



**MCR - Workshop di Geofisica, Rovereto 14 dicembre 2012**

**Mario Naldi – Techgea Srl; Carlo Alessio – A&K Srl**

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

## Premessa

Per un **impianto di produzione di biocarburante** è stata prevista la realizzazione di un elevato numero di **serbatoi in acciaio** di diametro compreso tra **5 e 16m** ed altezze variabili da **5 a 12m**.

I serbatoi di acciaio sono destinati ad accogliere i fluidi impiegati nel processo di produzione del biocarburante e sono installati su basamenti in calcestruzzo di forma anulare, al cui interno è stato messo in opera del materiale di riempimento compattato.

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.



# Scelta del metodo di indagine geofisica

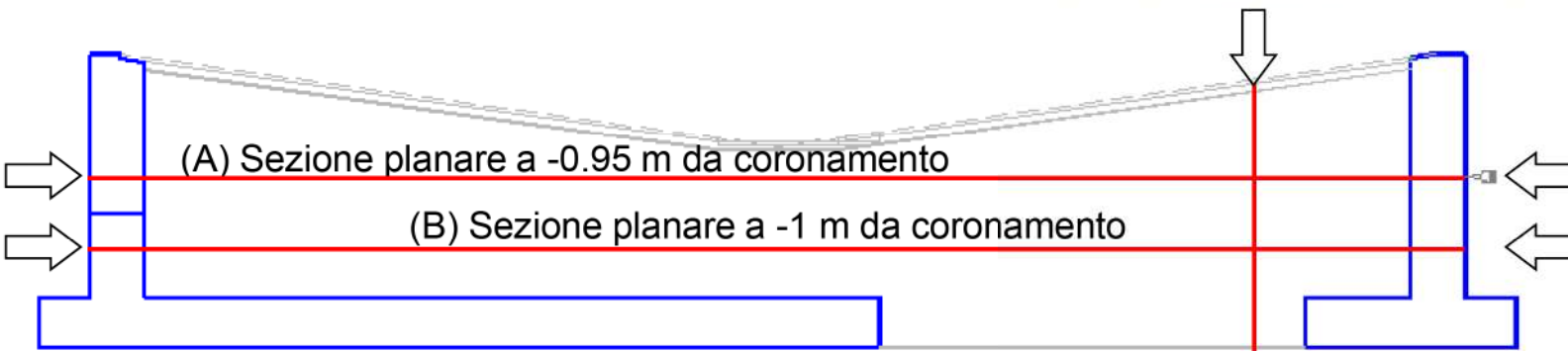
A seguito del dissesto (che ha determinato forti deformazioni) è stato definito un piano di indagini geofisiche volte a valutare le **caratteristiche del terreno di riempimento impiegato in tutti i serbatoi accessibili.**

La scelta del metodo è ricaduta sulla tecnica di tomografia sismica per tempi di percorso (Algoritmo di elaborazione SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) integrata con la tecnica sismica tomografica a rifrazione.

Metodo sismico a rifrazione



Metodo sismico in trasparenza



# Metodi di indagine: tomografia sismica per tempi di percorso

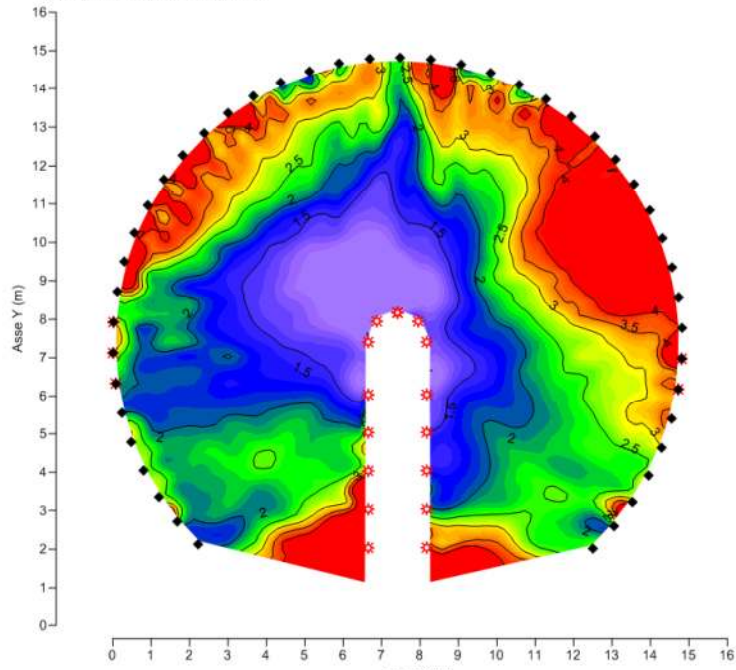
## Algoritmo di elaborazione SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique

