

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	14 dicembre 2012	101-120	2013
--------------------	--------------------------------	------------------	---------	------

MARIO NALDI ⁽¹⁾ & CARLO ALESSIO ⁽²⁾

MONITORAGGIO GEOFISICO PER LA PROGETTAZIONE DI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI TERRENI DI FONDAZIONE

Abstract - MARIO NALDI & CARLO ALESSIO - Geophysical monitoring for the design of soil consolidation.

The design of soil consolidation works for foundations requires a precise definition of the geotechnical parameters in the volume of soil subjected to the actions agents (weight of the structures, the applied loads, etc.). Information on the physical properties of soil obtained only with in-situ geotechnical investigations (mono dimensional investigations) do not provide a complete knowledge of the ground volume, which may affect, perhaps significantly, the design of relevant foundational structures with a high risk of differential settlements. To reduce this risk, and increase the level of cognitive geotechnical model reference, may be applied geophysical monitoring systems that measure the physical properties of soils related to geotechnical parameters before and after the consolidation works. This article reports a case study about geophysical investigations for the design of consolidation works of the tank foundations, which underwent severe settlements during the filling phase.

To define the consolidation design, we performed a geophysical monitoring with the SIRT seismic method – a tomographic method which involves direct seismic rays – that has provided the localization of the low-density zones (critical areas). The prediction of the subsidence due to filling of the tanks was obtained with a geotechnical modeling derived from geophysical monitoring, and, subsequently, was then developed the design of the consolidation works with the «compensation grouting» method. After the consolidation works, a second geophysical survey was performed in order to evaluate the improvement produced by the consolidations on the foundation soil.

Key words: Soil parameters - Geotechnical design - Foundations settlements - Geophysical monitoring - SIRT method - Compensation grouting.

⁽¹⁾ Techgea Srl (info@techgea.eu).

⁽²⁾ AK Ingegneria geotecnica Srl (info@A-K.it).

Riassunto - MARIO NALDI & CARLO ALESSIO - Monitoraggio geofisico per la progettazione di interventi di consolidamento di terreni di fondazione.

La progettazione di interventi di consolidamento di terreni di fondazione richiede una definizione precisa dei parametri geotecnici nel volume di terreno sottoposto alle azioni agenti (peso proprio delle strutture, carichi applicati, ecc.). La modellazione geotecnica dei terreni attraverso prove geotecniche dirette presenta degli oggettivi limiti per la valutazione delle variazioni spaziali delle proprietà dei terreni stessi, che possono condizionare, anche significativamente, la progettazione di strutture fondazionali rilevanti, con elevato rischio di sviluppo di deformazioni differenziali. Per ridurre tale rischio, e incrementare il livello conoscitivo del modello geotecnico di riferimento, si possono applicare sistemi di monitoraggio geofisico che misurano le proprietà fisiche dei terreni correlate ai parametri geotecnici prima e dopo l'intervento di consolidamento. Nel presente articolo si riporta un caso di studio riferito alle indagini per il dimensionamento di un intervento di consolidamento finalizzato alla compensazione dei cedimenti indotti sui basamenti di serbatoi durante la fase di riempimento.

Per definire il progetto di consolidamento, è stato eseguito un monitoraggio geofisico con un metodo sismico in trasparenza (metodo SIRT) che ha consentito di individuare le zone a minor grado di addensamento (zone di criticità). Sulla base del modello geotecnico derivante dal monitoraggio geofisico è stata quindi effettuata una previsione dei cedimenti dovuti al riempimento dei serbatoi ed è stato quindi sviluppato il progetto degli interventi di consolidamento con la tecnica del «compensation grouting». Al termine degli interventi sono stati valutati, con una seconda indagine geofisica, gli effetti di miglioramento permanente prodotti dai consolidamenti sul terreno di fondazione.

Parole chiave: Progettazione geotecnica - Monitoraggio geofisico - Metodo SIRT - Iniezioni di compensazione.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della realizzazione di un impianto di produzione di biocarburante è prevista la realizzazione di un elevato numero di serbatoi di diametro compreso tra 5 e 16 m ed altezze variabili da 5 a 12 m.

I serbatoi di acciaio destinati ad accogliere i fluidi impiegati nel processo di produzione del biocarburante sono installati su basamenti in calcestruzzo di forma anulare, al cui interno è stato messo in opera del materiale di riempimento compattato. Il fondo del serbatoio, a seconda dei casi, può essere troncoconico o piano.

Durante il riempimento del primo serbatoio per l'esecuzione del cosiddetto «water test» si è verificato un cedimento del fondo con conseguente danneggiamento della struttura metallica.

Nelle Figg. 1 e 2 è riportato il profilo di deformazione risultante dal rilievo topografico eseguito prima e dopo il riempimento del serbatoio e la fotografia del piano di appoggio del serbatoio visibilmente deformato.

A seguito di questo evento è stata avviata una campagna di indagini geofisiche con la tecnica della rifrazione e della tomografia sismica assiale volte a valu-



Fig. 1 - Fotografia del piano di appoggio del serbatoio TK 3104 dopo la rimozione del serbatoio danneggiato.

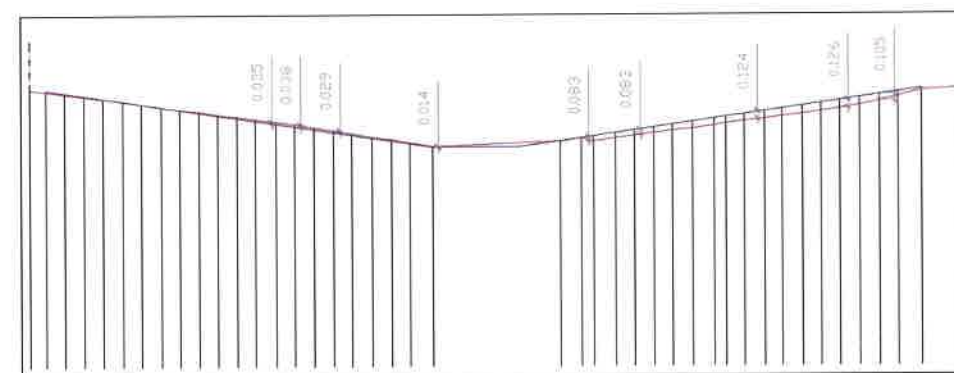


Fig. 2 - Sezione esemplificativa del cedimento subito dal piano di appoggio del serbatoio TK 3104 (valori in metri).

tare le caratteristiche del terreno di riempimento impiegato in tutti i serbatoi accessibili.

Le valutazioni geotecniche effettuate a valle dell'acquisizione delle risultanze delle indagini geofisiche, tarate sui cedimenti registrati in corrispondenza del serbatoio TK 3104, hanno evidenziato la possibilità che i moduli elastici del materiale di riempimento dei basamenti risultassero inferiori alle prescrizioni progettuali, con conseguente rischio di occorrenza di cedimenti incompatibili con le strutture dei serbatoi.

Al fine di mitigare questo rischio il Committente ha pertanto ritenuto opportuno procedere con l'esecuzione di un intervento di compensazione dei cedimenti che avrebbero potuto svilupparsi durante il riempimento dei serbatoi, adottando la tecnica nota come «compensation grouting» ovvero iniezioni cementizie realizzate contestualmente al riempimento dei serbatoi, con volumi e pressioni controllate ed in presenza di un monitoraggio deformativo di precisione. Questa tecnica è stata selezionata, oltre che per la comprovata efficacia in situazioni similari, anche per il fatto che la sua esecuzione non interferiva in alcun modo con

le operazioni rigidamente pianificate del montaggio dei serbatoi e di altri attrezzaggi impiantistici limitrofi.

