

L'interazione terreno-struttura per la valutazione del sistema fondazionale di un edificio multipiano

Ing. Ada Zirpoli – Direttore Tecnico Divisione Calcolo Strutturale e Geotecnico Harpaceas s.r.l.

In questi ultimi anni, la comunità ingegneristica ha manifestato un notevole aumento di interesse per le tematiche di interazione terreno-struttura. Il problema è certamente uno dei più complessi. Nonostante l'incremento esponenziale delle prestazioni dei calcolatori negli ultimi due decenni, a cui ha fatto seguito un incessante sviluppo di metodi numerici, l'interazione dei programmi di analisi strutturale con le problematiche geotecniche rimane limitata: codici di calcolo specialistici per l'ingegneria strutturale restano avulsi dal contesto geotecnico e viceversa. La causa va ricercata nelle potenzialità estremamente specialistiche che un solutore pensato per lo studio di questioni geotecniche deve avere. Si pensi ad esempio a tutte le problematiche legate alla gestione dell'acqua, soprattutto in terreni a grana fine; si pensi alla necessità di garantire uno stato di sforzo iniziale a deformazione nulla a simulare la fase geostatica; si consideri infine la complessità che i legami costitutivi per i terreni devono avere per cogliere i molteplici aspetti di questo materiale naturale, non fabbricato dall'uomo e difficilmente investigabile.

Tuttavia, rimane un punto fondamentale poter inserire l'opera strutturale all'interno del suo contesto geotecnico, soprattutto nei casi di opere completamente o parzialmente immerse nel terreno (gallerie, opere di sostegno, spalle da ponte, ecc...); esiste infatti una mutua e reciproca influenza dello stato tenso-deformativo: la rigidità (e la resistenza) della fondazione determina la risposta del manufatto che a sua volta influisce con la sua rigidità sulla risposta della fondazione.

Spesso i programmi di analisi strutturale ricorrono all'uso di molle elastiche o elasto-plastiche, ma non è una strategia comunque sufficiente a cogliere aspetti tipici dei terreni, quali ad esempio la variazione della rigidità con lo stato di sovraconsolidazione.

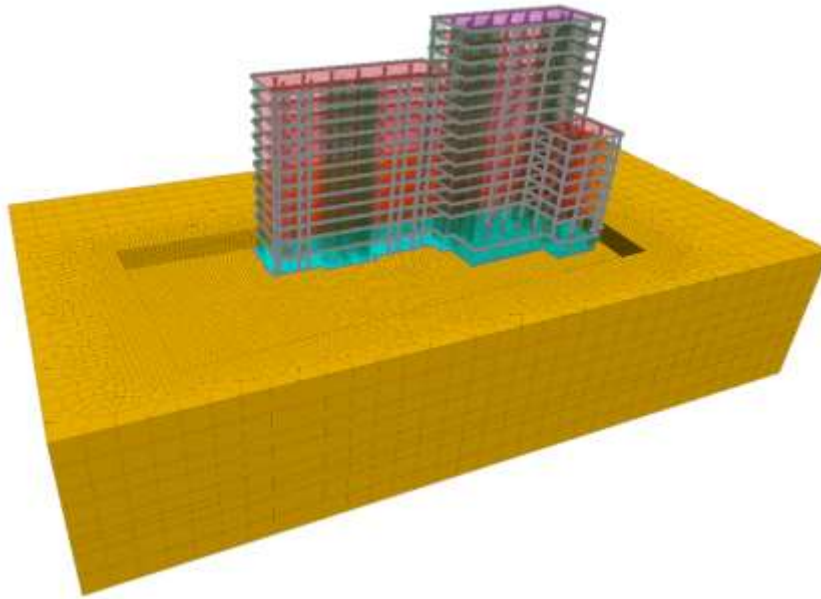
I software che tramite un approccio "a molle" riescono ad implementare anche questo tipo di comportamento si configurano comunque come riservati all'ambito geotecnico (si pensi ad esempio al programma Paratie Plus sviluppato da Ce.A.S. e dedicato allo studio delle opere di sostegno flessibili).

In molti progetti è sempre più richiesta la necessità di sviluppare le analisi sfruttando le massime potenzialità sia lato strutture sia lato geotecnica.

Da qui emerge la chiara necessità di stabilire un collegamento tra questi due ambienti di calcolo.

