

# Interazione terreno - struttura con FLAC3D: Il perfetto connubio tra geotecnica e strutture

Ing. Samuele Perni - Supporto Tecnico Divisione Calcolo Strutturale e Geotecnico di Harpaceas

<https://www.linkedin.com/in/samuele-perni-74886164/>

Da sempre il mondo dell'ingegneria geotecnica e dell'ingegneria strutturale hanno provato ad unirsi insieme nel tentativo di dare una risposta completa a qualunque fenomeno che coinvolgesse il legame tra una struttura e il terreno di fondazione.

L'interazione tra i due protagonisti principali, struttura e terreno, è complesso e difficile. Questo a volte ha portato a separare le due strade, preferendo una risposta parziale completa ad una totale non completa.

L'argomento coinvolge un grande numero di variabili: le geometrie delle strutture, la rigidità relativa dell'insieme fondazione e terreno, la distribuzione dei carichi, le condizioni di scabrezza dei contatti e i legami costitutivi assunti.

La rappresentazione completa del problema dell'**interazione terreno –struttura** rappresenta quindi una delle sfide concettuali e pratiche più importanti attinenti il confine labile tra l'ingegneria geotecnica e l'ingegneria strutturale.

In questo articolo, attraverso un progetto reale, mostreremo come [Flac3D](#), software Itasca, permetta di risolvere facilmente e complessivamente il problema dello studio dell'interazione terreno struttura, attraverso la rappresentazione tridimensionale del problema unita alle potenzialità di calcolo del software, permettendo di dare risposte puntuali sia lato strutturale che geotecnico.

Il progetto riguarda il Collettore Mediano nel Comune di Torino ed è svolto dalla società Siteco Srl di Modena, società di ingegneria, fondata nel 1990 che opera principalmente nel settore dei trasporti e delle infrastrutture, svolgendo attività di progettazione, valutazione e monitoraggio, project & construction management, vigilanza opere infrastrutturali, ispezione generale e servizi di convalida.

## Progetto del Collettore Mediano

L'intera opera si svilupperà per un percorso di circa 14.400 m, interamente sul territorio del Comune di Torino, che interesserà anche i Comuni di Beinasco, Bruino, Cambiano, Candiolo, Chieri Pessione, La Loggia, Moncalieri, Nichelino, Orbassano, Piobesi, Piossasco, Poirino, Riva di Chieri, Rivalta di Torino, Sangano, Santena, Trana, Trofarello, Villastellone, Vinovo.

La galleria del collettore principale, che avrà un diametro internodi 3,2 m, sarà realizzata utilizzando la Tunnel Boring Machine (TBM) con una fresa di perforazione pari a 4,1 m di diametro.

Il pozzo di lancio della TBM sarà situato all'incrocio tra Strada dell'Arrivore e via Botticelli, dove l'area di cantiere, che è stata studiata per minimizzare gli impatti sul traffico veicolare, occuperà circa 13000 m<sup>2</sup>.

Il volume di materiale interessato dagli scavi, che verrà inviato in discarica, sarà di circa 250.000 mc.

I pozzi costruiti lungo il collettore avranno un diametro di 25 m ed un'altezza di 20 m, paragonabile ad una palazzina interrata di 4 o 5 piani.



1. Planimetria: Collettore Mediano

Il progetto presentato riguarda il dimensionamento e le verifiche geotecniche e strutturali delle opere di sostegno agli scavi previste per la realizzazione del Pozzo Principale denominato “Pz04” nell’ambito della *“Progettazione per la realizzazione del collettore Mediano zona Sud-Ovest Area Metropolitana e risanamento collettore zona Sud esistente”*.

#### **Descrizione delle opere: Funzioni**

Il pozzo principale *Pz04* è una struttura circolare in cemento armato gettato in opera, realizzata all’interno di un sistema di diaframmi, che ha la finalità durante la fase di costruzione di struttura di servizio per l’attività di scavo effettuata dalla macchina TBM; successivamente in condizioni di esercizio il pozzo avrà uso funzionale al nuovo collettore mediano.

Dal punto di vista geometrico il pozzo *Pz04* è un cilindro di calcestruzzo con diametro interno 12,8 m e profondità circa 30,5 m dal piano campagna attuale, sul cui fondo scorre il collettore mediano; il solettone in sommità ha spessore 1,0 m ed estradosso posto a circa 2 m dal piano di campagna; il solettone di fondo ha spessore 1,2 m, mentre le solette intermedie hanno spessore 0,5 m. Le fodere hanno spessore strutturale 50 cm.

La funzione del pozzo è quella sia di consentire l’accesso al collettore mediano, posto al di sopra del solettone di fondo, sia realizzarne la ventilazione. Le opere di sostegno sono realizzate mediante diaframmi armati sp.100cm e larghezza 285 cm. Lo scavo ha un’altezza massima di circa 32 m dal piano campagna attuale.

### **Flac3D: Codice di calcolo**

La modellazione è stata eseguita con il software di calcolo Flac3D della *ITASCA CONSULTING GROUP*.

Il software è un codice di calcolo non lineare alle differenze finite tridimensionale specifico per applicazioni nel settore strutturale e geotecnico.