Le indagini sismiche “in trasparenza” ricostruiscono un modello di velocità di onde di compressione o di taglio mediante riconoscimento delle traiettorie dirette (quindi non riflesse o rifratte). Per l’acquisizione dei dati si eseguono specifiche misure con energizzazione su un lato del solaio da investigare (nell’esempio sotto il versante sopra la galleria) e ricezione sul lato opposto sfruttando le onde dirette di primo arrivo (misura in trasparenza). La presenza di differenti litolipi o di zone a diverso grado di addensamento è correlata alle variazioni dei valori di velocità delle onde elastiche e viene generalmente evidenziata da zone a minor velocità delle onde sismiche. Il potere risolutivo della tecnica è legato essenzialmente:

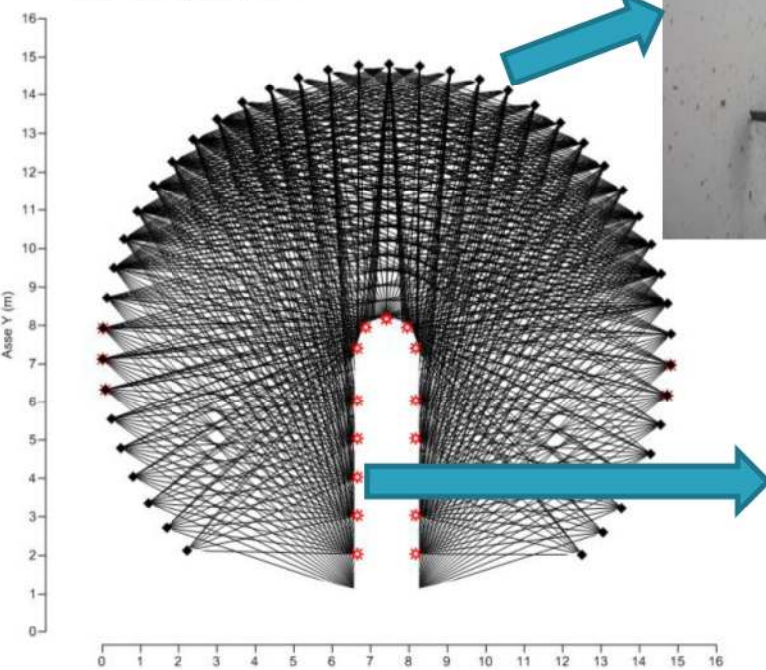
- 1. al numero ed alla distribuzione delle misure attorno alla sezione indagata;
- 2. alla lunghezza d’onda della perturbazione sismica, la quale a sua volta dipende dalla velocità e dalla frequenza principale di oscillazione dell’onde sismiche;

Il codice di calcolo utilizzato per la modellazione tomografica permette di utilizzare nell’algoritmo di inversione tomografica (SIRT) un sistema ricostruzione per mezzo di raggi curvilinei che migliora il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala stabilizzando la soluzione dell’algoritmo d’iterazione

TK 3104 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (KM/S)  
- 0.95 m da coronamento



TRAIETTORIA RAGGI SISMICI  
-0.95 m da coronamento



arrivo



partenza



# Metodi di indagine: tomografia sismica a rifrazione

La rifrazione tomografica è stata sviluppata per risolvere i gradienti di velocità, le anisotropie vertico laterali rapide operando, con elementi finiti o distinti, nella definizione di un modello del terreno il più verosimile e completo.

Le traiettorie dei raggi sismici sono curvilinee il cui andamento è determinato da un processo iterativo di affinamento del sistema tempo di percorrenza-velocità.