INDAGINI GEOFISICHE

Nell'ambito delle indagini geofisiche realizzate per la valutazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di riempimento dei diversi serbatoi dell'impianto sono state applicate due tecniche distinte.

La prima, applicata sistematicamente a tutti i casi esaminati, consiste nella tomografia sismica trasversale, anche denominata «sismica in trasparenza».

Questa tecnica è stata applicata a tutti i basamenti, in particolare per i casi in cui il serbatoio in acciaio era già stato montato e la superficie del basamento non risultava più accessibile.

Questa tecnica ha richiesto la collocazione della strumentazione di misura e di energizzazione sull'anello di fondazione in calcestruzzo e la sua applicazione è quindi risultata indipendente dallo stato di montaggio dei serbatoi.

Per i soli basamenti sui quali non risultavano ancora montati i serbatoi, si è inoltre proceduto all'esecuzione di sezioni sismiche a rifrazione di tipo tradizionale.

Entrambe le metodologie di indagine hanno fornito una mappatura orizzontale e, nei casi di applicazione della sismica a rifrazione, anche verticale della velocità delle onde di compressione dei terreni, direttamente correlabile alla densità in situ del terreno e, attraverso alcuni ulteriori passaggi, alla porosità del terreno.

Ai fini della valutazione delle proprietà dei terreni di riempimento in situ si è proceduto in prima istanza al calcolo della densità del terreno, utilizzando la relazione di Gardner riportata di seguito:

$$\rho = \alpha \cdot V_p^\beta$$

dove ρ è la densità del materiale attraversato, V_p è la velocità delle onde di compressione, α e β sono delle costanti empiriche derivate dalla geologia, assunte rispettivamente pari a 0.31 e 0.25.

Sulla base della densità così determinata, ed assumendo un valore di densità secca del terreno pari a 25 kN/m³ (stimata in base all'osservazione visiva del terreno), si è quindi proceduto alla determinazione dell'indice dei vuoti e della porosità del terreno in situ, secondo le note formule.

3. ANALISI A RITROSO PER LA DEFINIZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Allo scopo di correlare i valori di velocità delle onde di compressione ottenute dalle indagini geofisiche alla rigidità del materiale di riempimento del basamento del serbatoio, è stata eseguita una modellazione tridimensionale agli elementi finiti. L'analisi a ritroso è stata condotta essendo note le condizioni di carico presenti durante le prove di riempimento del serbatoio (2/3 dell'altezza totale, pari a 14 m, riempimento di acqua) e avendo a disposizione i cedimenti verticali misurati sulla superficie del riempimento dopo la prova.

Il modello numerico, illustrato in Fig. 3, è costituito da tre parti principali: il terreno di sottofondo, la struttura di contenimento in calcestruzzo (basamento del serbatoio) e il materiale di riempimento.

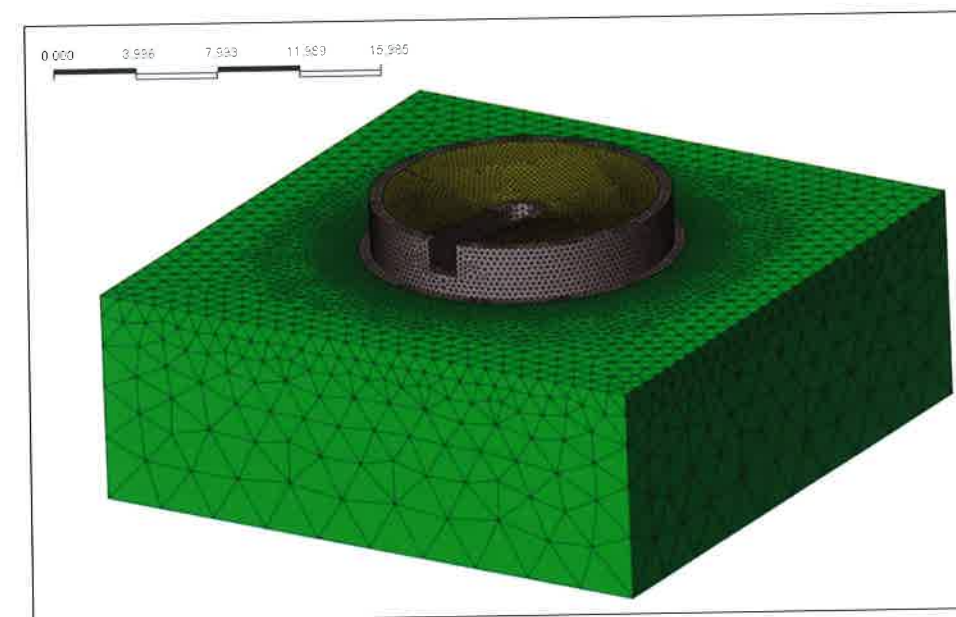


Fig. 3 - Vista assonometrica del modello numerico con la mesh utilizzata.

L'analisi è stata condotta in due fasi: nella prima fase è stato ipotizzato uno stato tensionale in sito di tipo gravitativo con coefficiente di spinta a riposo K_0 , determinato in funzione dell'angolo di attrito; nella seconda fase è stata applicata alla superficie del riempimento una pressione uniformemente distribuita pari all'altezza di acqua presente nel serbatoio al momento del collaudo.

Utilizzando l'andamento delle velocità delle onde di compressione nel materiale di riempimento è stato possibile definire un gradiente di rigidità in fun-

zione della profondità, per i sei strati modellati. Tali strati sono stati supposti omogenei e le velocità delle onde di compressione corrispondenti sono state ottenute dall'elaborazione delle prove geofisiche nelle tre sezioni trasversali disponibili. I valori sono stati ricavati così come indicato nell'esempio della sezione nella Fig. 4. Per ogni strato è stata successivamente eseguita la media aritmetica in modo da omogeneizzare i valori ottenuti.

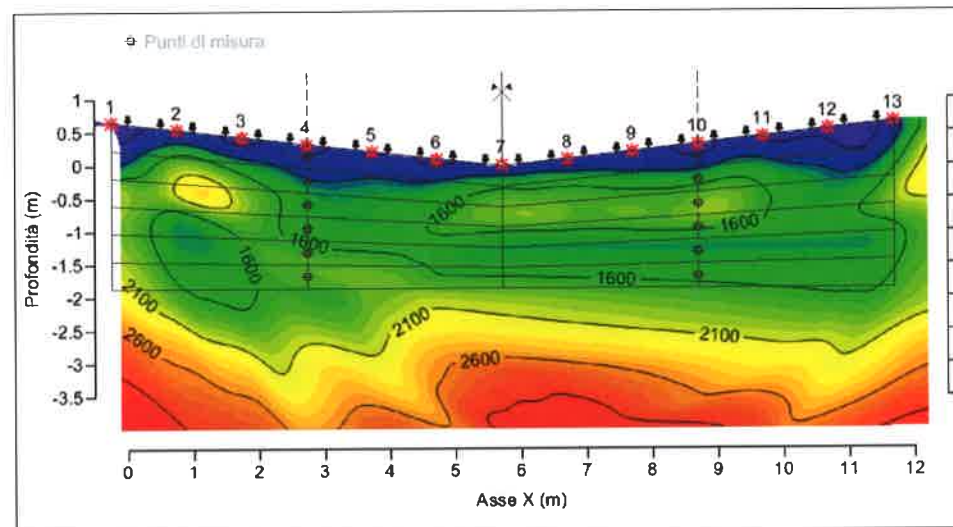


Fig. 4 - Punti di misura delle velocità di compressione.