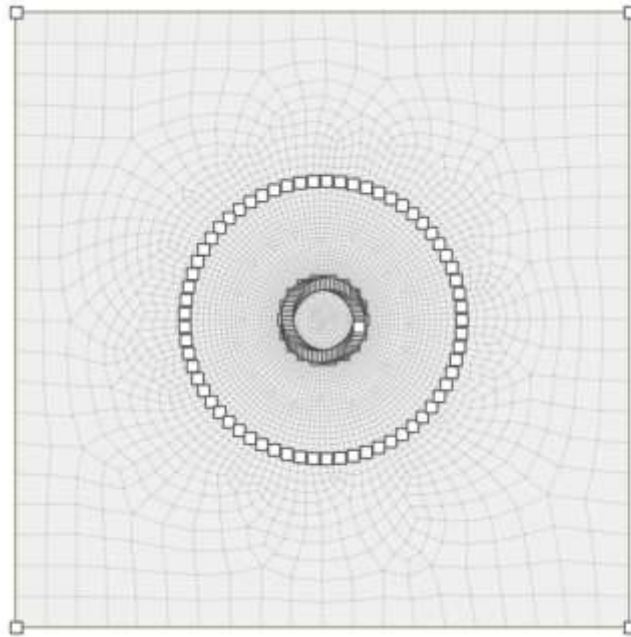
Il programma simula il comportamento di rocce, terre o altri materiali rappresentati da elementi o zone che formano una griglia in modo da rappresentare in modo più realistico possibile la realtà fisica sia per quanto riguarda la geometria sia per le leggi costitutive dei materiali; infatti ogni elemento si comporta secondo una legge costitutiva imposta (lineare, non lineare ecc).

Inoltre, il software consente di modellare il moto filtrazione attraverso un mezzo permeabile, tenendo conto dell'interazione fluido – solido, in cui la variazione della pressione interstiziale induce variazioni delle tensioni efficaci e viceversa.

La potenzialità del Flac3D è data anche dalla possibilità di inserire nella modellazione elementi strutturali sia monodimensionali (beam, cable e pile) che bidimensionali (shell, liner e geogrid) studiandone l'interazione con il terreno e il loro stato tenso- deformativo al fine di ricavare poi le caratteristiche di sollecitazione per il loro dimensionamento.

### **Modellazione numerica 3D**

Il modello geometrico è stato rapidamente creato nell' ambiente Extrusion presente nel software che permette di effettuare l'estrusione di una geometria bidimensionale a partire da un dxf:



*2. Geometria 2D ambiente Extrusion*

Al modello sono stati associati le diverse unità litostratigrafiche con le relative proprietà attraverso la definizione di opportuni gruppi di zone:

| Unità e descrizione  | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | E<br>[MPa] | $\nu$<br>[ ] | $\phi'$<br>[°] | $c'$<br>[kPa] | $c_u$<br>[kPa] |
|--|----------------------------------|------------|--------------|----------------|---------------|----------------|
| UG1: terreno superficiale<br>(riperto a/o limo sabbioso argilloso) | 17-19                            | 25         | 0.30         | 25             | 0             | -              |
| UG2: ghiaie e sabbie da sabbia a detritamente cementate.           | 18-21                            | 150-170    | 0.30-0.40    | 35-57          | 0-20          | -              |
| UG2a: limi e sabbie deb. argillosi                                 | 18-20                            | 5-15       | 0.30-0.35    | 28-30          | 5-15          | 50-80          |
| UG2b: sabbie deb. limose o ghiaie fin.                             | 18-20                            | 20-40      | 0.30-0.35    | 28-32          | 0             | -              |
| UG3: ghiaie e sabbie con cementazione da debole a media            | 19-22                            | 170-200    | 0.30-0.40    | 35-57          | 20-50         | -              |
| UG4: ghiaie e sabbie con cementazione da media ad elevata          | 19-22                            | 200-250    | 0.30-0.40    | 38-43          | 50-140        | -              |
| UG5a: Argille consistenti  | 20                               | 60-80      | 0.30-0.35    | 18-20          | 15-20         | 30             |
| UG5b: Argille marose   | 22                               | 120-130    | 0.30-0.35    | 18-30          | 70            | -              |

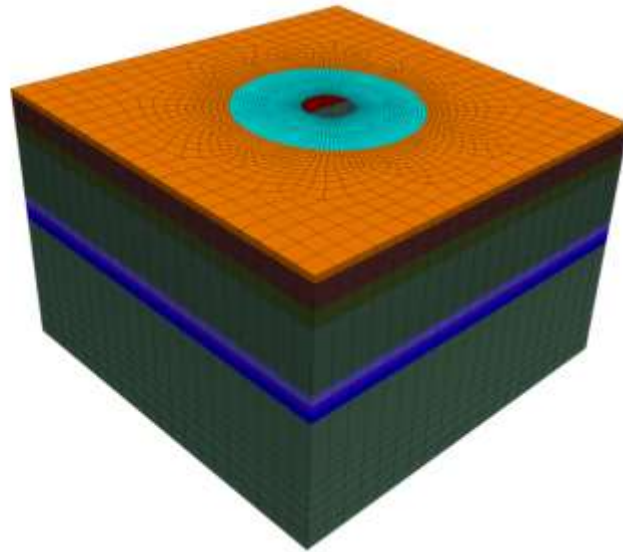
3. Tabella dei parametri geotecnici caratteristici

