



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

Francio 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.

Extended abstract (Italiano)

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, 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 $200 \times 10^6 \text{ m}^3$.

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 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 idromeccanica 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 $200 \times 10^6 \text{ m}^3$.

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 c 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).

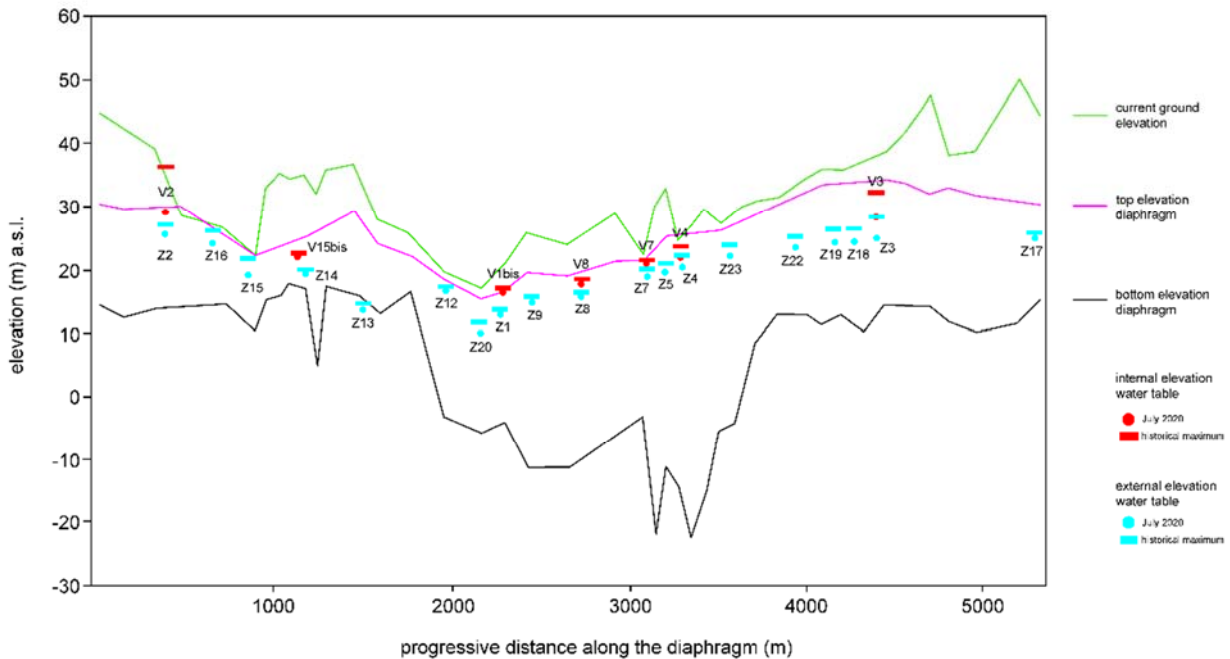


Figura 2- Articolazione del contatto Diaframma-Argille di base. Sono presenti, inoltre, i piezometri di controllo Interni (V) ed esterni (Z), la superficie topografica e il top del diaframma. Sulle ordinate si riportano le quote s.l.m. e, sulle ascisse le distanze rilevate lungo il perimetro del diaframma.

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:

- dagli studi realizzati per la costruzione del diaframma plastico (Esu F. & Calenda G., 1987);
- dalla letteratura scientifica specifica (Galeotti et al, 1990; Grisolia M. et al. 2000);
- dal Piano di Caratterizzazione Discarica di Malagrotta (Roma Capitale-2017);
- 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 V₇, ubicato all'interno dell'area della discarica, risulta separato dal piezometro Z₇ dall'interposto diaframma plastico. Z₇ è posizionato quindi all'esterno dell'area di discarica. I carichi rilevati in V₇ e gli effetti, misurati in Z₇, sono espressi in metri s.l.m. e riguardano l'intero arco temporale di durata dei test t₀-t₁₂ (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 V₇. Il piezometro Z₇ di controllo è ubicato all'esterno del diaframma. Per tutti gli intervalli di tempo t₀ - t₁₂, le quote idrauliche esterne rilevate in Z₇ sono risultate costantemente più

basse rispetto a quelle interne presenti in V₇. 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)