Il modulo elastico in condizioni dinamiche è legato alla velocità delle onde di compressione secondo la seguente espressione derivata dalla teoria dell'elasticità:

$$E_{din} = 2 \cdot \rho \cdot V_p \cdot \sqrt{\frac{1 - 2 \cdot \nu_{din}}{2 - 2 \cdot \nu_{din}}} \cdot (1 + 2 \cdot \nu_{din})$$

Con E_{din} modulo elastico dinamico, ρ densità del materiale attraversato e ν_{din} modulo di Poisson dinamico, assunto pari a 0.49.

Utilizzando i valori di E_{din} ottenuti mediante l'espressione precedente si è proceduto mediante varie analisi numeriche alla definizione del coefficiente η che esprime il rapporto tra il modulo elastico dinamico E_{din} e il modulo elastico statico E_{stat} , in modo da ottenere quest'ultimo per ogni strato.

Nella Fig. 5 vengono riportati i diagrammi di correlazione tra le velocità delle onde di compressione e la densità ρ , l'indice dei vuoti e e i moduli elastici dinamici per la gamma di valori ottenuti dalle prove geofisiche.

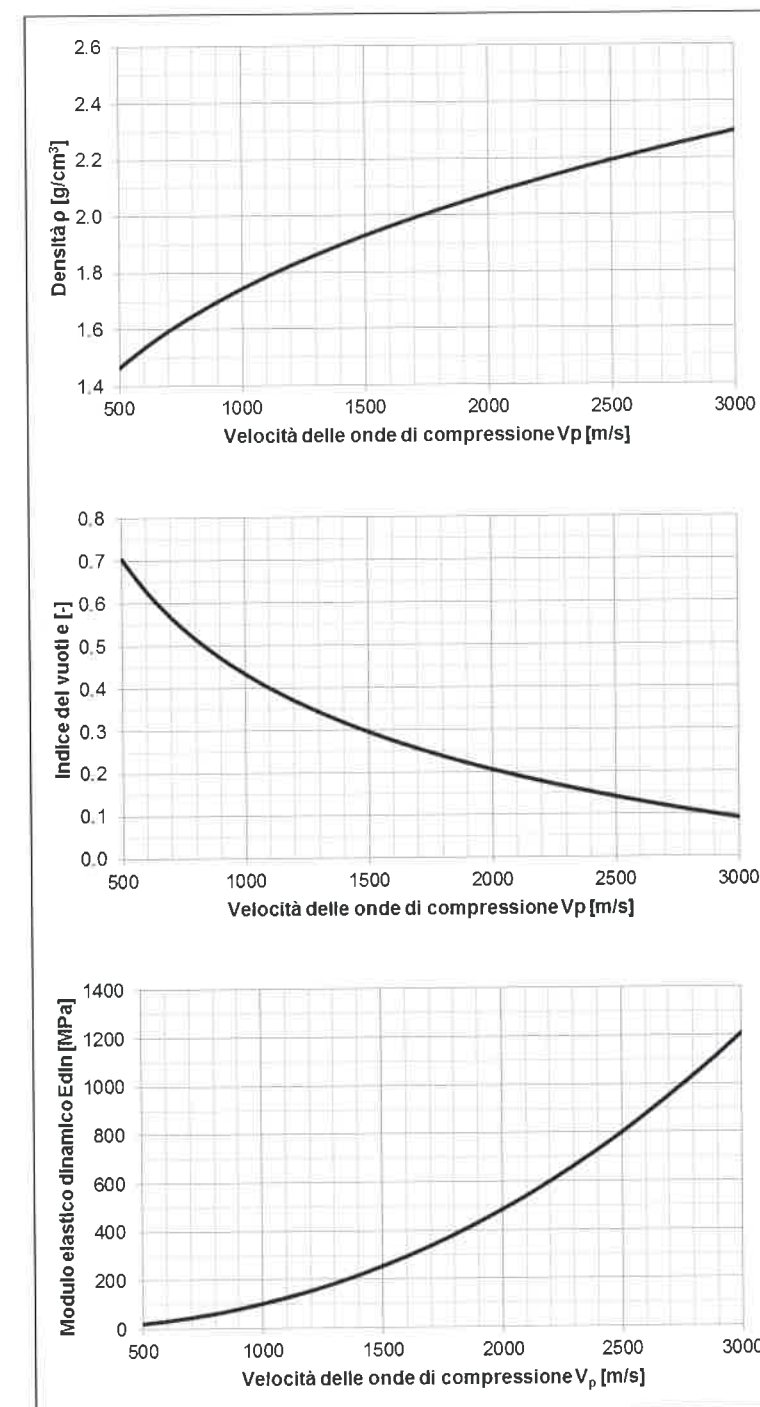


Fig. 5 - Diagrammi di correlazione tra velocità delle onde di compressione, densità, indice dei vuoti e modulo elastico dinamico (per $\nu_{din} = 0.49$) nella gamma di valori dell'analisi.

Il gradiente dei moduli dinamici con la profondità, riferito al piano di posa del serbatoio ed alla mezzeria di ogni strato è riportato nella Fig. 6.

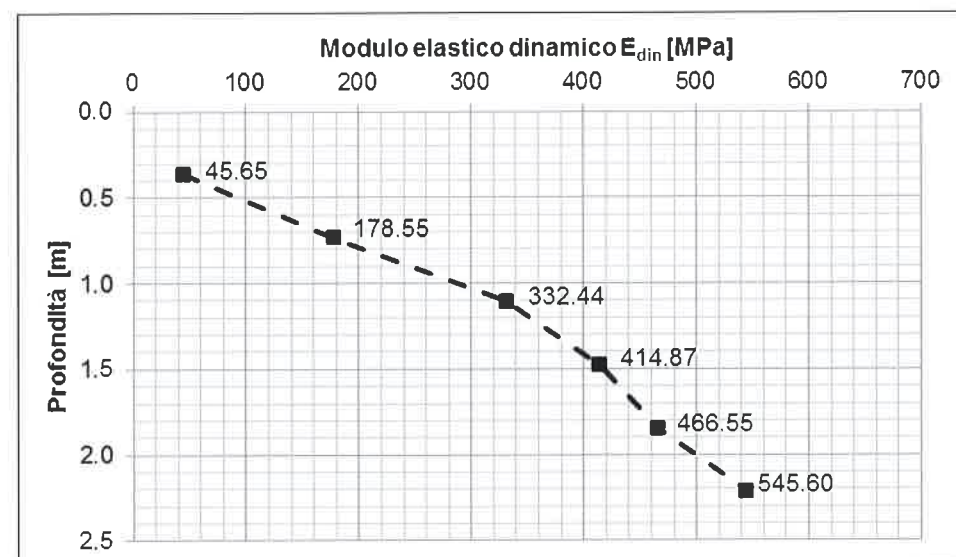


Fig. 6 - Gradiente del modulo elastico dinamico con la profondità riferita al piano di posa del serbatoio per $v_{din} = 0.49$.

Dalle analisi a ritroso è stato possibile definire il rapporto η che rappresenta il rapporto tra il modulo elastico dinamico E_{din} e il modulo elastico statico E_{stat} , essendo nota la condizione di carico, la variazione del modulo dinamico con la profondità (per ogni strato) e fissando come obiettivo i cedimenti misurati dopo la prova di collaudo.

Il gradiente di modulo elastico statico con la profondità ottenuto è riportato nella Fig. 7, per un rapporto η pari a 110.60.

4. PREVISIONI DI CEDIMENTO A PARTIRE DALLE RISULTANZE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

La sezione tomografica effettuata alla profondità di 1 m dalla sommità del basamento evidenzia un buon grado di addensamento del terreno, allineato con i risultati di V_p più elevati registrati nel complesso delle indagini.

La densità e, di conseguenza, la rigidità si riduce di oltre il 50% nelle zone limitrofe all'impronta del cunicolo, dove, verosimilmente, la compattazione è risultata più difficoltosa.