**FLAC3D 7.00**  
©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Norm Stress  
Cut Plane: on back  
Calculated by: Volumetric Averaging  
0.0000E+00

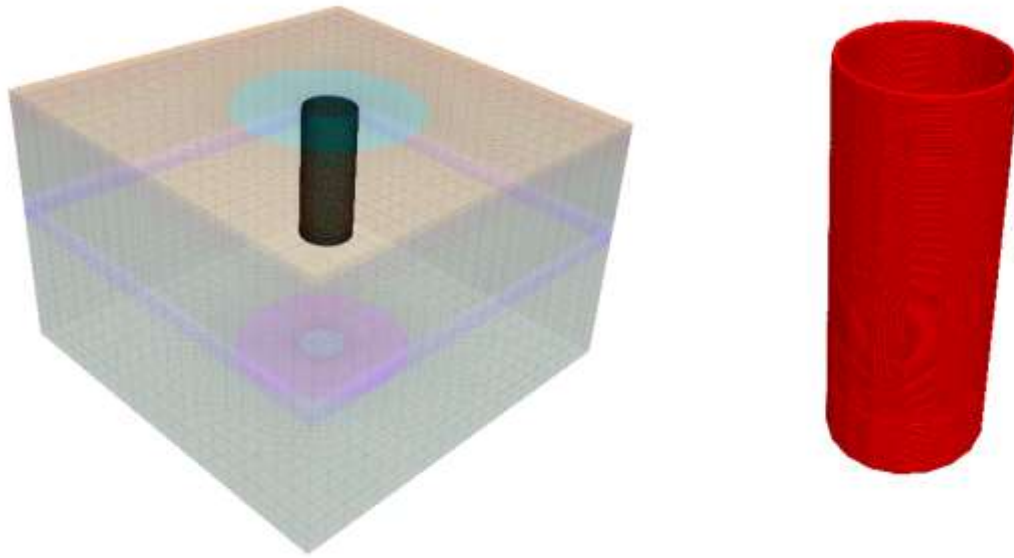
Zone Group

- Extrusion=UG1.Block=Block 1.Segment=Segment 1
- Extrusion=UG1.Block=Block 2.Segment=Segment 1
- Extrusion=UG2b.Block=Block 2.Segment=Segment 2
- Extrusion=UG2b.Block=Block 2.Segment=Segment 4
- Extrusion=UG3.Block=Block 2.Segment=Segment 3
- Extrusion=UG3.Block=Block 2.Segment=Segment 5
- Extrusion=UG5a.Block=Block 2.Segment=Segment 6
- Extrusion=UG5b.Block=Block 1.Segment=Segment 6
- Extrusion=UG5b.Block=Block 2.Segment=Segment 7
- Extrusion=UG5b.Block=Block 2.Segment=Segment 8
- Extrusion=UG5b.Block=Block 3.Segment=Segment 8
- Extrusion=UG5b.Block=Block 4.Segment=Segment 8
- Layer=MBER.Extrusion=UG1.Block=Block 1.Segment=Segment 1
- Layer=MBER.Extrusion=UG1.Block=Block 4.Segment=Segment 1



4. Unità litostratigrafiche

Il pozzo in cemento armato è stato modellato attraverso l'elemento finito *Liner* disponibile in Flac3D. Il *Liner* è un elemento finito 2D con possibilità di ammettere sole azioni membranali, sole azioni flessionali o entrambe; può avere un comportamento elastico isotropo, ortotropo o anisotropo. È inoltre dotato di un'interfaccia su entrambi i lati per cui rispetto ad altri elementi la congruenza non è necessaria con punti della griglia. Novità delle ultime versioni è la possibilità di applicare su tale elemento carichi distribuiti.



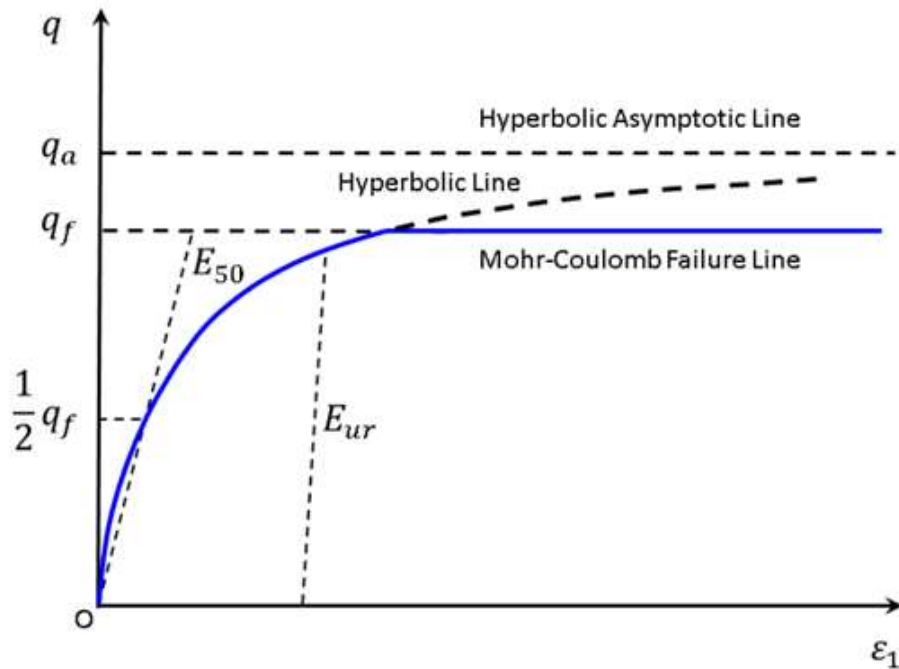
5. Pozzo: elemento strutturale 2D Liner.