La soluzione di seguito presentata consiste nel far interagire due programmi: Midas Gen, strumento indispensabile per l'ingegnere strutturista e Flac 3D, software general purpose per l'ingegneria geotecnica. Come verrà meglio spiegato nel seguito, l'interazione è possibile grazie alla flessibilità e all'apertura dei due codici di calcolo.

Facendo riferimento ad un caso reale di una struttura in c.a. multipiano, si illustreranno le problematiche principali in essere, i passaggi significativi ed i vantaggi indubbiamente ottenuti.

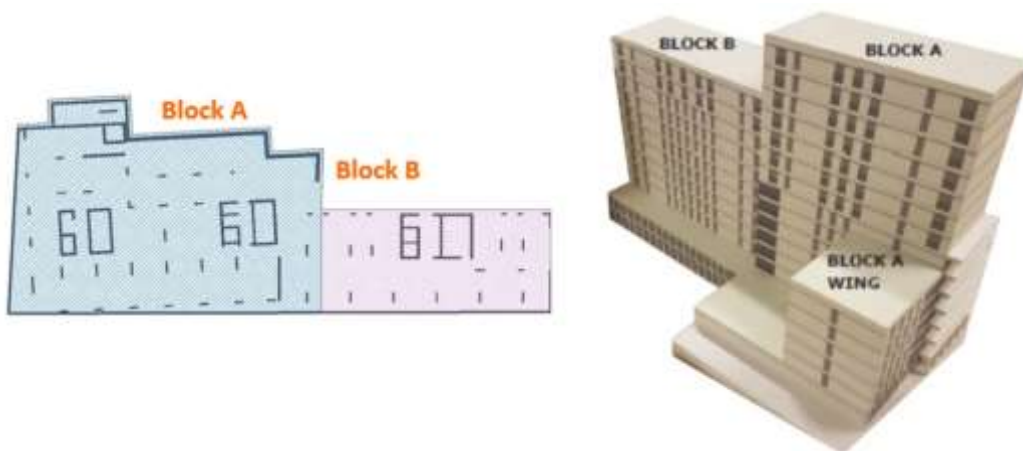


1. La struttura in esame immersa nel suo contesto geotecnico.

L'opera d'arte e il modello strutturale

Nel presente articolo si prende in esame una struttura multipiano in c.a. di nuova costruzione a Milano, il cui progetto strutturale è stato realizzato dalla società di ingegneria B.Cube s.r.l. di Milano in sinergia con lo studio Colleselli & Partners di Padova, che si è invece occupato delle strutture di fondazione. In particolare si ringraziano l'ing. Alessandro Boe, titolare della B.Cube s.r.l., e l'ing. Giuseppe Colleselli, socio della Colleselli & Partners.

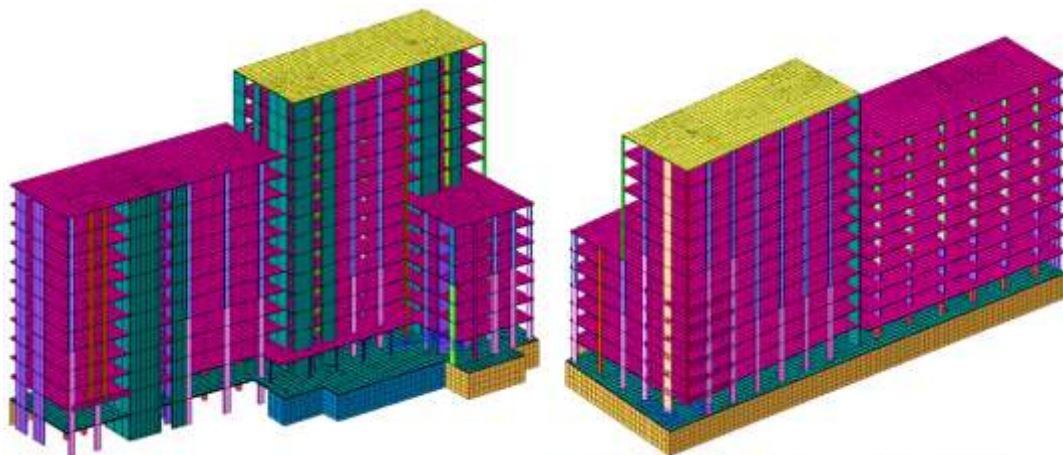
La struttura in esame (fig. 2) è divisa in due blocchi principali; il Blocco A è costituito da 1 piano interrato e 14 piani fuori terra; fa inoltre parte del Blocco A un'ala costituita da 6 piani fuori terra. Per il Blocco A l'altezza totale è di circa 50m. La pianta appare irregolare con misure: 48m di lunghezza, 32m di larghezza. Inizialmente è stata prevista una fondazione superficiale a platea. Il Blocco B è costituito da 1 piano interrato e 11 piani fuori terra per un'altezza totale di circa 40m. Anche il Blocco B presenta una pianta oblunga di 15 x 34m ed è fondato su platea.