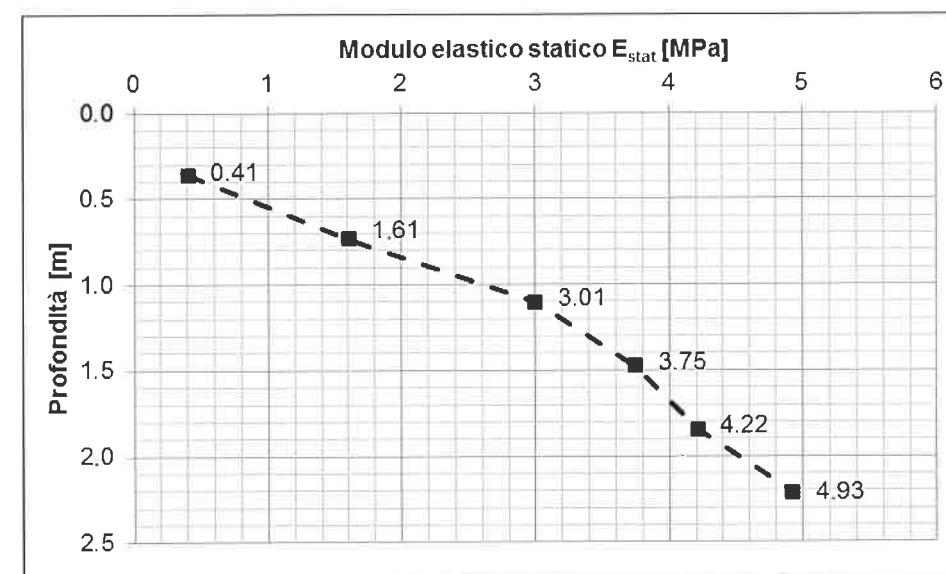


Fig. 7 - Gradiente del modulo elastico statico con la profondità riferita al piano di posa del serbatoio per $\eta = 110.60$.

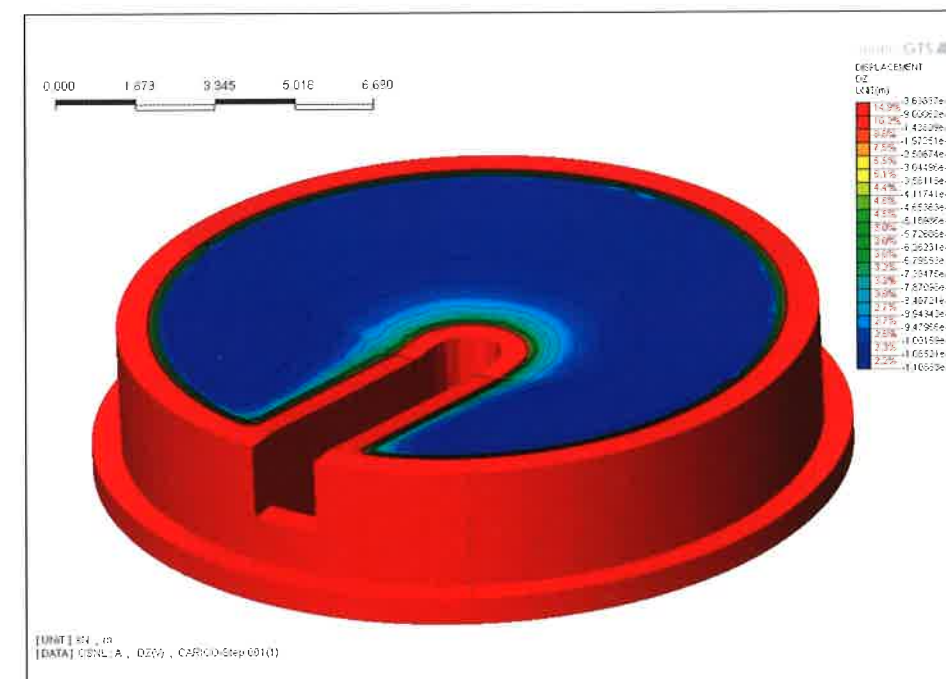


Fig. 8 - Distribuzione dei cedimenti verticali ottenuti dall'analisi a ritroso in vista assonometrica.

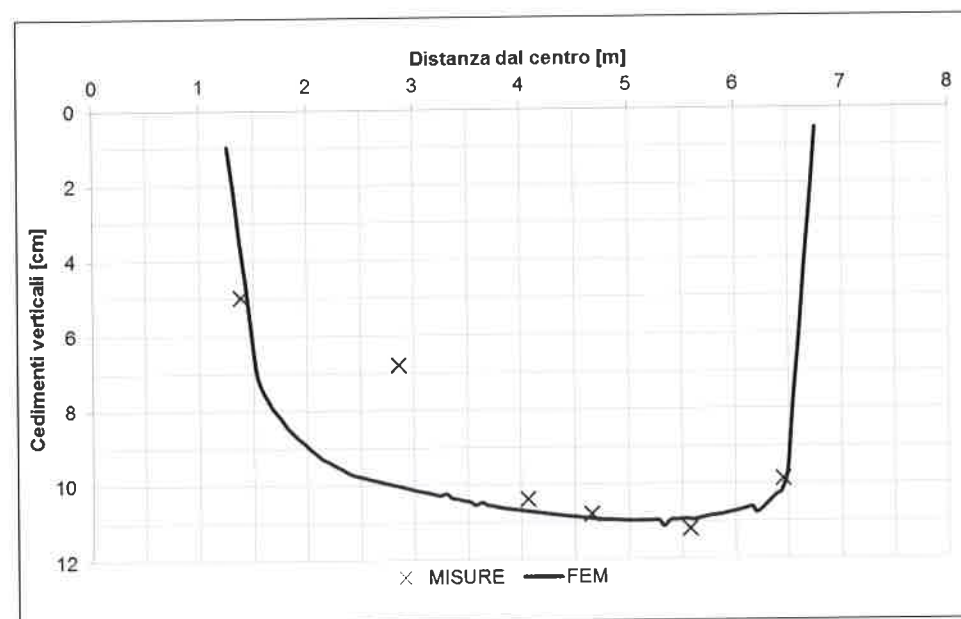


Fig. 9 - Confronto tra i cedimenti verticali misurati e ottenuti dall'analisi a ritroso per una sezione di controllo.

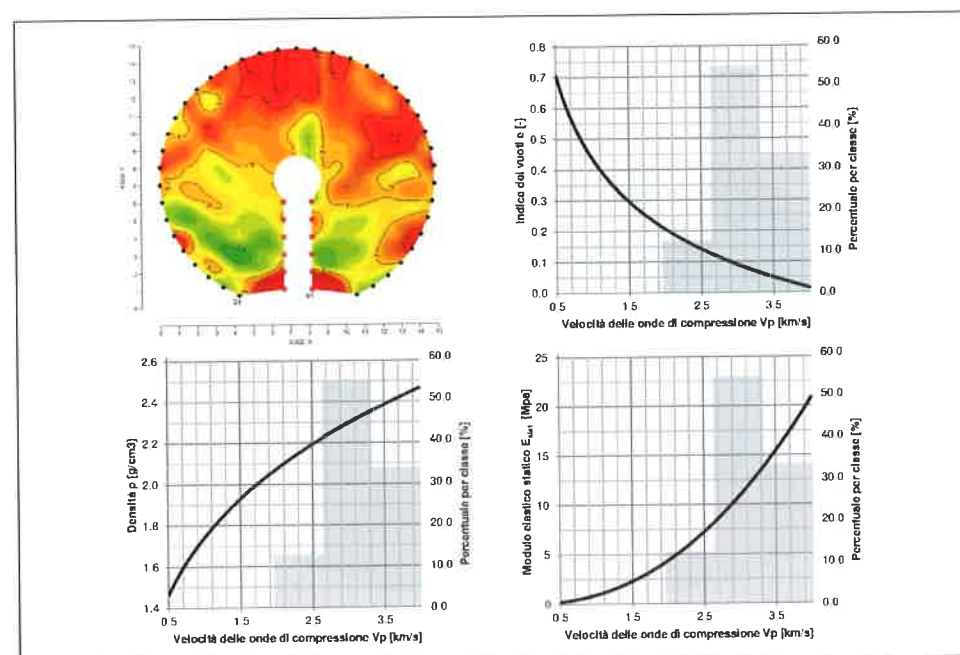


Fig. 10 - Elaborazione dei risultati dell'indagine sismica per il serbatoio 1.

