1,15	0,02

Tabella 2. Rapporto di proporzionalità tra i carichi idraulici V_7 e Z_7, presenti sulle pareti del diaframma di cemento-bentonite *"interna e esterna",* per ogni time step. Il trattamento statistico dei

dati mostra la lineare proporzionalità, l'assenza di scambi idrici ed il comportamento non-drenato del sistema analizzato

Analisi della deformata del diaframma

Le considerazioni effettuate attraverso l'analisi idrogeologica e l'applicazione della legge di Darcy, trovano conferma con l'analisi meccanica del comportamento elastico del diaframma, costruito con una miscela di cemento-bentonite. Le valutazioni effettuate, utilizzando le equazioni della linea elastica, potranno evidenziare come il comportamento non-drenato del sistema terreno-diaframma risulti coerente con le analisi condotte utilizzando i dati sperimentali derivanti dai test idraulici e dalle verifiche statistiche.

Con riferimento alle figure 3, 6a e 6b, è possibile sviluppare l'equazione della linea elastica per la valutazione dei parametri che regolano gli spostamenti del sistema considerato, guidati dalla presenza del diaframma.

Assumendo i dati già utilizzati per le verifiche idrauliche, tratte dalle misure del carico piezometrico presente in V_7, ed esprimendo tutto in Kg e metri, abbiamo:

q=Carico [Kg/m2] uniformemente distribuito e agente sulla parete del diaframma cemento bentonite;

L= lunghezza libera del diaframma [m], pari 24,5 m, in corrispondenza della sezione V_7-Z_7;

E= modulo di Young del diaframma cemento-bentonite, assunto pari a $1{,}4 * 10^{10}$ Kg/m^2 (Jefferis, S.A. (1981); Opukumo A.W.et al. (2021); Paggi, M., Ferro, G., Braga, F (2013):

J= momento d'inerzia, pari a 0,083 m^4, per uno diaframma largo 1 metro.

Attraverso l'equazione della linea elastica è possibile definire la freccia u(x) [m] agente sul diaframma tra la posizione in testa (x=0) e la posizione al piede (x=24,5) e la corrispondente area Au compresa tra la posizione deformata e indeformata:

$$u_x = \frac{q\,x^4}{24EJ} - \frac{q\,L^3\,x}{6\,E\,J} + \frac{qL^4}{8EJ} \quad (1);$$

$$Au = \int_L^0 \left(\frac{qx^4}{24EJ} - \frac{qL^3x}{6Ej} + \frac{qL^4}{8EJ}\right)dx \quad [2]$$

a) dalla [1] si calcola lo spostamento massimo registrato al top al diaframma, freccia u_{max}(x=0), per ogni valore di q rilevato in V_7 e per i vari time step t_i:

$$U_{max}(x=0) = \frac{q\,L^4}{8EJ} \quad [3];$$

b) dalla [2] si calcola il valore dell'area $Au_{(max)}$ relativa allo spostamento del diaframma e riferita al valore di $u_{(max)}$(x=0):

$$Au_{max} = \frac{q\,L^5}{120\,E\,J} + \frac{q\,L^5}{12\,E\,J} + \frac{q\,L^5}{8\,E\,J} = \frac{q\,L^5}{20\,E\,J} \quad [4]$$

L'utilizzo delle equazioni [3] e [4] ha consentito di calcolare i valori u_{max}, Au_{max} per tutti i time step.

Attraverso una elaborazione statistica dei risultati ottenuti è stato possibile confrontare tutti i risultati disponibili: carichi piezometrici V_7; carichi piezometrici indotti in Z_7; (freccia $u_{max}(x=0)$; area Au_{max} agenti sul diaframma. In particolare, è stata messa in evidenza la loro reciproca relazione, nelle differenti condizioni di sollecitazione q. Si conferma la lineare proporzionalità dello spostamento del diaframma e la genesi delle variazioni piezometriche ΔHZ_7. I dati riportati nelle tabelle 2 e 3 rivelano, infatti, la lineare proporzionalità dei rapporti (V_7/Z_7) e delle variazioni del carico idraulico con i dati connessi allo spostamento del diaframma, $\Delta H(Z_7)/[(Au)/(u_{max}(x=0)]$.