2. Struttura in esame: pianta e vista prospettica.

La struttura è stata modellata all'interno del programma di calcolo strutturale Midas Gen, della software house coreana Midas IT (si veda fig. 3).

Agli impalcati è stata conferita la loro reale rigidezza mediante l'inserimento delle solette modellate con elementi *shell*; la stessa tipologia di elementi, in grado di opporre rigidezza a carichi orientati fuori dal loro piano, è stata utilizzata per i muri contro terra; macro elementi *wall* sono stati, invece, introdotti a simulare lame di taglio, vani ascensore e vani scala. Da un lato, l'utilizzo degli elementi *wall* permette di ridurre i gradi di libertà del modello senza perdere in informazioni globali sulla resistenza a taglio della struttura; dall'altro, in fase di *design* gli elementi *wall* sono in grado di recepire le indicazioni normative relative alla gerarchia delle resistenze.



3. Struttura in esame modellata in Midas Gen.

Il progetto delle fondazioni

Inizialmente, il progetto preliminare prevedeva al di sotto della platea la presenza di pali trivellati o colonne in jet grouting con la finalità di ridurre i cedimenti in fase di esercizio. Questa scelta avrebbe comportato certamente un costo aggiuntivo al budget complessivo, oltre ad un ritardo nell'ultimazione dei lavori ed un impatto sia di tipo logistico sia di gestione della commessa. È stata allora richiesta una valutazione circa la possibilità di incrementare lo spessore della fondazione superficiale, senza ricorrere all'inserimento di pali o colonne in jet grouting; ciò avrebbe comportato un notevole risparmio in termini di tempi, costi e difficoltà *in situ* e gestionali.

Al fine di rispondere in modo appropriato e scevro da errori ad una richiesta di questo tipo, i Progettisti hanno ritenuto che non fosse sufficiente una schematizzazione del terreno di fondazione per mezzo di un semplice letto di molle, seppure resistenti a sola compressione. La certezza che il mero incremento dello spessore della platea, senza l'introduzione di fondazioni profonde, fosse sufficiente a contenere i cedimenti in esercizio poteva essere raggiunta solo tenendo in conto i seguenti aspetti:

- il profilo geologico rilevato dalle indagini *in situ* (si veda fig. 4);
- la differenza di risposta del terreno in accordo ad una rigidezza vergine oppure di ricarico; il terreno, in prima fase sottoposto ad uno scarico a causa degli scavi per la preparazione del sito di costruzione, subisce successivamente un ricarico nel momento in cui l'opera comincia a prender forma. Il carico dovuto al getto dei primi elementi strutturali determina un recupero dello stato di sforzo iniziale, provocando una risposta elastica da parte del terreno; successivamente, quando il livello di sforzo dovuto alla costruzione supera quello generato dal terreno asportato, il terreno *in situ* torna in condizione vergine, manifestando una rigidezza inferiore;

- il contributo di confinamento fornito dal terreno al di sopra del piano di fondazione al di fuori del perimetro di scavo;
- gli effetti sulla risposta del terreno dovuti alla forma della platea;
- la rigidezza della platea;
- la rigidezza della struttura non direttamente a contatto col terreno;
- la reale distribuzione dei carichi.

Negli ultimi tre punti si gioca gran parte dell'interazione terreno-struttura: la risposta del terreno, cioè, è influenzata dalla rigidezza degli elementi strutturali a contatto con esso, che a loro volta si deformano per quanto il terreno stesso permette loro. Di contro, anche la sovrastruttura con la sua rigidezza e con la sua distribuzione di carico assume un ruolo essenziale sullo stato tenso-deformativo della platea.