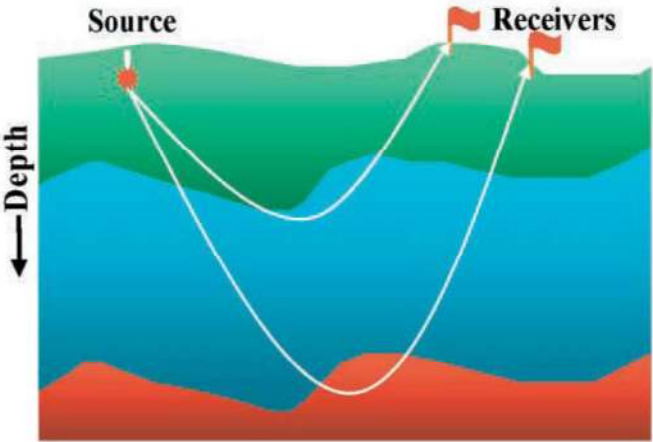
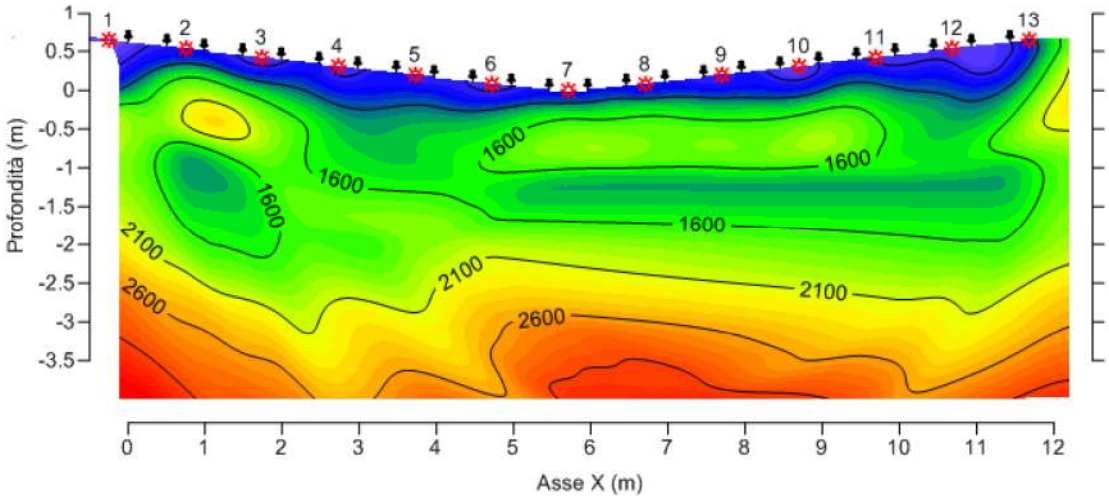
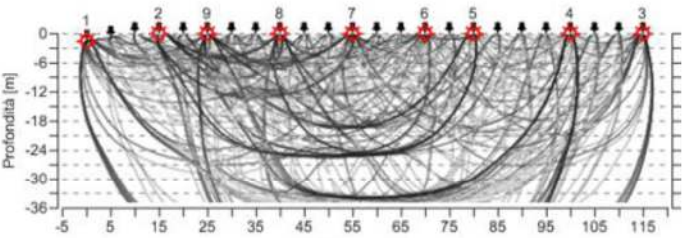
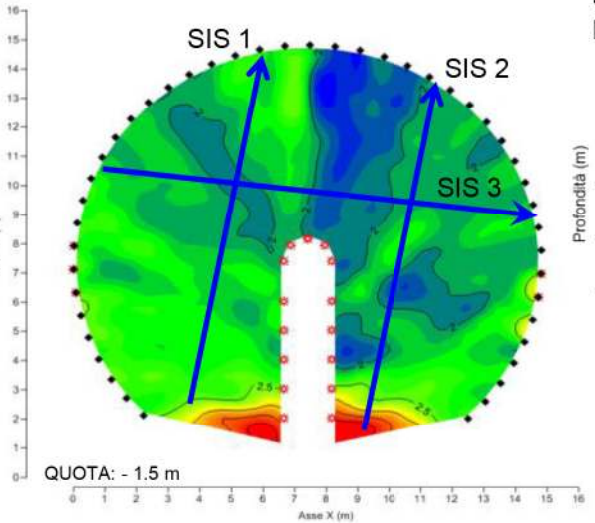
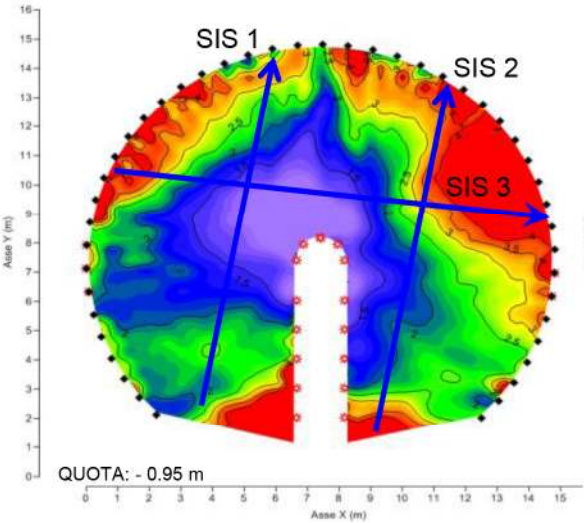


Figure 2: Model and rays for diving waves.