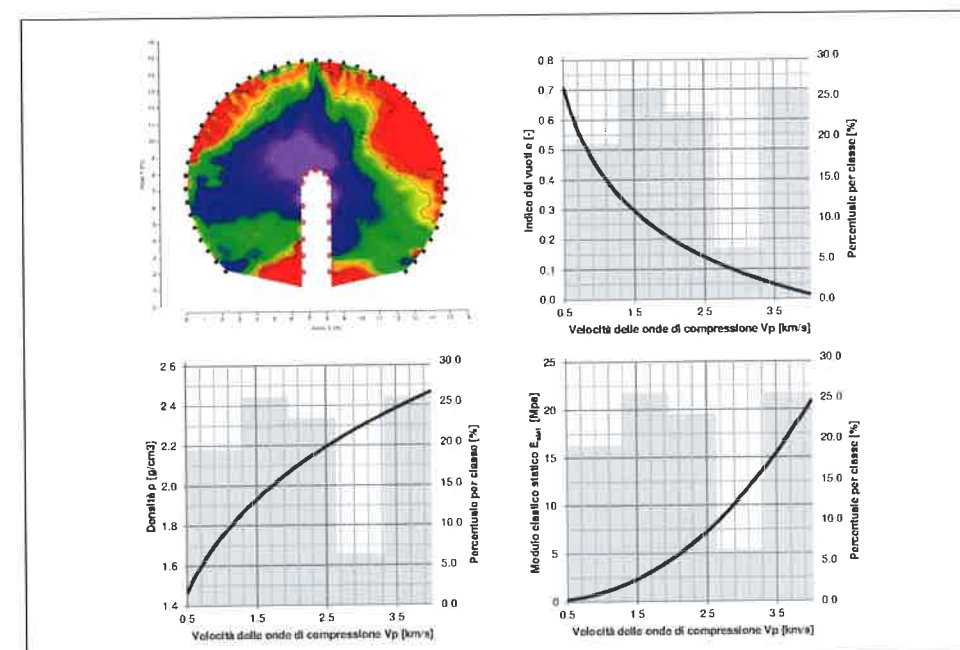


Fig. 11 - Elaborazione dei risultati dell'indagine sismica per il serbatoio 4.

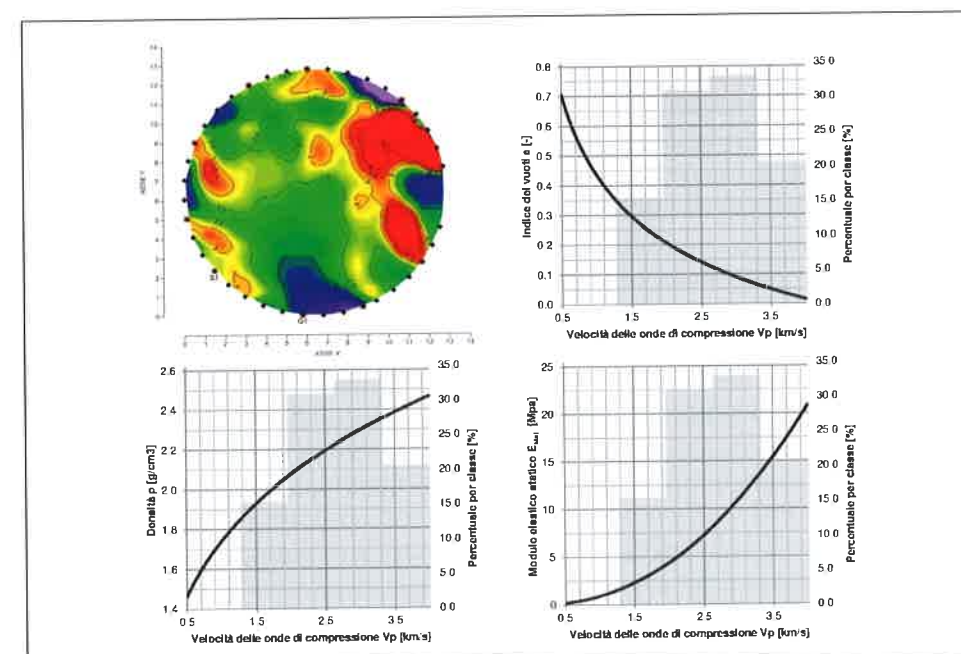


Fig. 12 - Elaborazione dei risultati dell'indagine sismica per il serbatoio 1B.

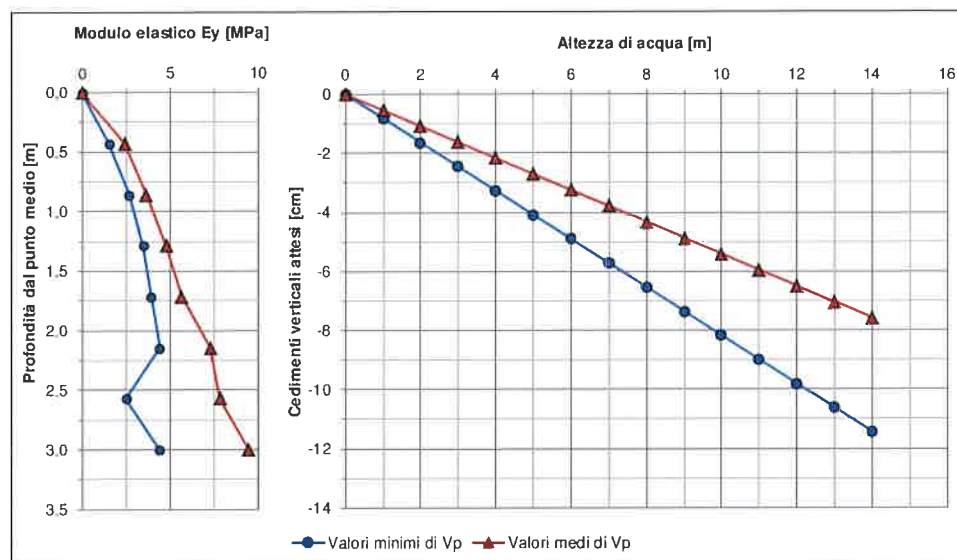


Fig. 13 - Confronto tra i cedimenti attesi nei due casi analizzati in funzione del carico d'acqua e andamento con la profondità dei moduli elastici considerati.

5. CRITERI METODOLOGICI GENERALI DEL «COMPENSATION GROUTING»

La tecnica di trattamento mediante iniezioni di compensazione (compensation grouting) consente di contenere e talora annullare i cedimenti indotti su di una struttura da un'azione esterna (applicazione di carichi, subsidenze dovute allo scavo di una galleria al di sotto delle fondazioni, ecc.).