Per la stima dei cedimenti si è deciso di adottare per i terreni il modello costitutivo: *Plastic Hardening*.

Il modello (PH) è un modello costitutivo avanzato che simula perfettamente sia la deformazione volumetrica che a taglio del terreno.

Le caratteristiche principali del modello PH sono:

- Legame tensione – deformazione iperbolico;
- Deformazione plastica per attrito (shear hardening);
- Deformazione plastica a compressione primaria (volumetric hardening);
- Modulo di rigidezza elastico dipendente dallo stato tensionale secondo una legge di potenza;
- Presenza del ramo di scarico e ricarica elastico rispetto alla linea di compressione vergine;
- Memoria della storia di stato tensionale pre-consolidamento;
- Criterio di rottura di Mohr-Coulomb.



6. Legge sforzo – deformazione modello Plastic Hardening.

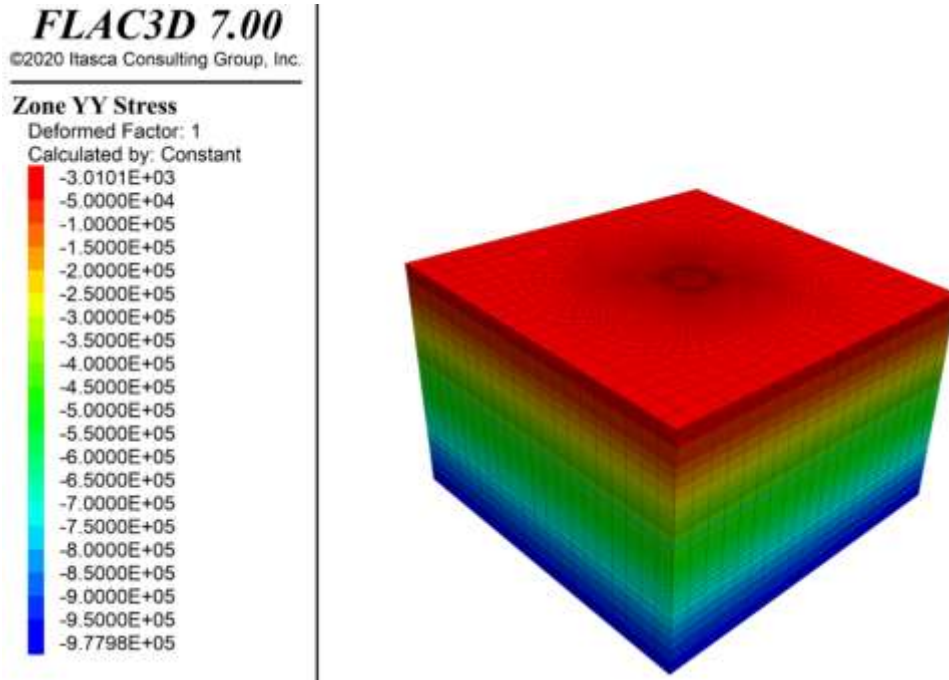
Le ulteriori porzioni strutturali come fodere interne ed elementi soletta in cemento armato sono stati modellati invece non come elementi strutturali ma come zone aventi un legame costitutivo elastico con le proprietà del cemento armato (modulo elastico, densità e coefficiente di Poisson).

La scelta della modellazione di elementi strutturali come zone del modello e non come elemento finito nasce dalla non esigenza per questi ultimi di estrarne le caratteristiche della sollecitazione (sforzo assiale, taglio e momento) necessarie per un successivo dimensionamento, ma solo al fine di considerarli nell'analisi deformativa complessiva con la loro effettiva rigidità.

