

INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA: LE NUOVE FRONTIERE DELL'INTEROPERABILITA'

Ing. Samuele Perni (perni@harpaceas.it)

Sales Engineer Structural and Geotechnical Engineering Department, Harpaceas srl

Ing. Ada Zirpoli (zirpoli@harpaceas.it)

Technical Manager Structural and Geotechnical Engineering Department, Harpaceas srl

ABSTRACT. Nell'articolo si illustra, attraverso il progetto di un edificio alto in cemento armato su fondazione diretta a platea, la nuova metodologia interoperabile tra l'ambiente di calcolo geotecnico Flac3D e quello di calcolo strutturale Midas Gen, finalizzata al calcolo dei cedimenti e alla definizione del sistema fondazionale. Il caso studio rappresenta un esempio estremamente complesso che ha richiesto una raffinata analisi globale di interazione tra terreno, struttura fondazionale e sovrastruttura.

1. INTRODUZIONE

In questi ultimi anni nella comunità scientifica è aumentato molto l'interesse per il tema dell'interazione tra struttura e terreno. La difficoltà di questo tipo di analisi sta nella scelta di un unico modello fisico-matematico che descriva nel modo più appropriato il fenomeno globale sia lato strutturale sia lato geotecnico. Infatti, l'evoluzione della deformazione dei terreni di fondazione sotto l'azione della sovrastruttura, fino eventualmente alla rottura, induce spostamenti relativi e assoluti che causano una modifica dello stato tensionale interno agli elementi strutturali, a quelli in elevazione come a quelli in fondazione a diretto contatto con il terreno stesso. Questa esigenza costituisce una delle sfide concettuali più importanti per quanto concerne il labile confine tra l'ingegneria geotecnica e l'ingegneria strutturale.

La soluzione sta nell'interoperabilità diretta ovvero nella possibilità di far comunicare i due ambienti di calcolo: quello geotecnico e quello strutturale. Lo scopo del progetto in esame è la valutazione degli effetti dell'interazione terreno-struttura con riferimento al progetto esecutivo del sistema fondazionale di un edificio alto in c.a. Il dialogo è assicurato mediante il link tra Midas Gen, strumento leader a supporto dell'ingegneria strutturale e Flac3D, software general purpose (A.Zirpoli, 2020) per le analisi numeriche al continuo in ambito geotecnico. Data la complessità strutturale, il caso si può ritenere emblematico dell'importanza dell'interoperabilità al fine del dimensionamento del sistema fondazionale, garantendo una stima dei cedimenti accurata, che ha portato poi alla decisione di un rinforzo strutturale con colonne di jet grouting.

2. IL CASO DI STUDIO DI EDIFICI A TORRE SU BASAMENTO A PARCHEGGIO INTERRATO DI DUE PIANI

L'intervento prevede la realizzazione di quattro nuovi fabbricati a torre ad uso residenziale a Milano e relativi interrati adibiti a box auto, cantine e locali tecnici.

In particolare, sono previsti due differenti lotti, strutturalmente indipendenti, composti ciascuno da due torri e dai rispettivi interrati. Le quattro torri residenziali presentano un'altezza variabile dai 55 agli 80 m fuori terra e i tre piani interrati.

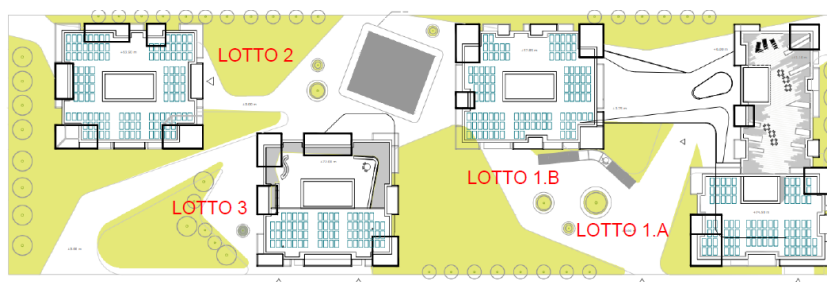


Figura 1. Configurazione area di intervento con la posizione dei singoli lotti

2.1 Modellazione strutturale

Per ragioni di simmetria è stata considerata una singola torre. La torre è un edificio alto in cemento ad uso residenziale costituito da ventisei impalcati poggiante su fondazione diretta a platea. La struttura è a telaio con un nucleo ascensore costituito da setti sismo-resistenti in c.a.