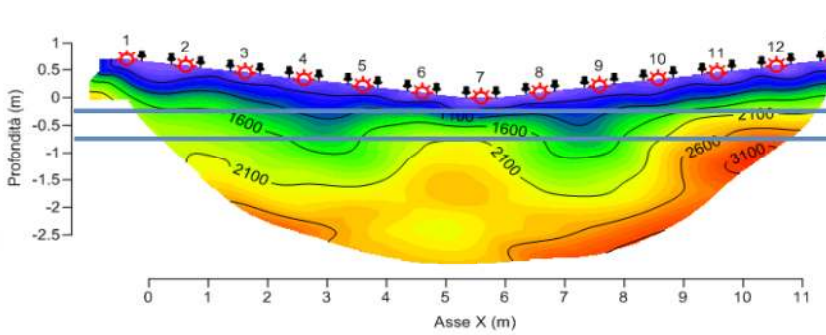


# INTEGRAZIONE TRA I DUE METODI DI INDAGINE

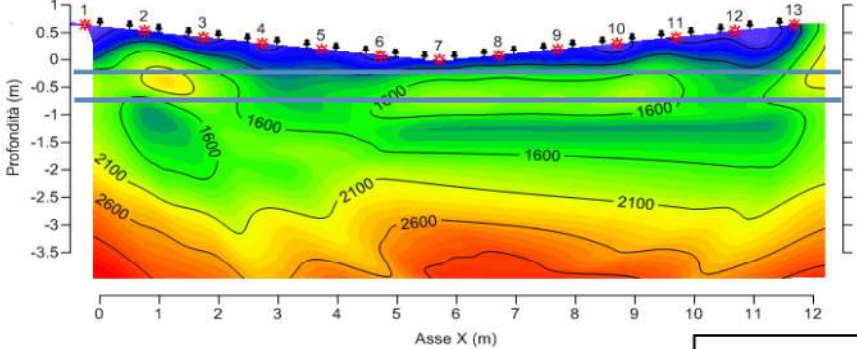
TOMOGRAFIA SISMICA IN TRASPARENZA – SEZIONI CIRCONFERENZIALI  
 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (km/s)



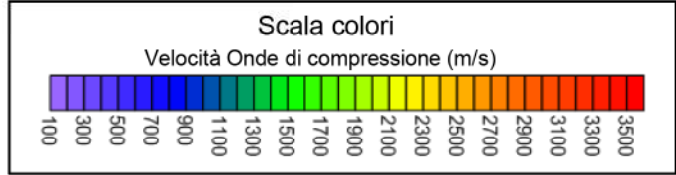
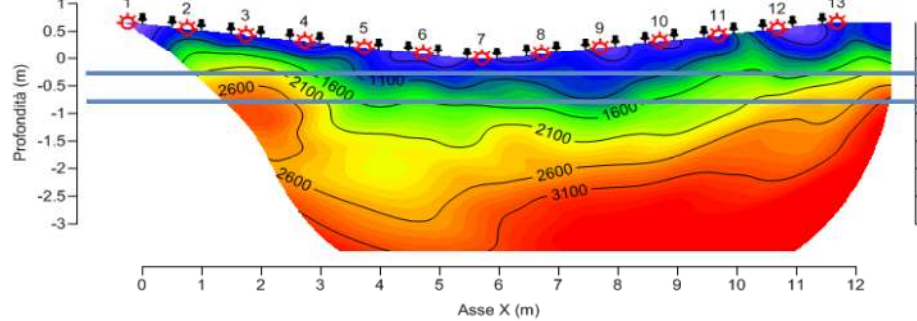
Sezione SIS 3  
 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



Sezione SIS 1  
 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



Sezione SIS 2  
 MODELLO DI VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE (m/s)



NOTA BENE: il confronto tra le sezioni sismiche a rifrazione e la sezione circonferenziale (trasparenza) è solo indicativo. I valori più attendibili di