	Soil type [-]	Thickness			Unit weight	Buoyant unit weight	friction angle	Cohesion	Young's Modulus	Young's modulus (skidding - rebounding condition)
		Level from [m]	To [m]	To [m]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ_k [°]	c_k [kPa]	E [MPa]	E_{ur} [MPa]
Layer1	Man made	-4.0	0.0	-4.0	19.0	9.0	27	0	6	18
Layer2	Medium density layer - Gravel with sand and silt	-6.0	-4.0	-10.0	20.0	10.0	33	0	30	90
Layer3	Low to medium density layer - Silty sand	-3.5	-10.0	-13.5	19.0	9.0	30	0	12	36
Layer4	Medium density layer - Gravel with sand and silt	-4.5	-15.5	-18.0	20.0	10.0	33	0	35	105
Layer5	Low density layer - Silty sand	-3.0	-18.0	-21.0	20.0	10.0	31	0	15	45
Layer6	Medium density layer - Gravel with sand and silt	-1.5	-21.0	-22.5	20.0	10.0	33	0	35	105
Layer7	Low density layer - Silty sand	-2.5	-22.5	-25.0	19.0	9.0	29	0	8	24
Layer8	Dense layer - Gravel with sand and silt	-10.0	-25.0	-35.0	20.0	10.0	36	0	50	150

4. Profilo geologico e parametri geotecnici della stratigrafia presente in situ.

Il modello numerico geotecnico

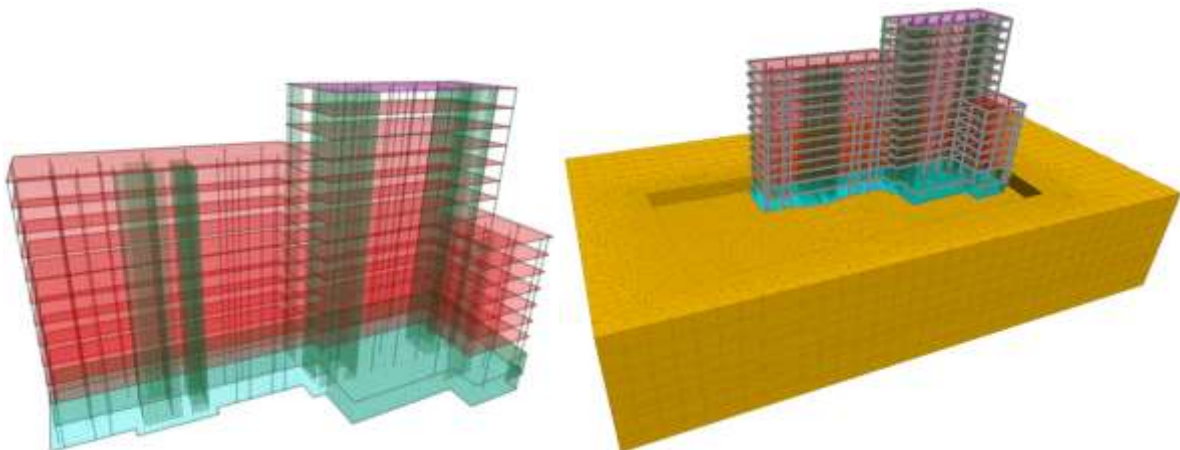
Al fine di considerare in fase di analisi tutti gli aspetti sopra elencati, è stato necessario l'utilizzo di un software specialistico per investigazioni geotecniche, con modellazione al continuo del terreno di fondazione. Una schematizzazione a molle del terreno, seppure in campo elasto-plastico, non sarebbe stata in grado di fornire una soluzione affidabile alla domanda dei Progettisti; infatti, la stima corretta dei cedimenti può essere ottenuta solo riproducendo l'intero seguente *stress path*: condizione geostatica, scarico dovuto ad 8 m di scavo, ricarico (fino alle condizioni vergini), caricamento fino a raggiungere il peso complessivo della struttura, comprensiva di tutti i carichi verticali agenti in condizioni di esercizio (permanenti strutturali e non- e variabili).