Il modello strutturale è stato realizzato con il software agli elementi finiti Midas Gen, della software-house Midas IT e contempla circa 49.000 elementi tra beam, truss, plate e wall. I carichi gravitazionali, permanenti portati strutturali e non strutturali e i carichi accidentali sono stati applicati attraverso i pressure loads e beam loads su solette e travi rispettivamente.

2.2 Modellazione geotecnica

La torre alta poggia su terreni granulari di prevalente natura sabbioso-ghiaiosa di addensamento crescente con la profondità, con la presenza di alcune lenti sabbiose debolmente limose.

Il modello geotecnico del sottosuolo è stato realizzato con il software FLAC3D 9.0. (Fast Lagrangian Analysis of Continua), sviluppato da ITASCA Consulting, il quale consente di affrontare problemi di meccanica del continuo, determinando gli stati tensionali e deformativi in un dominio tridimensionale, le cui caratteristiche sono definite da leggi di costitutive di tipo elastico o plastico e da imposte condizioni al contorno, implementando il metodo delle differenze finite. Il modello tridimensionale comprende i lotti 1A e 1B, le porzioni di terreno che si estendono per 90 m ad Est del lotto 1A e per 70 m a Nord ed a Sud dei due lotti ed infine il terreno sottostante la fondazione

fino a circa 70m di profondità dalla quota di imposta della fondazione. Quest'ultima rappresenta la sommità del modello. Il confine tra il lotto 1B con i lotti 2 e 3 viene modellato come piano di simmetria in modo tale da massimizzare i cedimenti differenziali. Di seguito la stratigrafia riportata nella Tabella 1:

Tabella 1. Stratigrafia di riferimento

	Spessore (m)	Angolo di attrito (°)	Modulo di Young (Pa)
Strato 1	2	32	70e6
Strato 2	20	35	110e6
Strato 3	38	33	120e6

La falda è presente ad una profondità di circa -15 m dal piano campagna e per l'iniziale analisi geostatica è stato adottato il modello costitutivo rigido-plastico perfetto Mohr-Coulomb.

Per la successiva analisi dei cedimenti il modello del terreno invece usato è stato il modello costitutivo Plastic Hardening (ITASCA Consulting Group, 2023) più appropriato per sviluppare la tematica deformativa di terreni granulari, quando soggetti a fasi di scarico (scavo) e ricarico (nuova costruzione, reinterro ecc.), in quanto è in grado di simulare numericamente il comportamento non lineare dei terreni (teoria della plasticità e incrudimento). In particolare, il modello Plastic Hardening permette di simulare una risposta meccanica incrudente del terreno sia a taglio che volumetrica, tenendo conto anche della variazione di rigidità sia in condizioni di scarico/ricarico che per basse deformazioni.

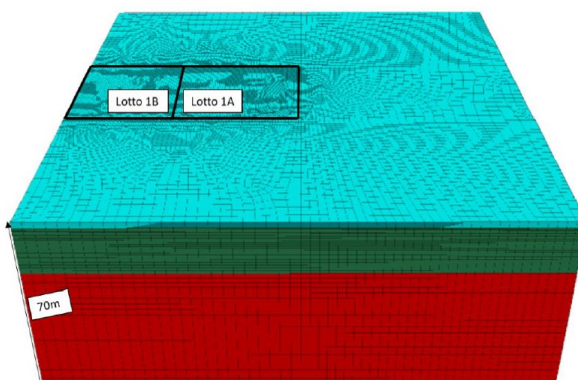


Figura 3. Modello geotecnico

3. LINK FLAC3D-MIDAS GEN

Il modello così completato in Midas Gen è stato poi trasferito, tramite un tool sviluppato dal settore DigitalTransformation di Harpaeas, nel programma geotecnico Flac3D. La realizzazione di questo applicativo è stata consentita, da un lato, dalla possibilità 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 (A.Zirpoli, 2020).