## Fasi costruttive

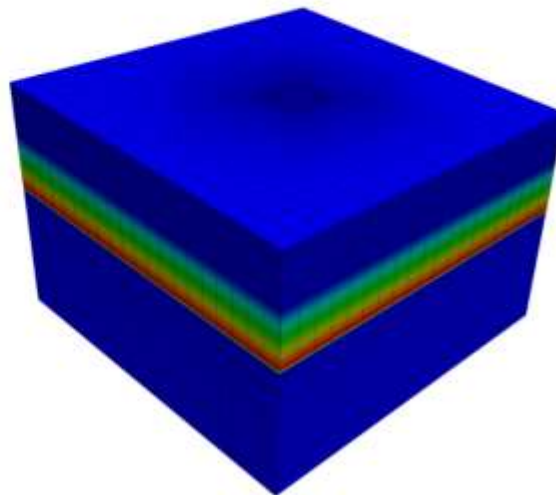
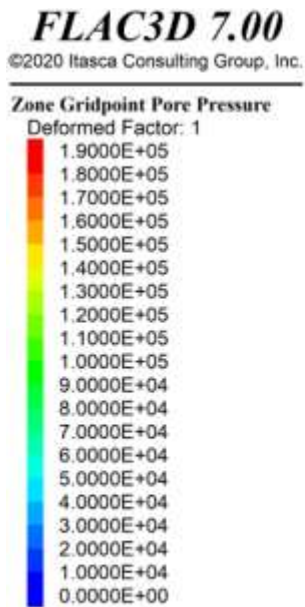
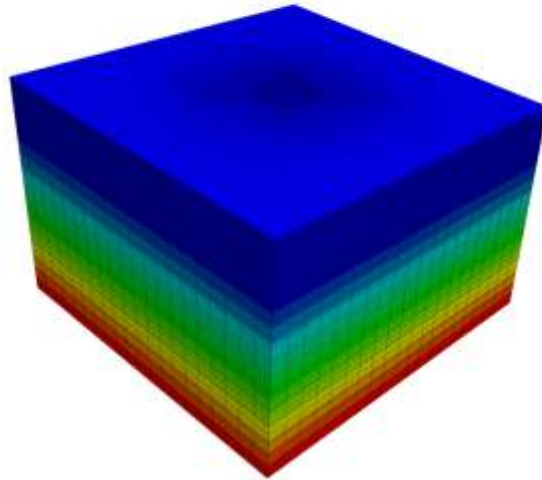
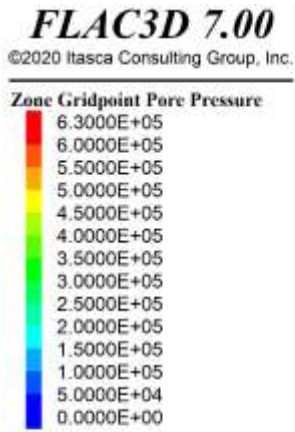
La modellazione numerica ha previsto la simulazione di tutte le fasi costruttive ai fini della stima dei cedimenti e dell'analisi dello stato tensionale delle strutture. La simulazione prevede le diverse fasi di scavo che vengono eseguite con sottomurazione attraverso le fodere interne che costituiscono il sistema di contrasto fino al raggiungimento del fondo scavo e la realizzazione della paratia in cemento armato (*Liner*) fino alla quota di sommità del pozzo.

**Fase 0:** fase iniziale geostatica:



7. Fase geostatica: tensione verticale totale

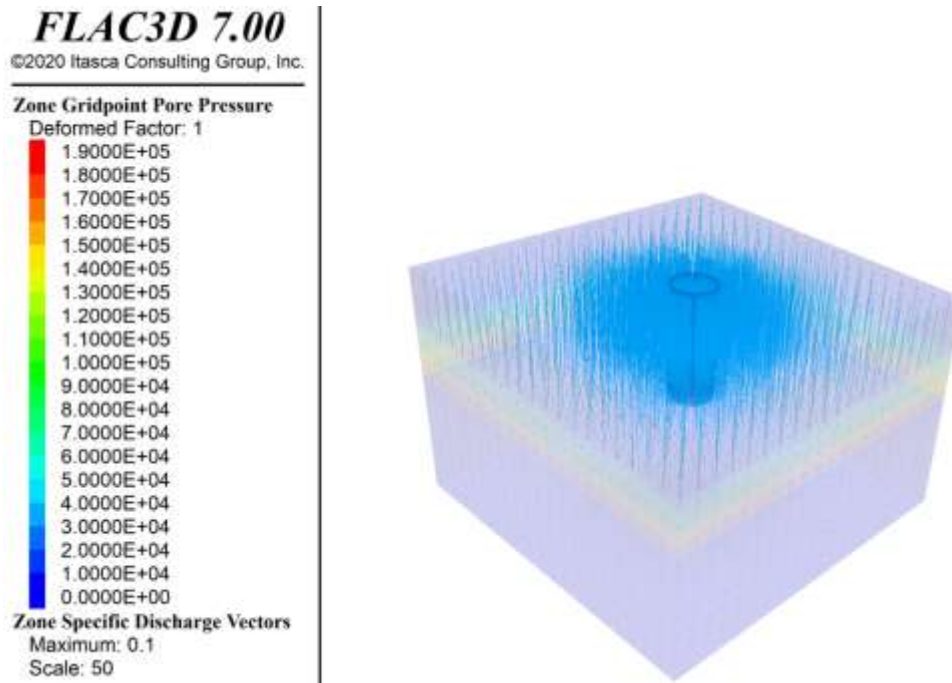
**Fase 1:** Abbassamento del livello di falda fino da -17 m a -40 m (dewatering):