Il software scelto è Flac 3D della software house nordamericana Itasca. Flac 3D è caratterizzato da un motore a volumi finiti che risolve in modo esplicito, mediante il metodo delle differenze finite, le equazioni del moto, che in caso di analisi statiche sono opportunamente smorzate. La scelta di operare in dinamica esplicita comporta indubbiamente una serie di vantaggi che un motore implicito non può permettersi:

- innanzitutto, questa metodologia agevola la ricerca della soluzione per problemi che coinvolgono instabilità fisica, come ad esempio grandi deformazioni;

- è possibile seguire relazioni sforzo-deformazione di tipo non lineare senza la necessità di iterazioni aggiuntive all'interno dello step di calcolo; l'introduzione di non linearità non implica quindi tempi di calcolo aggiuntivi;
- a parità di dimensioni e tipologia del problema, il tempo di calcolo aumenta con $n^{3/2}$ dove n è il numero dei nodi; di contro, con metodologia implicita l'esponente diventa 3;
- problemi di grandi dimensioni non necessitano di molta memoria, poiché non esiste una matrice di rigidità da memorizzare;
- in analisi statica la taglia dei volumi finiti non ha impatto sulla bontà dei risultati;
- non è necessario il rispetto della congruenza, in quanto non esistono né una mesh e nemmeno i nodi! Si parla di griglia e di punti della griglia, nei quali il motore risolve algebricamente le equazioni del moto; basta solo indicare al programma quali parti del modello vadano considerate continue, o separate da interfaccia o semplicemente separate.

Il modello strutturale è stato trasferito in automatico da Midas Gen tramite un tool sviluppato dal BIM Development Center di Harpaceas. La realizzazione di questo applicativo è stata possibile grazie, da un lato, all'opportunità offerta dai prodotti Midas di descrivere il modello per mezzo di un file numerico formattato e, dall'altro, grazie al linguaggio di programmazione disponibile in tutti i software sviluppati da Itasca (il linguaggio FISH); inoltre parte del codice è stato ottimizzato lavorando anche in ambiente Python, direttamente accessibile dall'interno di Flac 3D.



5. Vista prospettica della struttura importata.

Un aspetto che ha non poco facilitato l'interazione tra i due programmi è, come accennato in precedenza, la libertà di non dover garantire il rispetto della congruenza ai nodi del mesh, di conseguenza l'Utente ha ampia libertà nella generazione del modello di calcolo da un lato e del terreno dall'altro.

La procedura prevede che un iniziale contesto geotecnico sia preliminarmente preparato all'interno di Flac 3D. Oltre alla modellazione in sé, è necessario effettuare un primo calcolo di assestamento del terreno sotto peso proprio al fine di partire dallo stato di sforzo effettivamente presente al momento dello scavo, a cui però corrisponde uno stato deformativo nullo. Queste sono infatti le reali condizioni al momento dell'inizio dei lavori. Questo aspetto, apparentemente banale, costituisce una delle principali potenzialità dei software geotecnici rispetto a quelli propri del calcolo strutturale.

È essenziale, infatti, sottolineare come il punto di partenza per un corretto calcolo di interazione terreno-struttura sia l'identificazione dello stato "zero" o geostatico. Questa fase iniziale è contraddistinta da un terreno consolidato nel corso delle ere geologiche sotto il suo peso proprio. Il terreno dove insiste l'opera è quindi caratterizzato dalla presenza di uno stato tensionale non nullo ed uno stato deformativo invece assente. La possibilità di fornire delle azioni iniziali ad elementi di volume rappresentanti il terreno oppure di

far assestare il modello sotto la gravità, inizializzando poi a 0 i relativi spostamenti, è tipica dei prodotti di analisi geotecnica, mentre è solitamente assente in quelli di analisi strutturale.

Analogamente, la simulazione della risposta del terreno in accordo alla rigidità elastica piuttosto che vergine durante la fase di scavo e poi di ricarico, può essere colta solo da legami costitutivi specifici per il suolo. Questo aspetto non è necessariamente legato ad una modellazione al continuo; si pensi ad esempio ai legami costitutivi non lineari per le molle del programma Paratie Plus prodotto dalla Ce.A.S. di Milano.

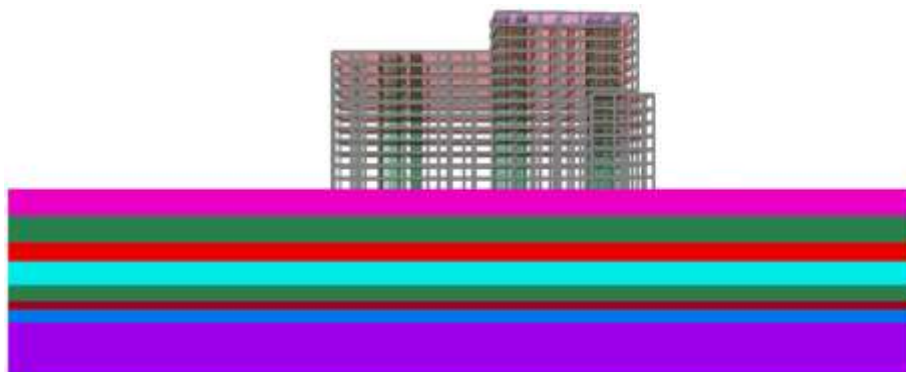
In Flac 3D il terreno è stato descritto mediante il legame costitutivo Plastic Hardening, caratterizzato da incrudimento sia a taglio sia volumetrico, che adotta un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb. Questo legame è in grado di rispondere con i corretti parametri di rigidità a seconda che il terreno si trovi in uno stato di scarico/ricarico oppure di compressione vergine.