In concomitanza con lo sviluppo dei cedimenti sulla struttura, costantemente monitorati attraverso sofisticate strumentazioni, viene effettuata in tempo reale una iniezione ripetuta, selettiva e a volume controllato di miscele studiate opportunamente, finalizzata a compensare volumetricamente il cedimento indotto dall'azione esterna sino al limite massimo ammissibile.

La verifica dei cedimenti viene effettuata mediante un sofisticato sistema di monitoraggio che consente in tempo reale di visualizzare la situazione deformativa in atto e decidere quindi se, quando e in quali posizioni intervenire con l'iniezione.

L'iniezione avviene per mezzo di tubi valvolati (tubes a manchettes, TAMs) posizionati al di sotto della struttura soggetta a cedimento.

Si tratta di una tecnica di consolidamento di tipo attivo, che consente cioè di reagire al comportamento deformativo che si sviluppa, modificando in tempo reale le strategie di intervento sulla base del principio osservazionale.

La tecnica di iniezione prevede il «soil fracturing» del riempimento mediante l'iniezione a pressione di miscele con elevato contenuto di solidi in sospensione (legante e filler), che producono rotture localizzate del terreno (claquage controllato), formando all'interno del terreno «lame» di miscela cementizia.

Le fasi operative che compongono i trattamenti di compensation grouting sono le seguenti:

- installazione del sistema di monitoraggio;
- perforazione ed installazione di tubi valvolati con formazione della guaina cementizia;
- iniezione di preintasamento o «conditioning» del riempimento, realizzata mediante iniezioni di tipo ripetute e selettive, valvola per valvola, finalizzate all'intasamento del terreno fino a portarlo alla condizione di saturazione dei vuoti ottimale per generare un rapido effetto di sollevamento nella fase di iniezione successiva;
- iniezione di compensazione, realizzata anch'essa mediante iniezioni di tipo ripetute e selettive, valvola per valvola, con le quali vengono indotti sollevamenti del terreno tali da compensare i cedimenti che si generano per effetto dell'azione esterna.

5.1 Esecuzione degli interventi e controllo dei risultati

Il monitoraggio delle deformazioni del fondo del serbatoio durante le fasi di riempimento ed iniezione è stato affidato ad un insieme di tazze livellometriche opportunamente ubicate e collegate mediante un circuito idropneumatico, mediante il quale, con riferimento ad un elemento posizionato in un punto sicuramente fisso sul fondo, si è potuto valutare nel tempo lo spostamento verticale degli altri elementi costituenti il sistema.

Al sistema di monitoraggio interno al serbatoio ne è stato abbinato uno esterno, collocato sul cordolo superiore dell'anello in calcestruzzo del basamento.

Il sistema livellometrico è stato montato su appositi supporti solidarizzati al fondo del serbatoio.

La posizione planimetrica degli strumenti, con la relativa numerazione, è riportata in Fig. 15.

Un esempio dei dati ottenuti dal monitoraggio in continuo è riportato in Fig. 18, differenziati tra punti esterni al serbatoio o posti sull'anello di calcestruzzo e punti interni posizionati sul fondo metallico del serbatoio. Sullo stesso diagramma è stata riportata inoltre l'altezza d'acqua interna al serbatoio in funzione del tempo.

Al fine di valutare il miglioramento delle proprietà del terreno conseguito a seguito del trattamento con iniezioni (miglioramento permanente a lungo termi-



Fig. 14 - Sistema di monitoraggio costituito da tazze livellometriche, installato internamente al serbatoio.

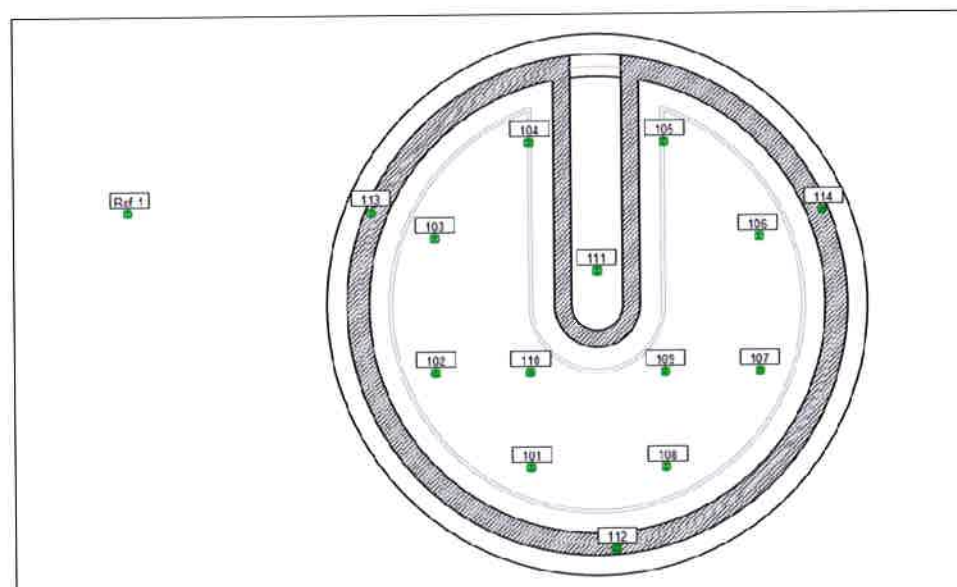


Fig. 15 - Posizione delle tazze livellometriche installate per un serbatoio.

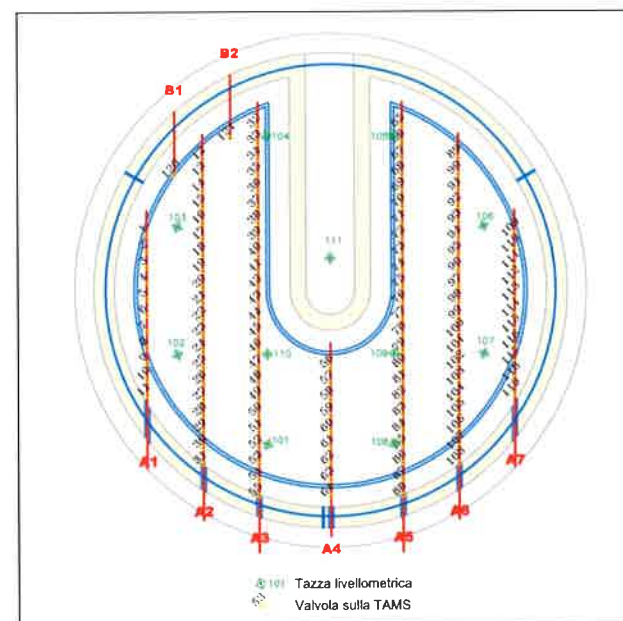


Fig. 16 - Posizione delle valvole di iniezione e delle tazze livellometriche analizzate.



Fig. 17 - Esecuzione delle perforazioni per la realizzazione delle iniezioni di compensazione.