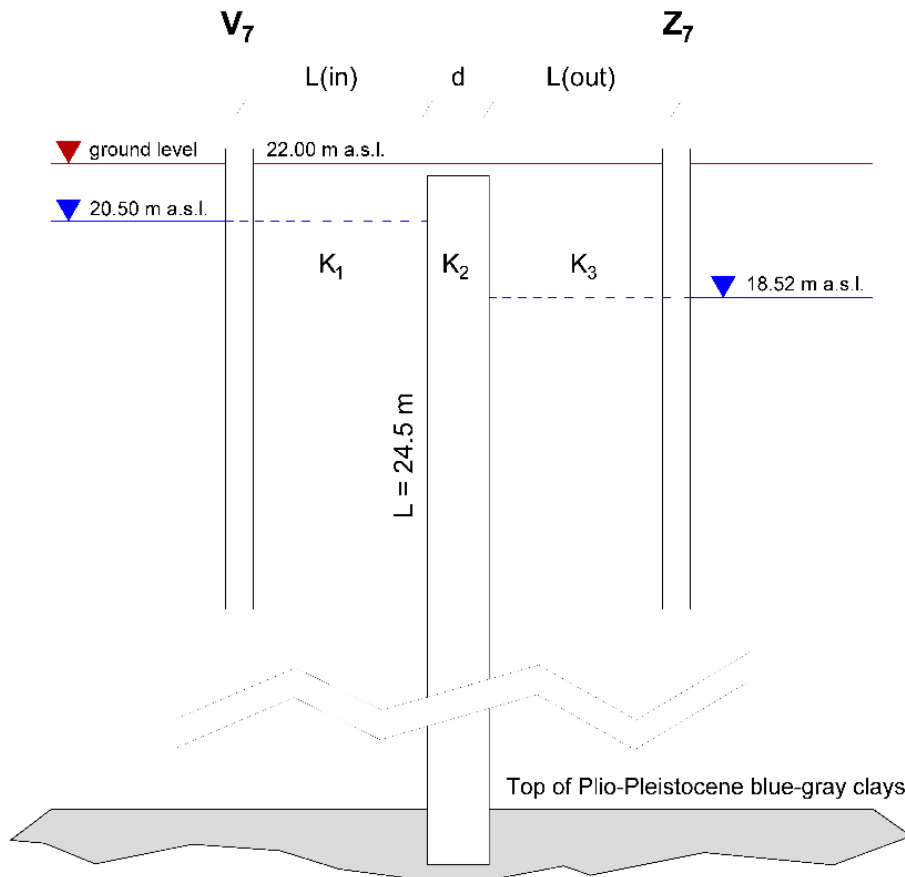


Figura 3- Senza scala. Schema della posizione dei piezometri V₇, Z₇ e del diaframma cemento-bentonite nelle condizioni iniziali t_0 , (assenza di pompaggio). Sono riportati: la distanza $L = 8 \text{ m}$ tra i piezometri; le porzioni di terreno $L_{(in)}$ e $L_{(out)}$ compresi tra i piezometri e il 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 $d=1 \text{ m}$, il coefficiente di permeabilità K_2 di progetto, con valori non superiore a 10^{-9} m/s , e la sua profondità $L=24,5 \text{ m}$. 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 V₇-Z₇ 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 $L = 24,5 \text{ m}$;

- 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 $< 2 \mu$ molto elevata (Galeotti et al., 1990).