8. Dewatering fino a -40 m

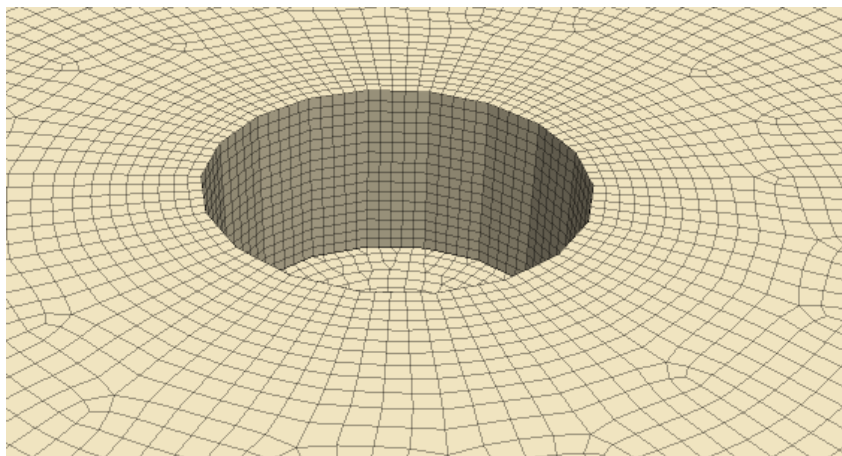


Si riportano a valle del calcolo idraulico gli andamenti delle linee di flusso:

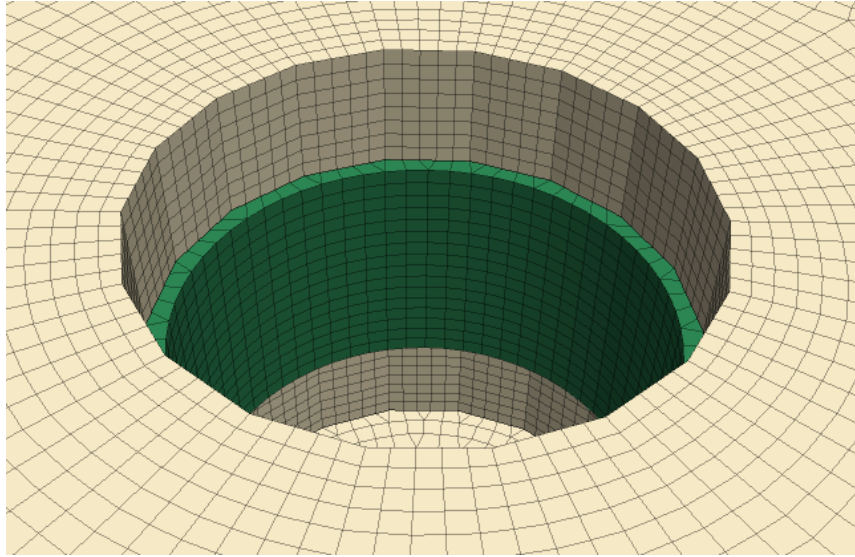


9. Linee di flusso

**Fase 2:** scavo e realizzazione della struttura alle seguenti profondità: -4 m, -8 m, -12 m, -16 m, -20 m, -24 m, -28 m e -32 m.;