Una volta preparato il terreno di fondazione, si è provveduto alla rimozione di un opportuno numero di zone a simulare la fase di scavo. Le zone non scavate al di sopra del livello di fondazione hanno contribuito al confinamento del resto del terreno.

Il link è stato poi in grado di trasferire gli oggetti del modello strutturale:

- le solette in elevazione sono state trasferite come elementi *shell* di Flac 3D scegliendo la stessa formulazione adottata in Midas Gen (nello specifico piastra alla Mindlin);
- la soletta di fondazione può essere trasferita come elemento *liner* di Flac 3D; i *liner* sono elementi 2D dotati di interfaccia, a cui sono state assegnate le proprietà elastiche e di resistenza del magrone;
- travi e pilastri sono stati trasferiti come elementi finiti di tipo *beam* con la stessa formulazione di Midas Gen;
- gli elementi *wall* di Midas Gen (a simulare lame di taglio, vani scala e vani ascensore) sono stati tradotti come elementi *shell*;
- tutte le tipologie di carico sono trasferibili: peso proprio, carichi di pressione sugli elementi *shell*, carichi concentrati e distribuiti lungo le *beam*.

Per quanto riguarda i carichi, ogni combinazione che si desidera trasferire al programma Flac 3D deve essere considerata come un caso di carico elementare. Un automatismo presente in Midas Gen permette di generare tanti Load Case elementari quante sono le combinazioni, senza grandi difficoltà. Il dialogo tra questi due ambienti viene di solito stabilito con riferimento ad alcune combinazioni dove si ritiene essenziale attivare l'interazione terreno struttura.



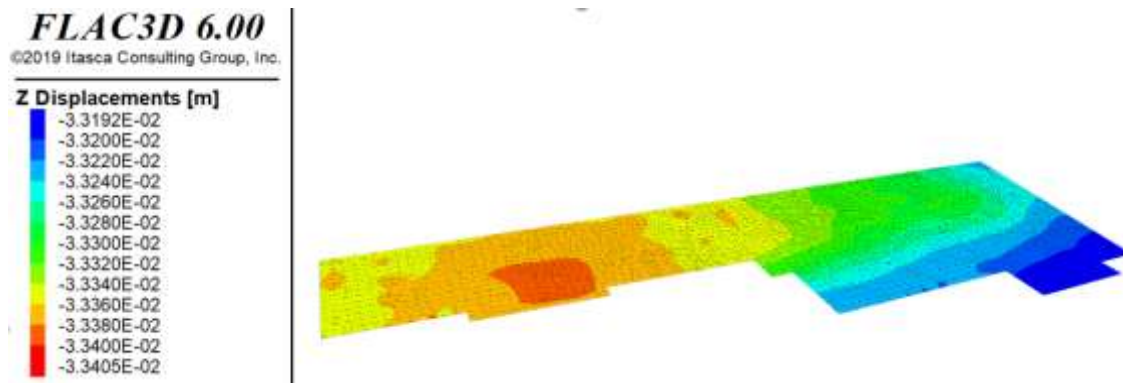
6. Prospetto della struttura importata con visualizzazione della stratigrafia.

Principali risultati

Scopo del presente lavoro era valutare l'entità dei cedimenti della platea in fase di esercizio.

È stato utilizzato un software specialistico per analisi geotecniche (Flac 3D), in cui è stato possibile simulare la diversa risposta deformativa del terreno in relazione alle condizioni di carico (scarico/ricarico oppure compressione vergine); è stato altresì utilizzato un software di calcolo strutturale (Midas Gen), in cui è stato possibile modellare l'esatta forma e rigidezza della soletta di fondazione della struttura in elevazione con i carichi agenti secondo normativa.