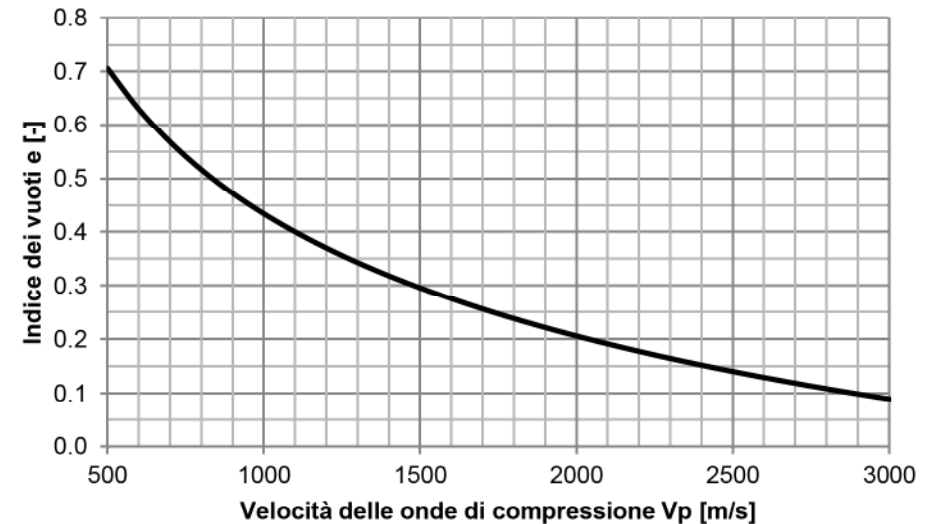
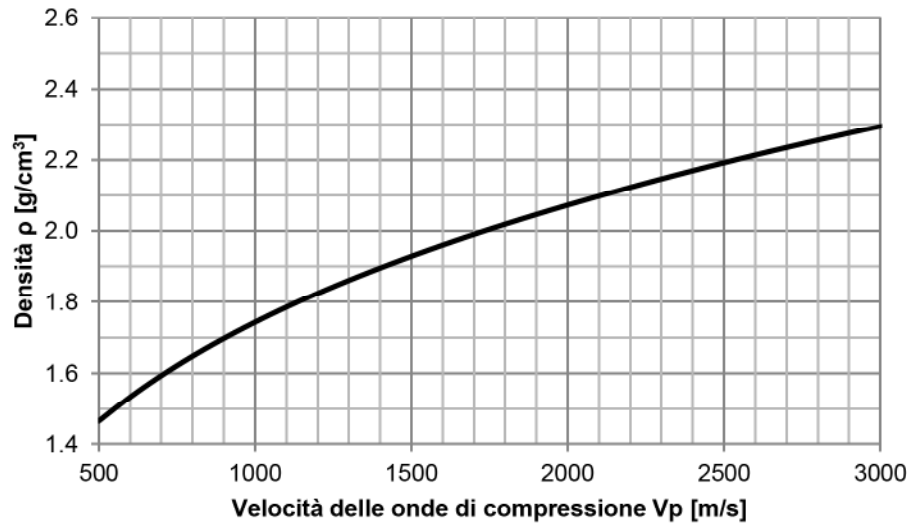
# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

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  $\rho$  è la densità del materiale attraversato,  $V_p$  sono le velocità delle onde di compressione,  $\alpha$  e  $\beta$  sono delle costanti empiriche derivate dalla geologia, assunte rispettivamente pari a 0.31 e 0.25.

Sono stati quindi definiti delle curve su grafici velocità vs densità e velocità vs Indice dei vuoti.



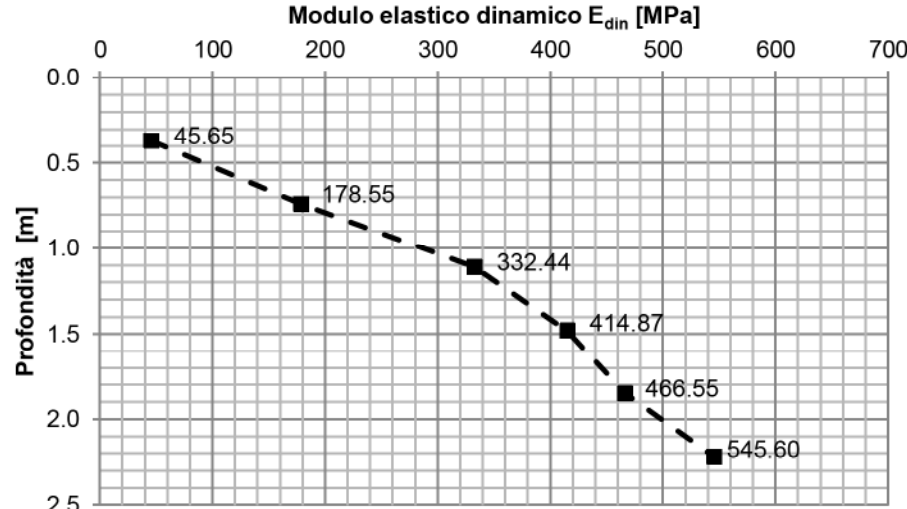
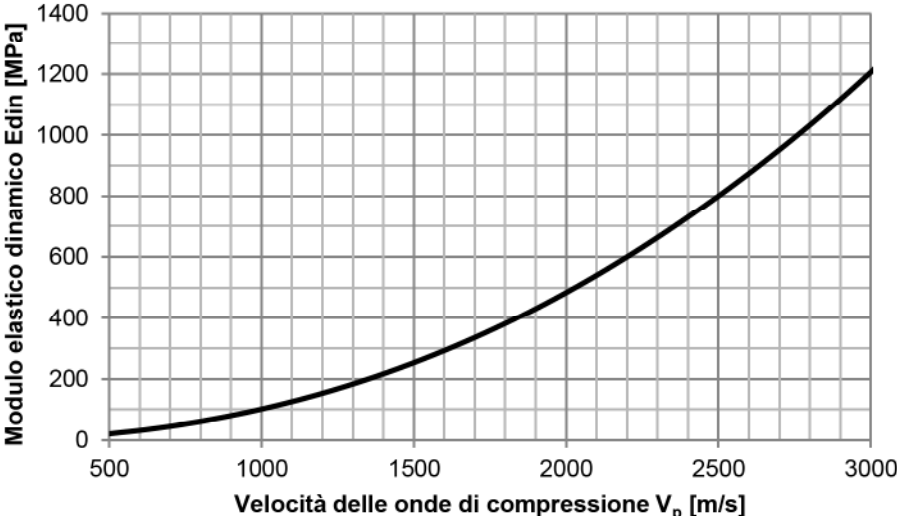
**LA PARAMETRIZZAZIONE GEOTECNICA E' PROPEDEUTICA ALLA PROGETTAZIONE DELL'INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO**