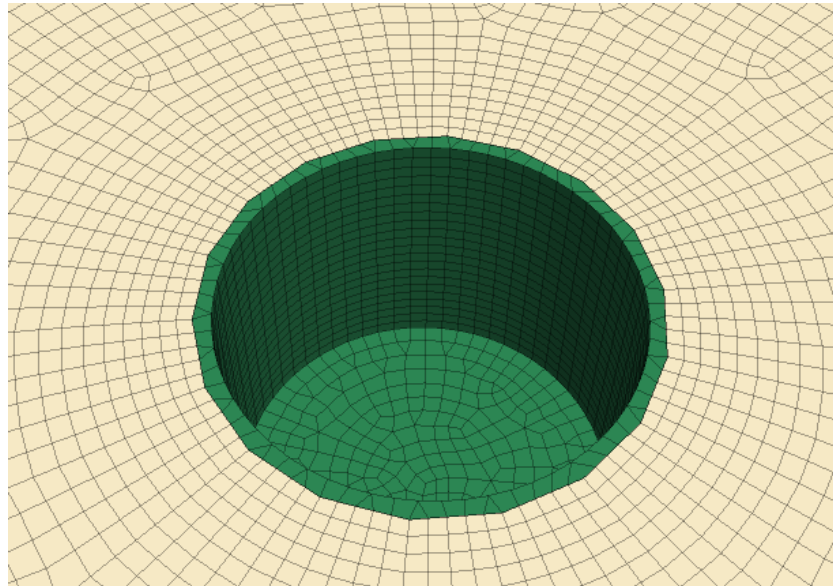
10. Scavi: -8 m



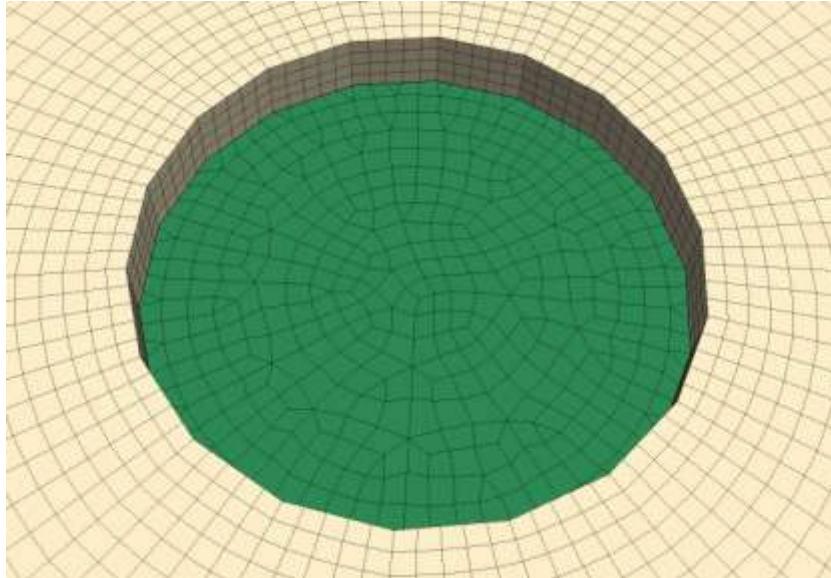
11. Scavi: -16 m e getto fodera interna

Ciascuna delle fasi prevede sia lo scavo che il getto della struttura di sostegno interna

**Fase 3:** getto della soletta di contrasto fino alla quota di sommità del pozzo;

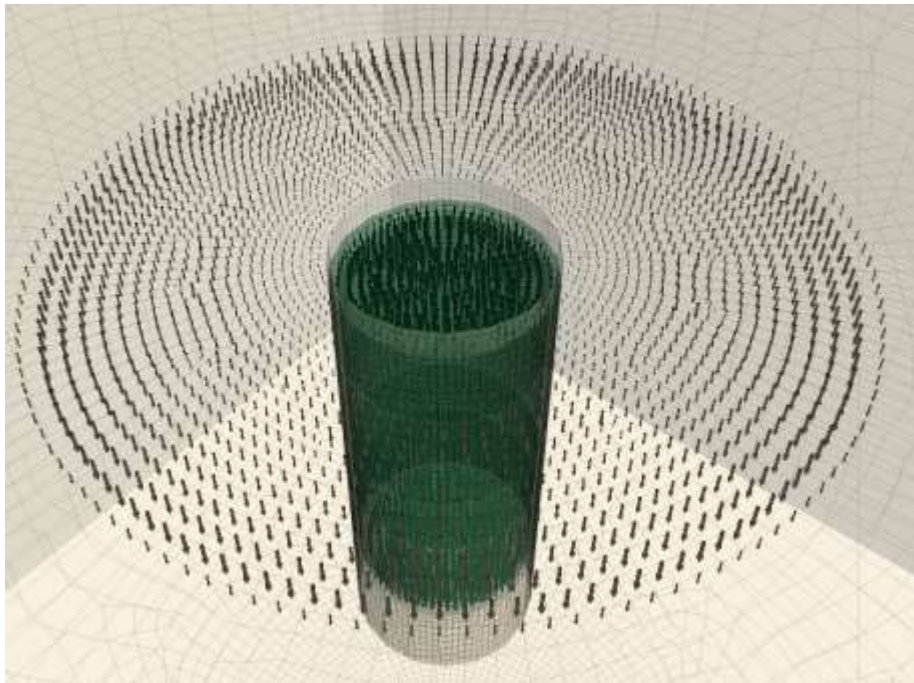


12. Getto soletta a -23.5 m



13. Getto soletta sommità pozzo

**Fase 4:** Applicazione dei carichi strutturali e del sisma con approccio pseudo-statico:



14. Carichi permanenti

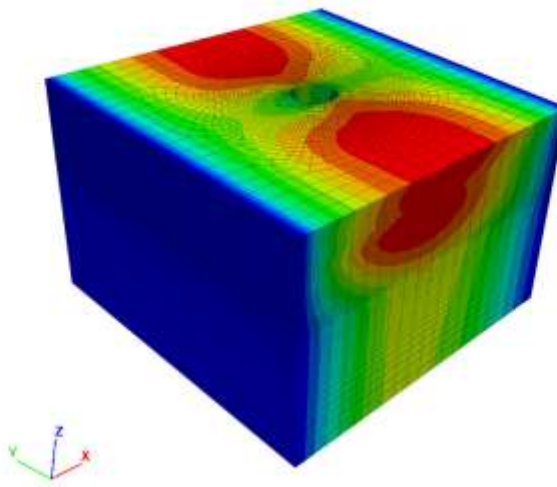
## Risultati

La modellazione numerica permette di stimare completamente lo stato tenso - deformativo sia del terreno che delle strutture tenendo perfettamente conto della loro interazione reciproca.

I risultati fanno riferimento all'ultima fase dell'analisi con applicazione dei carichi permanenti e del sisma.