Time steps	$\Delta H(Z_7)$ (□m□	$U_x(x=0)$ "Arrow" ± (m)	ΔAu ($\pm m^2$)	$\Delta H(Z_7)$/ ($\Delta Au/u_x(x=0)$)	St.Dev
t_0	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00
t_1	-0,08	-0,036	-0,36	-0,01	0,007
t_2	0,04	0,014	0,14	0,00	
t_3	-0,06	-0,019	-0,18	-0,01	
t_4	0,07	0,029	0,29	0,01	
t_5	-0,07	-0,024	-0,24	-0,01	
t_6	0,03	0,014	0,14	0,00	
t_7	-0,06	-0,023	-0,23	-0,01	
t_8	0,06	0,016	0,16	0,01	
t_9	-0,08	-0,023	-0,23	-0,01	
t_{10}	0,05	0,016	0,16	0,01	
t_{11}	-0,07	-0,021	-0,21	-0,01	
t_{12}	0,11	0,046	0,46	0,01	

Table 3- Statistical linearity of the proportionality ratio $\Delta HZ_7/(C/ux\ (x = 0))$, detected through the link between the variation of the hydraulic load (ΔHZ_7) and the displacements of the diaphragm (Arrow ux(x =0) and (ΔAu), induced by the internal hydraulic load (V_7).

L'analisi dei risultati conferma quanto già osservato attraverso le valutazioni di carattere idraulico: Il comportamento del sistema, sollecitato attraverso test di stress idraulico, è tipico dei

sistemi non-drenati che rispondono alle variazioni di sollecitazione con scambio di energia e deformazioni indotte a volume costante.

(figura 3), 5), 6a), 6b).