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

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,  $\rho$  densità del materiale attraversato e  $\nu_{din}$  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  $\eta$  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.

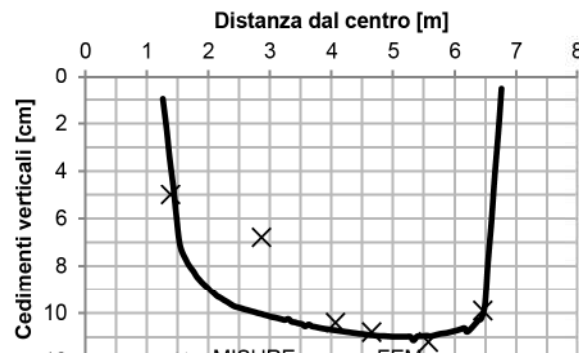
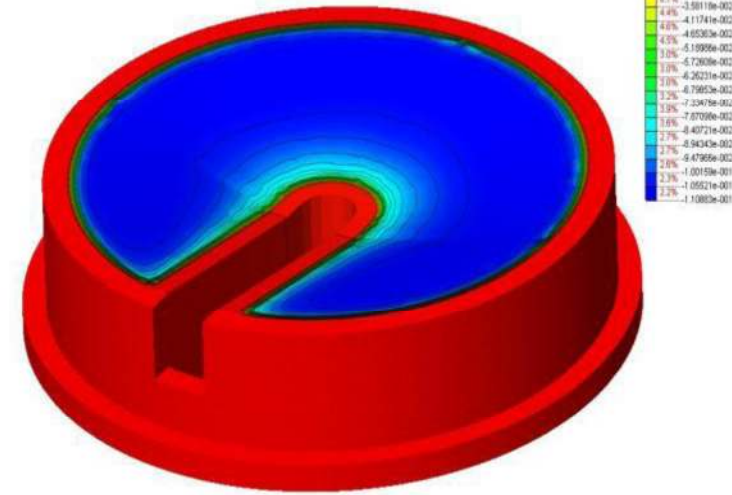
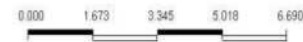
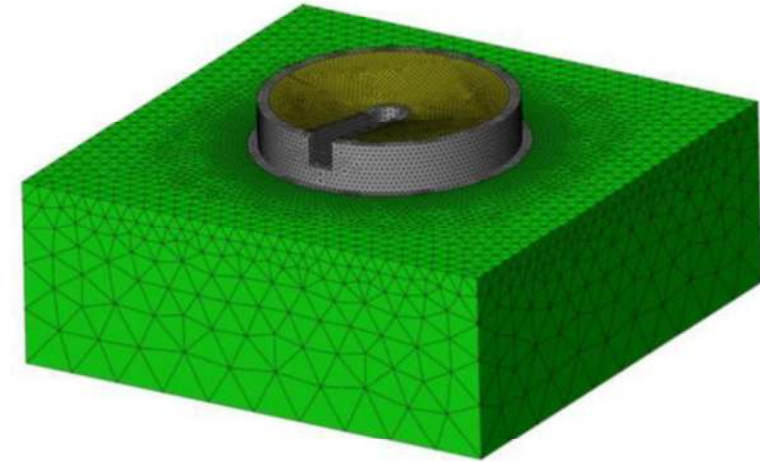




# PREVISIONI DI CEDIMENTO A PARTIRE DALLE RISULTANZE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

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 14m, riempimento di acqua) e avendo a disposizione i cedimenti verticali misurati sulla superficie del riempimento dopo la prova. Il modello numerico, illustrato in figura, è costituito da tre parti principali: il terreno di sottofondo, la struttura di contenimento in calcestruzzo (basamento del serbatoio) e il materiale di riempimento

La sezione tomografica effettuata alla profondità di 1m 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  $\rho$ , 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.