Si riportano sia i risultati degli spostamenti e cedimenti verticali del terreno: che lo stato tensionale nell'elemento strutturale:

### Spostamenti e cedimenti del terreno

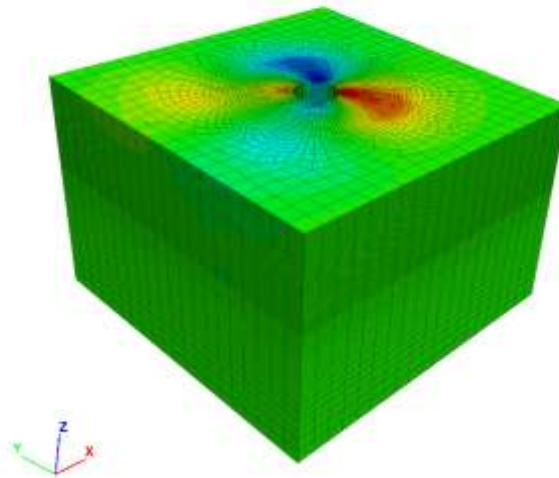
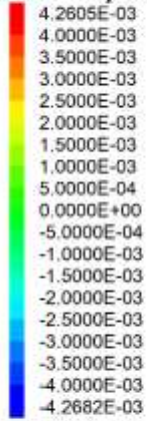


15. Spostamenti in X

# FLAC3D 7.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

## Zone Y Displacement

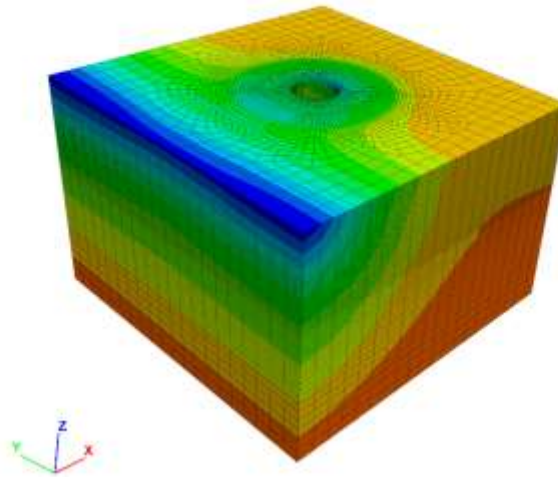
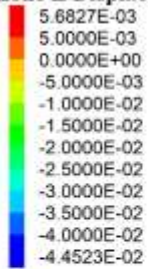


16. Spostamenti in Y

# FLAC3D 7.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

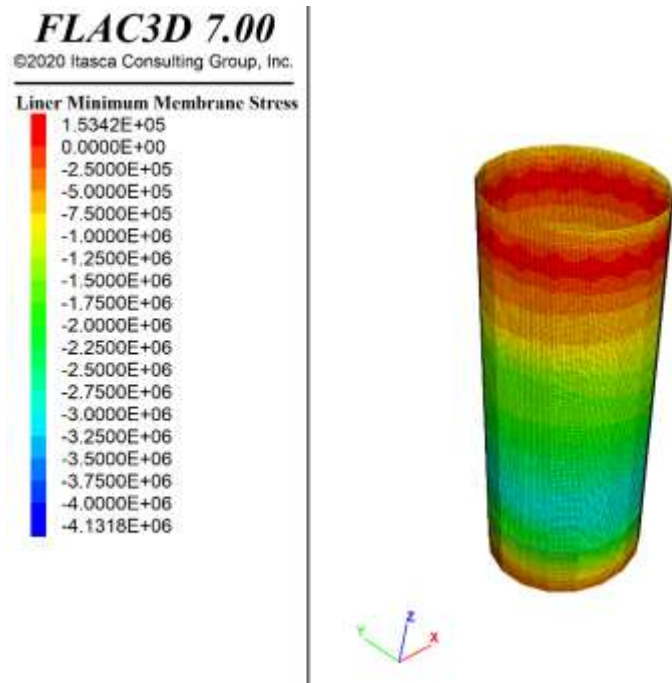
## Zone Z Displacement



17. Spostamenti in Z

## Azioni elementi strutturali

I risultati relativi allo stato di sforzo membranale nell'elemento bidimensionale, *Liner*, sono fondamentali per eseguire il successivo progetto strutturale dell'elemento in cemento armato.



18. Azione membranale

## Conclusioni

Con questo esempio progettuale si evidenzia come attraverso le potenzialità del software FLAC3D si sia realizzata una perfetta analisi di interazione terreno struttura che permette di stimare l'effetto bivalente che terreno e struttura esercitano l'uno sull'altro.

La fasizzazione del processo di scavo unito alle accurate scelte di modellazione come l'uso del modello Plastic hardening per il terreno ai fini della stima dei cedimenti plastici, la modellazione a zone di elementi di supporto in cemento armato e l'uso dell'elemento finito *Liner* per modellare la paratia interna permettono di stimare tutti gli effetti dell'interazione e cosa fondamentale permettono al progettista con un solo modello di avere tutti i dati per eseguire sia verifiche geotecniche che il dimensionamento strutturale dell'opera di sostegno, senza dover fare più modelli in ambienti diversi per avere i vari output geotecnici e strutturali.

## Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Alessandro Frascari della società Siteco srl, consolidata ed esperta azienda operante da anni nell'ambito dell'ingegneria infrastrutturale, per la preziosa e puntuale collaborazione offerta per la realizzazione di questo articolo.