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

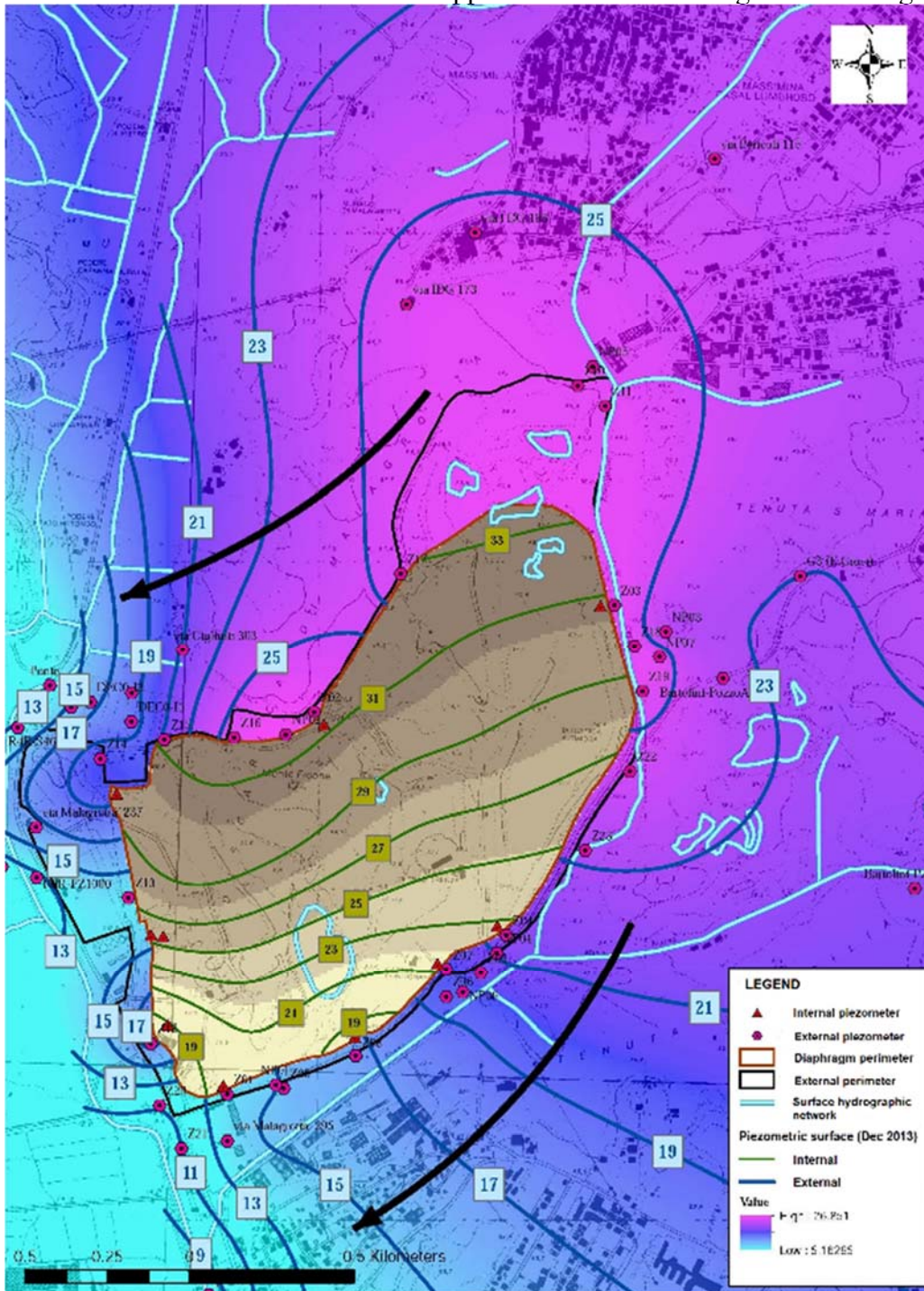


Figura 4- Condizioni idrauliche presente nell'area di Malagrotta. Posizione del Diaframma plastico e andamento delle isopieze "interne" ed "esterne" al diaframma. Posizione dei piezometri interni ed esterni utilizzate per il monitoraggio. (From-Piano di Caratterizzazione, area della discarica- modificato).