[UNIT] MN , m  
[DATA] CSNL : A , DZ00 , CARICO-Step 001(1)

## SCelta DEL METODO DI CONSOLIDAMENTO

In relazione alle caratteristiche dei basamenti dei serbatoi, e per evitare danni alle strutture contenitive, si è scelta la tecnica di «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 ed a volume controllato di miscele studiate opportunamente, finalizzata a compensare volumetricamente il cedimento indotto dall'azione esterna sino al limite massimo ammissibile.

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

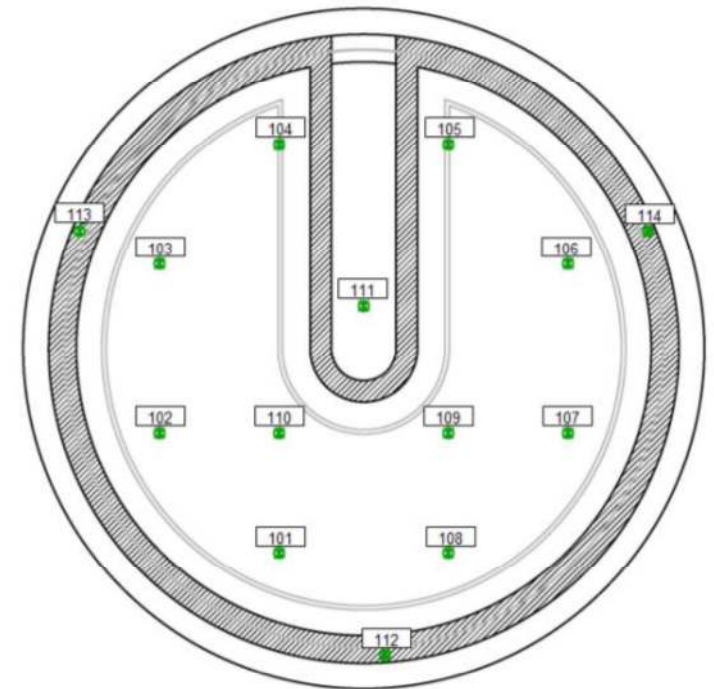
Si tratta di una tecnica di consolidamento di tipo attivo, che consente cioè di reagire al comportamento deformativo che si sviluppa, modificando in tempo reale le strategie di intervento sulla base del principio osservazionale.



Esecuzione delle perforazioni per la realizzazione delle iniezioni di compensazione

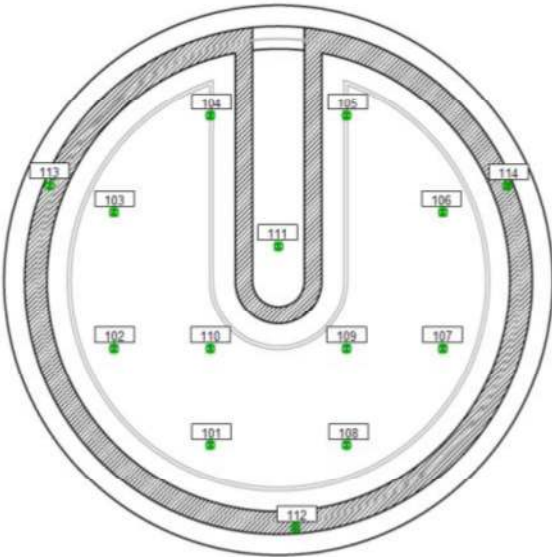
## MONITORAGGIO GEOTECNICO IN CORSO D'OPERA

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 (DIFFERENZIALE)