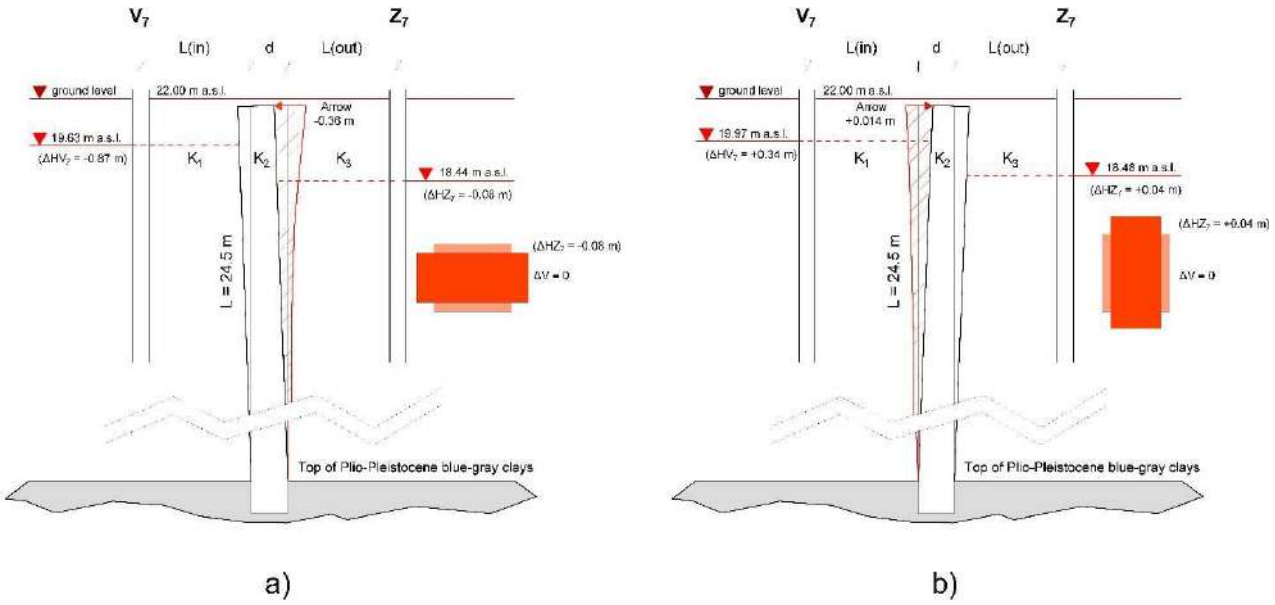


Figura 6 a), 6b) Il legame tra variazione del carico idraulico e i valori della freccia e area della deformata è mostrato dalla linearità rapporto tra $\Delta H(Z7)/(\Delta Au/u_{max}(x=0)$. Le figure 6a) e 6b) simulano lo spostamento complessivo del diaframma, che rappresenta la deformazione distribuita tra V_7 e Z_7.

Conclusioni

Le indagini eseguite nell'area di Malagrotta (Roma-Italia), orientate alla valutazione dello stato di conservazione del diaframma plastico costruito tra il 1986 e 1987, mostrano che l'opera è nella condizione di garantire la totale discontinuità idraulica dell'area che contiene la grande discarica di RSU, così come previsto dalle Direttive emanate dal Consiglio delle Comunità Europee n.75/442 del 15 luglio 1975. Si tratta di un'opera di grande dimensione e importanza (Figure 1 e 2,) che forma una barriera di sicurezza ambientale intorno ai 161 Ha dell'area di smaltimento dei rifiuti. Ai fini della sicurezza, i singoli lotti dell'area di 161 Ha, posti all'interno del diaframma, sono dotati delle normali opere di isolamento, così come previsto per le discariche RSU.

Le analisi idrogeologiche e meccaniche effettuate hanno mostrato che il comportamento del diaframma plastico è in linea con i dati previsti dal progetto e i controlli del collaudo. I risultati complessivamente ottenuti, sottoposti ad elaborazione statistica, confermano l'efficienza del diaframma come mostra la linearità dei rapporti di proporzionalità di V7/Z7 e di $\Delta H(Z7)/(\Delta Au/u_{max}(x=0)$, Tabelle 1 e 2.

A distanza di oltre 35 anni dalla sua costruzione, il diaframma plastico di cemento-bentonite mostra un eccellente stato di conservazione che consente di garantire la sua funzione di isolamento idraulico e del suo comportamento elastico per il futuro.

References

Braconi, A., Braga, F., Caprili, S., Gigliotti, R., Salvatore, W. (2021)- Seismic demand on steel reinforcing bars in reinforced concrete frame structures. Bulletin of Earthquake Engineering (Article in Press).

Carboni M.G. (1980) - Contributi alla stratigrafia del sottosuolo per la protezione della Campagna romana: il sondaggio Malagrotta. Boll. Soc,. Geol. It. n. 99.

Calenda G., & Esu F. (1988). Progetto esecutivo per l'adeguamento al DPR n. 915 del 10.09.1982 della discarica controllata dei rifiuti solidi sita in località Malagrotta. Progetto approvato dalla Consulta Regionale Lazio in data 19.05.1988 (Prot. n. 31488 del 27.06.1988).

Galeotti L., Gavasci R. Prestininzi A., Romagnoli C. (1990). L'impatto delle attività antropiche sulle acque sotterranee dell'area di Malagrotta (Roma). Geologia Applicata e Idrogeologia, n. 2 Carte allegate, Bari, Volume XXV.

Grisolia M.; Napoleoni Q.; D'Aprile L. (2000): "Permeability Laboratory Test on Large Specimen Cement Bentonite Slurry" Proc. GEOENG 2000 Melbourne (AUS)

Jefferis, S.A. (1981)-Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs, International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, June - Vol 1, pp.435-440.