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.

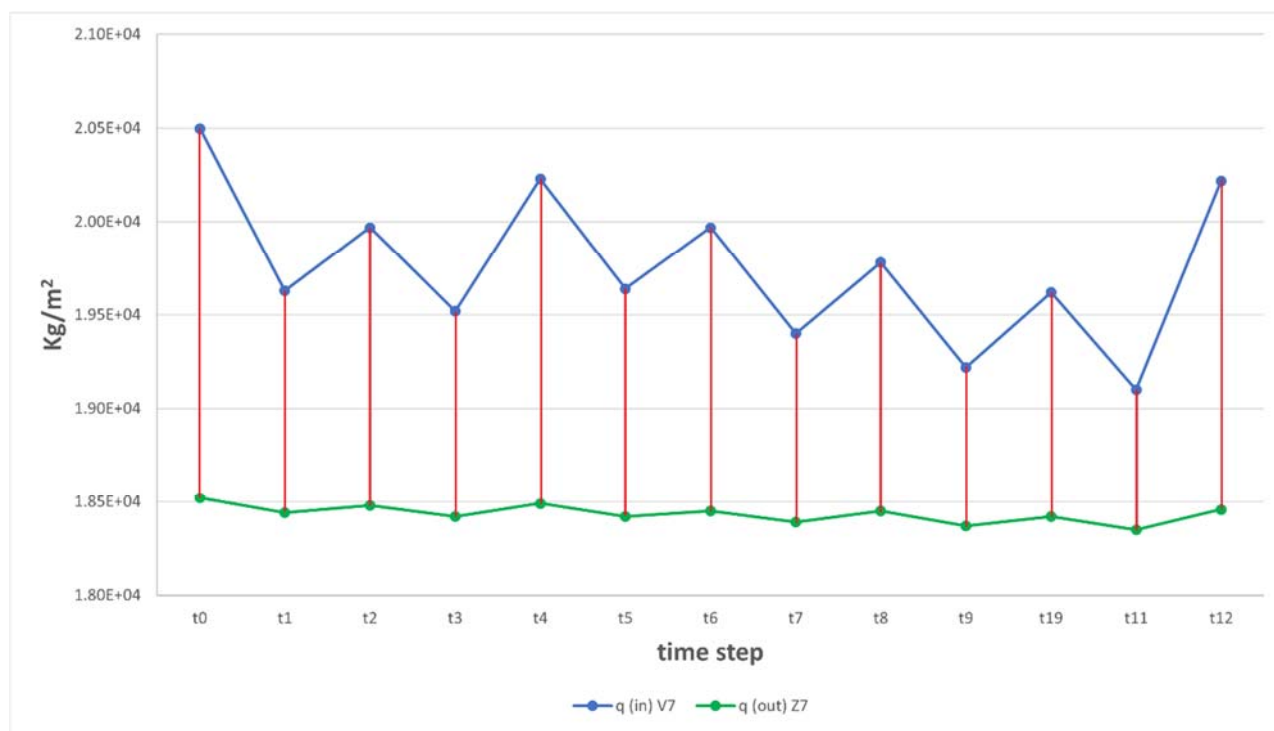


Figura 5 -Test idraulico: andamento del carico piezometrico in V7 ed effetti rilevati in Z7. $T_0=15$ luglio 2020. A partire da T_0 sono presenti n.12 time step (t_1-t_{12}). Sono riportati i carichi idraulici (m asl) rilevati in automatico nel piezometro V7 e gli effetti indotti nel piezometro Z7, ubicato all'esterno del diaframma cemento bentonite. Si può rilevare come il carico piezometrico esterno in Z7 sia costantemente inferiore alla quota rilevata in V7. (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 Z7, (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 Z7, a seguito delle 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 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- Z_7 , 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);
- $i_i=\Delta H/d$ gradiente idraulico, calcolato per ogni time step t_i , con i variabile tra t_0 , e t_{12} .