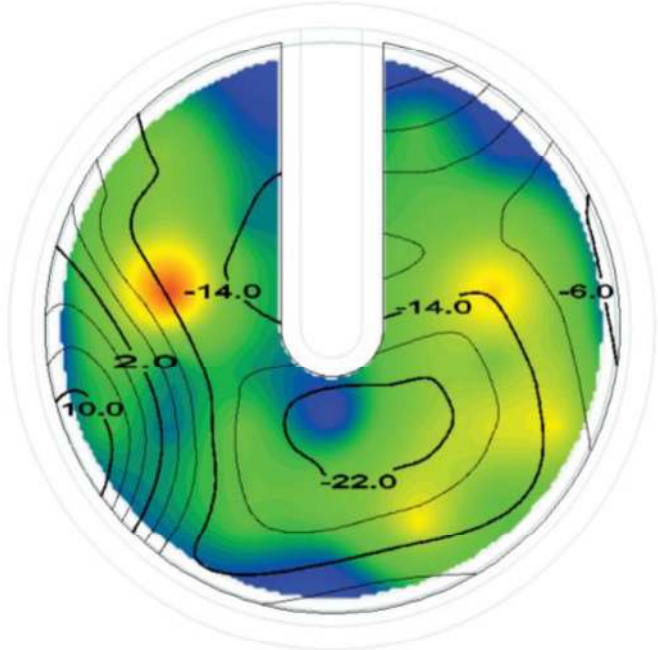


# MONITORAGGIO GEOTECNICO IN CORSO D'OPERA

Ref 1



Disposizione tazze assestometriche

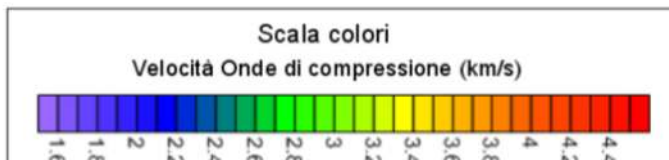
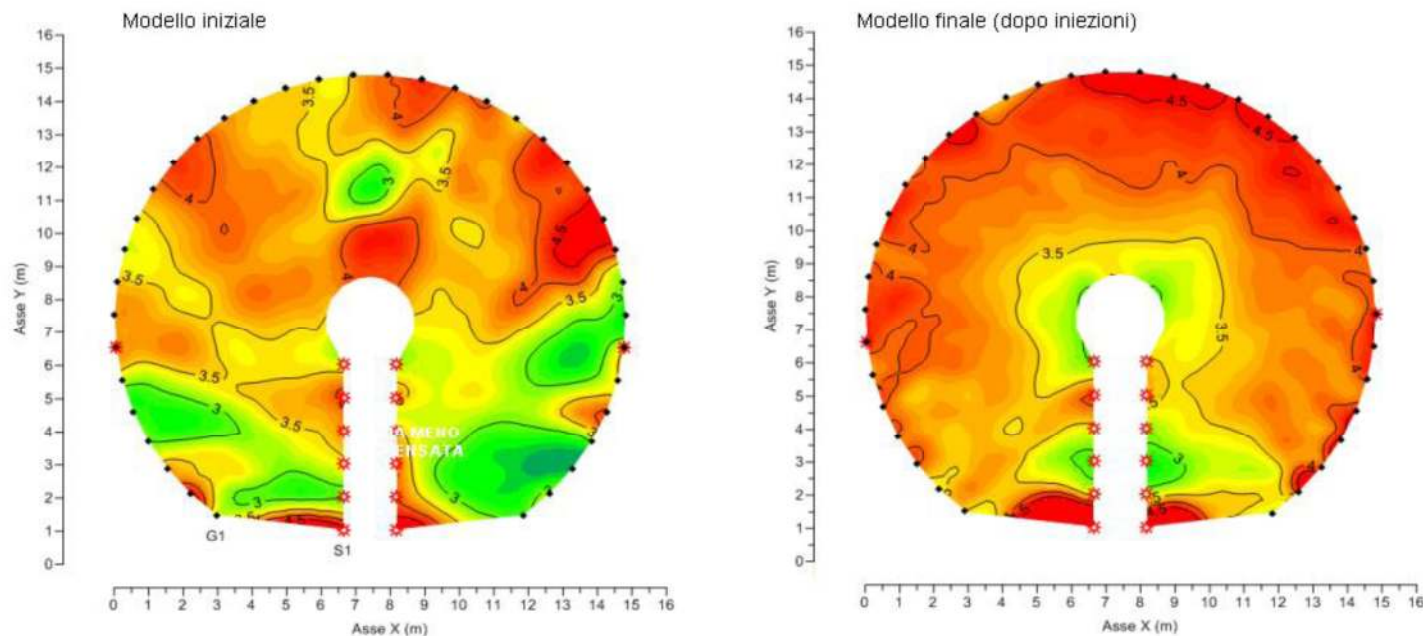


Volumi iniettati e cedimenti verticali per altezza d'acqua pari a 13.50m (isolinee di cedimento in mm, negativi diretti verso il basso)

# VERIFICA GEOFISICA EX-POST

Al fine di valutare il miglioramento delle proprietà del terreno conseguito a seguito del trattamento con iniezioni (miglioramento permanente a lungo termine) è stata effettuata un'indagine geofisica con le medesime caratteristiche di quella eseguita prima del trattamento di compensazione.

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).



Il mio lavoro è  
concluso. Grazie  
dell'attenzione