Opukumo A.W., Egirani D.E., Reward K., (2021). Stress-Strain Characteristics of a Cement-Bentonite Mix for a Barrier System The Implication of Time and Curing. Asian Journal of Engineering and Theconology. Vol. 9 No. 2: April 2021

Paggi, M., Ferro, G., Braga, F (2013)- A multiscale approach for the seismic analysis of concrete gravity dams. Computers and Structures, 122, pp. 230-238.

Prestininzi A., Romagnoli C. (1991) - La Vulnerabilità Degli Acquiferi Nello Smaltimento Dei Rifiuti. Ingegneria Sanitaria. Vol.5, 85-94. ISNN 0020-0980

Prestininzi A., Brunamonte F.P., Cosentino D., D'Amico L., Gavasci R., Romagnoli C. (1987)- Carta dei sistemi Idrogeologici del territorio della Regione Lazio. Studio per la realizzazione del Piano Regionale di smaltimento dei rifiuti, urbani, speciali, tossici e nocivi. Ass.to ai LL.PP. Regione Lazio.

Roma Capitale (2017). Piano di Caratterizzazione della discarica di Malagrotta. Approvazione con Determinazione Dirigenziale n. QL/233/2017.

Vespo V.S., Musso G., Guida G., Della Vecchia G. (2021). Studio della desaturazione di miscele cemento-bentonite indotta dall'evaporazione. Conference: X Incontro Annuale giovani Ingegneri Geotecnici.

Italian Journal of Engineering Geology and Environment

www.ijege.uniroma1.it

ISSN 1825 - 6635 (print)
ISSN 2035 - 5688 (online)

Rivista semestrale scientifico-tecnologica
Half-yearly Journal

Direttore Responsabile / Scientific Editor-in-Chief
Gabriele Scarascia Mugnozza

Organizzazione Redazionale / Assistant to the Editor
Tania Ruspandini, Stefano Rivellino

Progetto Grafico / Graphic Design
Centro Stampa Università

Redazione / Editorial Office
Piazzale Aldo Moro, 5 - 00185 Roma (Italy)
tel 06 49914040
e-mail: ijege@uniroma1.it

Proprietà Editoriale
Università degli Studi di Roma La Sapienza

Organizzazione Editoriale / Publisher
Sapienza Università Editrice
Iscrizione al Registro degli Operatori della Comunicazione - presso l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, Dipartimento Vigilanza e Controllo, Ufficio Registro e Assetto – N. 11420
Piazzale Aldo Moro, 5 - 00185 Roma
tel. 06 49912699/821; fax 06 49912858
e-mail editrice.sapienza@uniroma1.it / csaamministr@uniroma1.it
www.editricesapienza.it

Stampa / Print by
Centro Stampa d'Ateneo, Sapienza Università di Roma
Piazzale Aldo Moro, 5 - 00185 Roma
tel. 06 49912699; fax 06 49912858
e-mail: csaamministr@uniroma1.it

Un numero / one issue 20.00 euro
Un numero arretrato / back number 24.00 euro

Price of one issue outside of Italy 32.00 euro + postal service
Price for back number outside of Italy 24.00 euro + postal service

Abbonamento annuale in Italia 32.00 euro
Yearly subscription outside of Italy 32.00 euro + postal service

L'abbonamento si formalizza previo bonifico dell'importo corrispondente sul conto corrente bancario IT02L0200805227000400023075 presso Unicredit Banca di Roma - Ag. Sapienza (153) intestato a Centro Stampa Università (Ente 3694, codice soggetto n. 226)

The first issue will be delivered upon receipt of payment by bank trasfer (details IT02L0200805227000400023075)