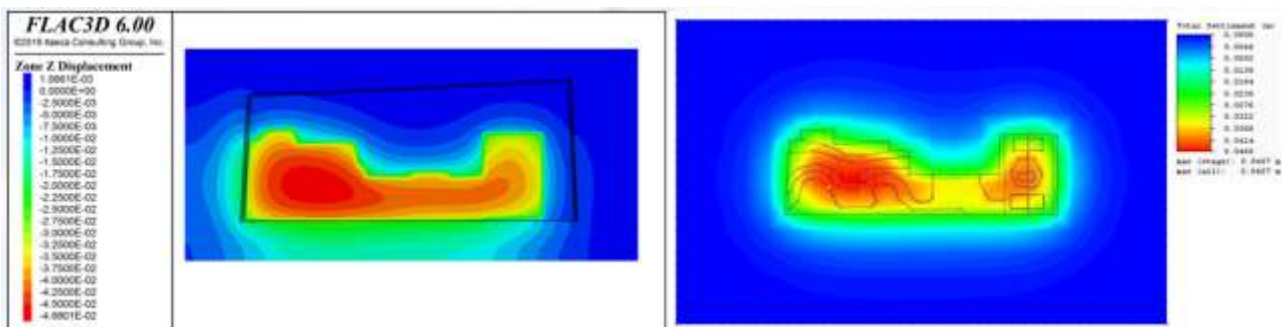
Il link sviluppato da Harpaceas s.r.l. ha permesso il dialogo diretto tra i due software, grazie al quale è stato possibile includere in un'unica analisi tutti i sopra citati aspetti; ciò ha permesso di ottenere un risultato affidabile in termini di cedimenti della platea, che sono stati valutati in 34 mm al massimo (si veda fig. 7). Trattandosi di terreni a grana grossa, tali cedimenti sono attesi a breve termine. Sono stati riscontrati cedimenti differenziali trascurabili (meno di un millimetro). Fenomeni quali ribaltamento e torsione non sembrano svilupparsi.



7. Mappa degli spostamenti della platea.

In sostanza Flac 3D ha dimostrato che platea e sovrastruttura lavorano insieme rigidamente, manifestando cedimenti ridotti ed uniformi; l'accoppiamento quindi di platea e pali o colonne in jet grouting non risulta necessario.

Il modello di Flac 3D è stato infine validato mediante l'approccio semplificato alla Boussinesq, considerando una platea infinitamente flessibile poiché l'approccio non è applicabile a fondazioni rigide. Entrambe le simulazioni hanno portato al medesimo risultato: spostamento massimo di 46 mm (si veda fig. 8) e cedimento differenziale massimo di 20 mm.



8. Confronto Flac 3D – Approccio semplificato alla Boussinesq.

Conclusioni

È stato mostrato un esempio di interoperabilità tra il mondo del calcolo strutturale ed il mondo del calcolo geotecnico.

L'idea dello sviluppo di questo particolare *link* deriva dalla necessità di ottimizzare le informazioni ottenibili dal calcolo numerico, unendo funzionalità proprie del mondo geotecnico (modellazione al continuo dei terreni con legami costitutivi specialistici, gestione dell'acqua, inizializzazione dello stato tensionale, ecc...) con quelle più tipiche di un software di calcolo strutturale. In particolare, nel presente lavoro, la possibilità di inserire nel software geotecnico l'intera struttura con i suoi carichi, ha permesso di tenere in considerazione l'effettiva rigidità e distribuzione di carico della platea di fondazione, massimizzando la fedeltà nella simulazione dell'interazione terreno-struttura.

Lo sviluppo è stato possibile grazie "all'apertura" dei due software utilizzati: Midas Gen permette uno scambio dati (anche parziale) per mezzo di un file numerico formattato, mentre Flac 3D oltre ad avere un linguaggio di programmazione interno, consente di costruire codici ed istruzioni in linguaggio Python.

Ringraziamenti

Per aver concesso la liberatoria per il presente articolo si ringraziano:

- l'Ing. Alessandro Boe, titolare della società di ingegneria B.Cube s.r.l. di Milano;
- l'ing. Giuseppe Colleselli, socio dello studio Colleselli & Partners di Padova.

B.Cube ha sviluppato il modello strutturale. Il trasferimento del modello è stato operato con l'aiuto del supporto tecnico Harpaceas. Il calcolo geotecnico è stato svolto dalla Colleselli & Partners.