Si noti che il carico piezometrico 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 $K_1 \cong K_3 \gg \gg K_2$, 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 superficie 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, \dots, t_{12} , sarà $Q=A \cdot k_2 \cdot i_t=A \cdot V$. Ricorrendo ad una *soluzione per assurdo*, imponendo cioè una velocità 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 V₇, 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 V₇-Z₇;

E= modulo di Young del diaframma cemento-bentonite, assunto pari a 1,4 *10¹⁰ Kg/m² (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 m⁴, 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:

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

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

- 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 V₇ e per i vari time step t:

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

- 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 (± m ²)	$\frac{\Delta H(Z_7)}{(\Delta Au/u_x(x=0))}$	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).

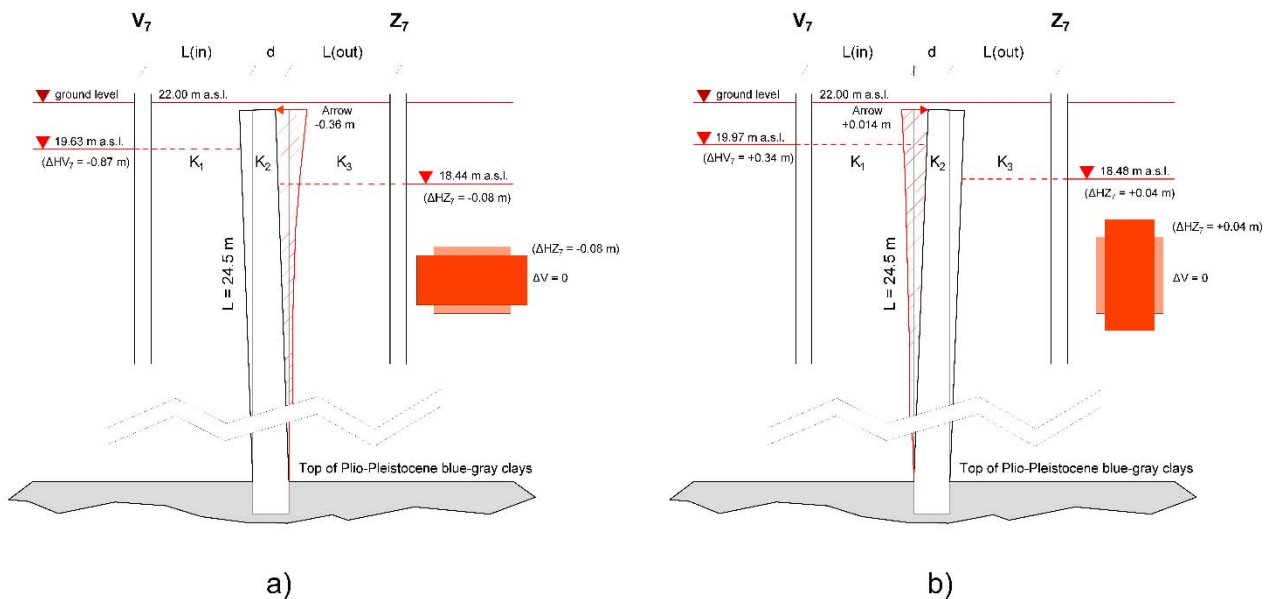


Figura 6 a), 6b) Il legame tra variazione del carico idraulico e i valori della freccia e area della deformata è mostrato dalla linearità rapporto tra $\Delta H(Z_7)/(\Delta A u/u_{\max}(x=0))$. Le figure 6a) e 6b) simulano lo spostamento complessivo del diaframma, che rappresenta la deformazione distribuita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