Distribuzione in libreria: PdE

Registrazione presso il Tribunale Civile di Roma
n. 181/18 del 22 novembre 2018

Rivista pubblicata con il contributo della Sapienza Università di Roma

Il testo in inglese degli articoli è redatto direttamente dagli Autori
English text is by the Authors

Italian Journal of Engineering Geology and Environment è la rivista dell'Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale (AIGA)
La rivista è pubblicata sotto gli auspici della sezione italiana della International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)
The Italian Journal of Engineering Geology and Environment is the journal of the Italian Association of Engineering Geology and Environment (AIGA)
The Journal is published under the auspices of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) - Italian Group

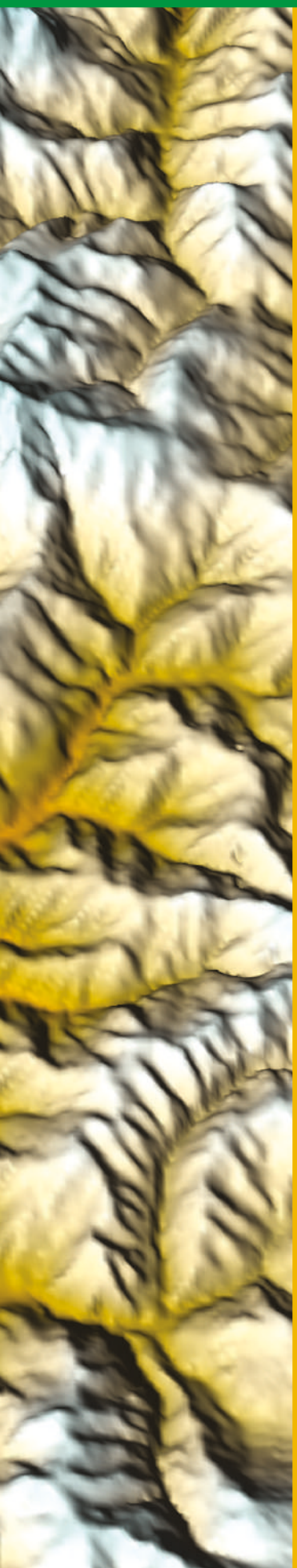


TABLE OF CONTENTS

EDITORIALE / LEADER *by Gabriele SCARASCIA MUGNOZZA* pag. 3

Ali H. AL-DABBAGH & Kotayba T. AL-YOUZBAKEY pag. 5
GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF HEAVY ELEMENTS IN SEDIMENTS OF MAIN WADIS OF WESTERN PART OF MOSUL CITY, IRAQ

Antonio Mario FEDERICO pag. 17
POTENTIAL LINK BETWEEN THE GOLDEN RATIO AND THE AT-REST EARTH PRESSURE IN NORMALLY CONSOLIDATED SOILS

Mojtaba RAHIMI SHAHID & Fariba KARGARANBAFGHI pag. 29
DETERMINING THE ROCK BRITTLE INDEX (BI) USING MULTIVARIATE REGRESSION (A CASE STUDY)

Massimo RINALDI pag. 41
BED-LEVEL ADJUSTMENTS IN THE PO RIVER CATCHMENT (NORTHERN ITALY)

Franco BRAGA & Alberto PRESTININZI pag. 51
THE CEMENT-BENTONITE DIAPHRAGM OF THE MALAGROTTA MUNICIPAL WASTE LANDFILL (ROME, ITALY): EFFICIENCY ANALYSIS

Marco Emanuele DISCENZA, Pierfederico DE PARI, Jagadish KUNDU, Mariacarmela MINNILLO, Sergio ROMANO & Gabriele SCARASCIA MUGNOZZA pag. 61
INNOVATIVE APPROACH FOR THE DETERMINATION OF UNIT WEIGHT AND DENSITY OF SOIL AND ROCK MASSES

Guidelines for authors and all published articles are available at *www.ijege.uniroma1.it*

9 771825 663503

ISSN 1825-6635