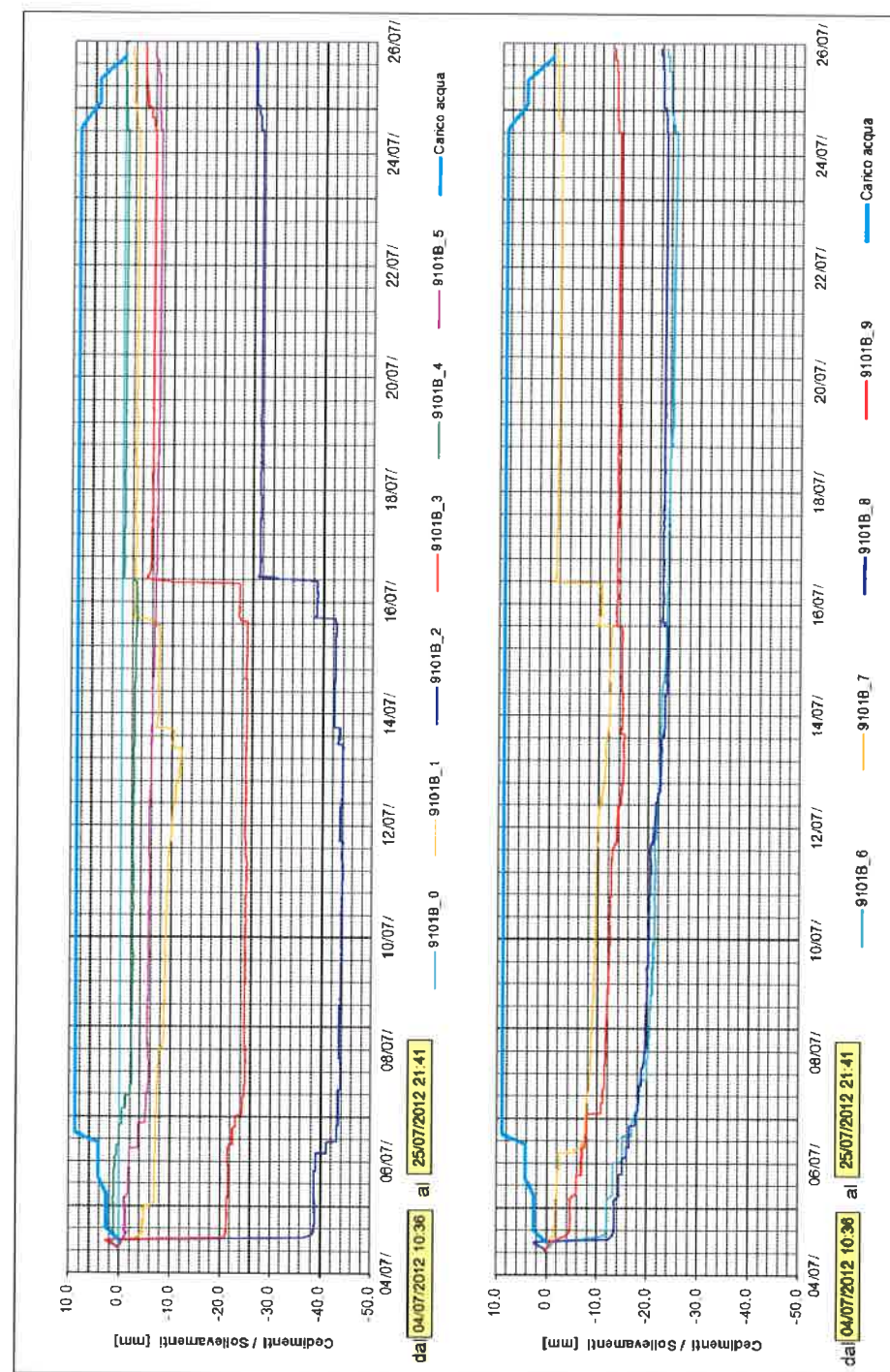


Fig. 18 - Andamento dei cedimenti nel tempo ottenuti dal monitoraggio in continuo mediante tazze livellometriche e riempimento del serbatoio.

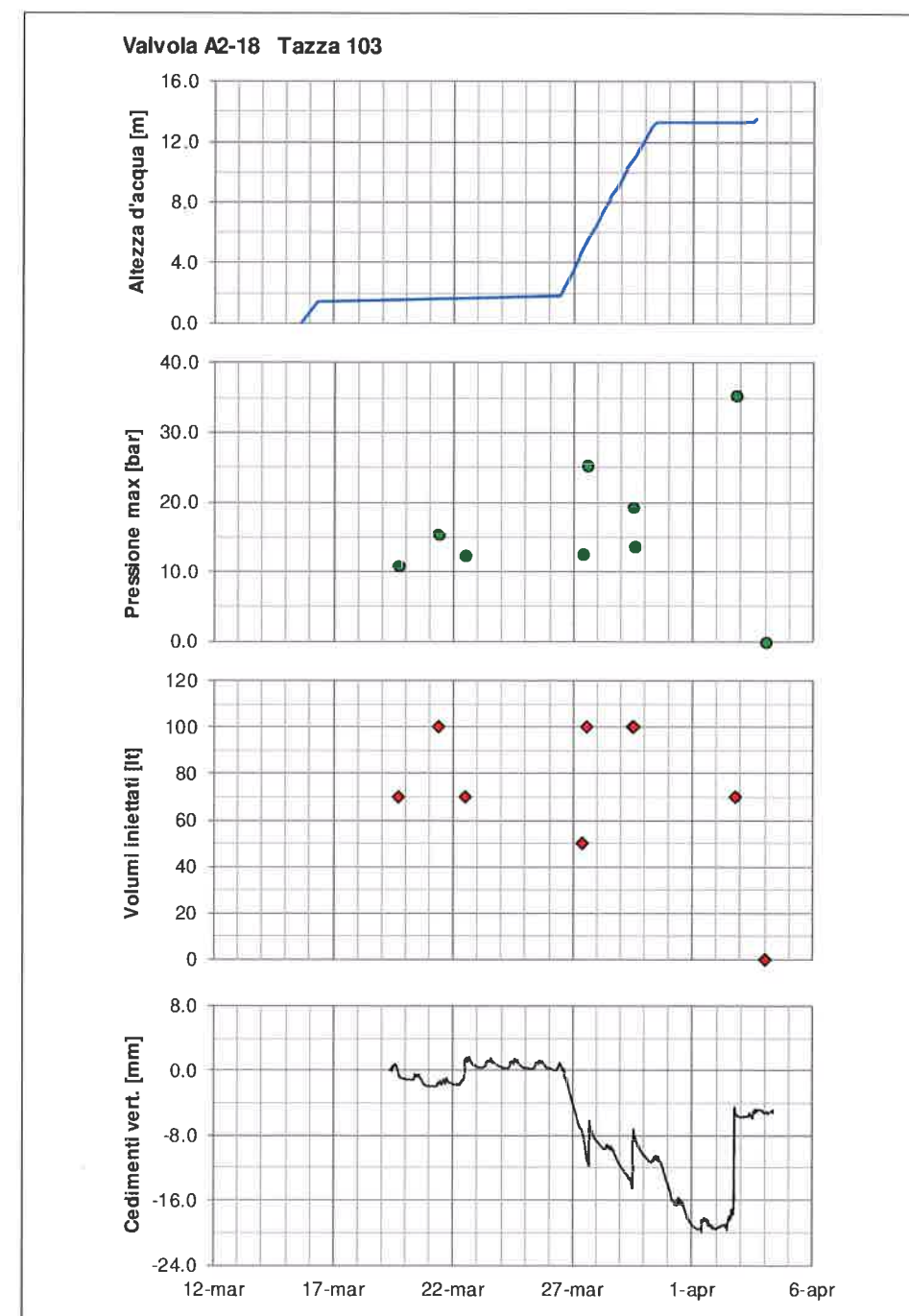


Fig. 19 - Dati ottenuti per una valvola di iniezione.

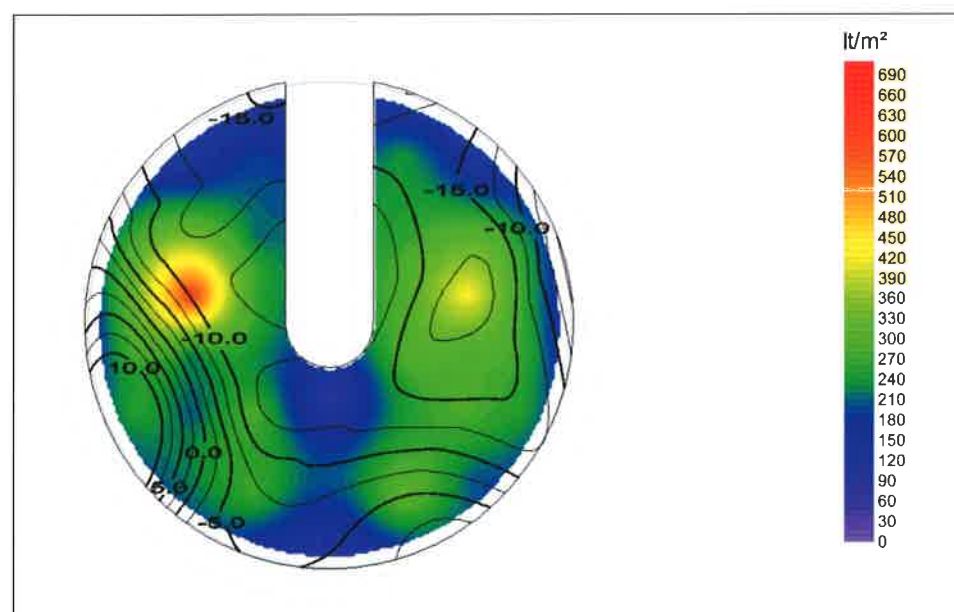


Fig. 20 - Volumi iniettati e cedimenti verticali per altezza d'acqua pari a 11.26 m (isolinee di cedimento in mm, negativi diretti verso il basso).

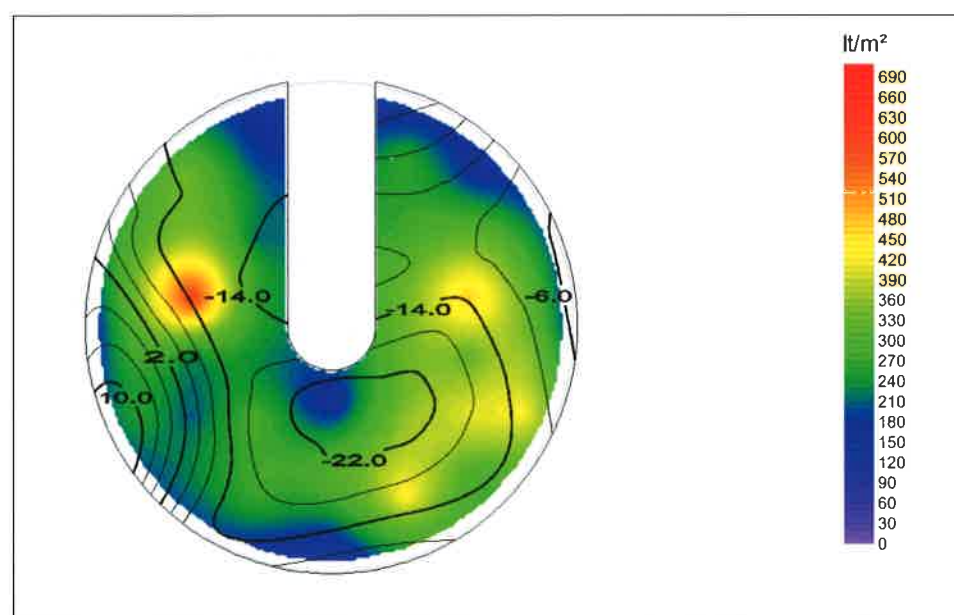


Fig. 21 - Volumi iniettati e cedimenti verticali per altezza d'acqua pari a 13.50 m (isolinee di cedimento in mm, negativi diretti verso il basso).

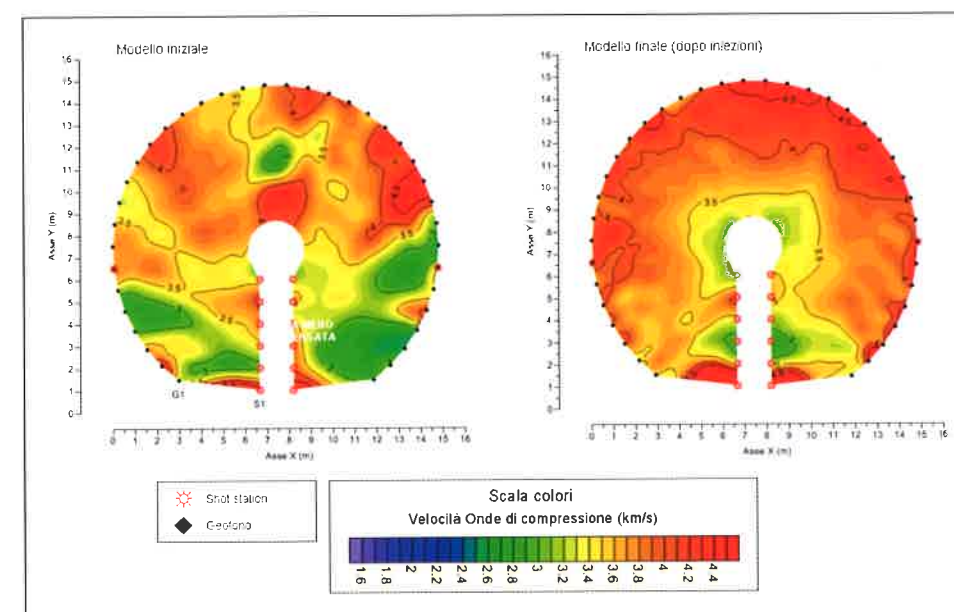


Fig. 22 - Raffronto tra velocità delle onde sismiche rilevate prima e dopo l'intervento di compensation grouting per un serbatoio.

ne) è stata effettuata un'indagine geofisica con le medesime caratteristiche di quella eseguita prima del trattamento di compensazione (Figura 22).

La nuova indagine effettuata, perfettamente sovrapponibile a quella precedente in virtù dell'utilizzo del medesimo schema di energizzazione e misura, ha evidenziato un importante miglioramento delle caratteristiche del riempimento, in termini di omogeneizzazione della velocità delle onde sismiche, con incremento generalizzato in tutti i settori del riempimento (compreso tra il 25 ed il 35% dei valori iniziali).

6. CONCLUSIONI

I risultati del case history descritto hanno evidenziato come le indagini geofisiche per immagini (geophysical imaging) possano costituire un efficiente metodo di verifica e monitoraggio di modelli geotecnici.

Per correlazione con la diagnostica strumentale utilizzata in medicina, la «scansione» geofisica di un mezzo consente di individuare con precisione i punti di «criticità» e di intervenire in modo mirato in tali zone.

Nel caso in esame, si trattava di valutare le cause dei cedimenti indotti sui basamenti di alcuni serbatoi durante la fase di riempimento.

Per definire il progetto di consolidamento, è stato eseguito un monitoraggio geofisico con un metodo sismico in trasparenza (metodo SIRT) che ha consentito di individuare le zone a minor grado di addensamento (zone di criticità). Sulla base del modello geotecnico derivante dal monitoraggio geofisico è quindi stata effettuata una previsione dei cedimenti dovuti al riempimento dei serbatoi ed è stato quindi sviluppato il progetto degli interventi di consolidamento con la tecnica del «compensation grouting». Al termine degli interventi sono stati valutati, con una seconda indagine geofisica, gli effetti di miglioramento permanente prodotti dai consolidamenti sul terreno di fondazione.

BIBLIOGRAFIA

BUTCHER A.P. & POWELL J.J.M., 1997 - Determining the modulus of the ground from in-situ geophysical testing. Proceedings, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Vol. 1, pp. 439-452.

GILBERT P., 1972 - Iterative methods for the three dimensional reconstruction of an object from projections. *J. theor. Bid.*, 36, 105117.