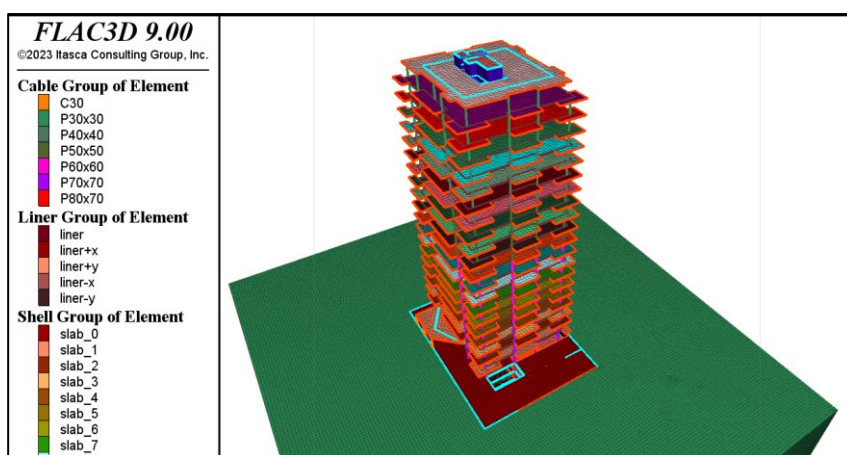


Figura 4. Importazione modello Midas Gen in Flac3D

3.1 Risultati – Fondazione diretta su terreno naturale

Nel seguito sono illustrati i risultati dell'analisi in termini di spostamenti verticali.

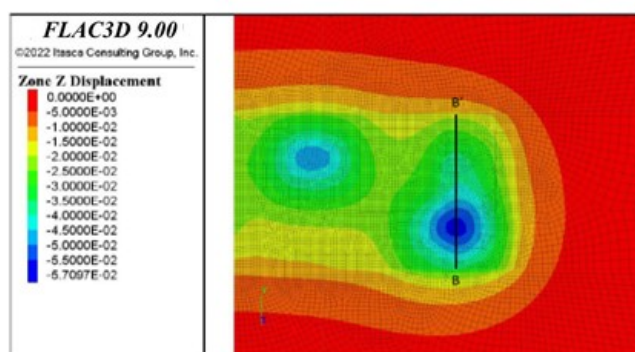


Figura 5. Cedimenti verticali

Il cedimento massimo si registra in corrispondenza del core della torre del lotto 1A ed è dell'ordine dei 6 cm. Il cedimento medio del fabbricato è invece pari a 4 cm. Si sottolinea un cedimento differenziale di circa 2 cm (come da figura relativa alla sezione B-B'). Tali spostamenti, considerato l'assetto fondazionale delle platee dei fabbricati e degli interrati, non rispettano i requisiti progettuali che impongono valori di cedimenti differenziali dell'ordine del centimetro.

3.2 Risultati – Fondazione diretta con consolidamento del terreno - colonne jet grouting

Considerati i notevoli cedimenti differenziali previsti dall'analisi deformativa della fondazione superficiale

si ricorre al consolidamento del terreno per migliorare le caratteristiche di rigidità dello stesso tramite colonne in jet grouting.

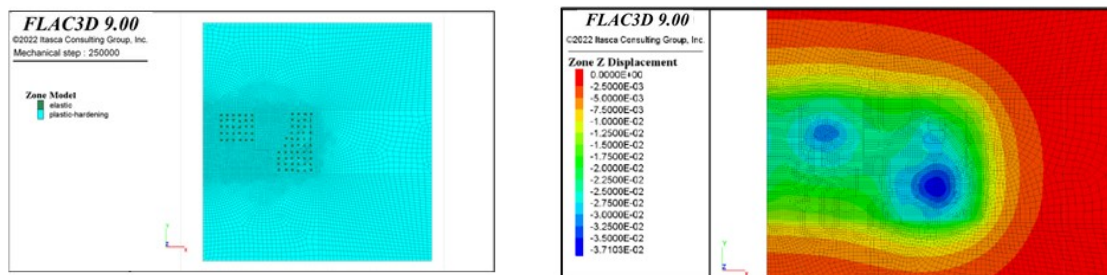


Figura 6. Spostamenti verticali al piano di posa della fondazione: fondazioni su colonne jet grouting

L'analisi numerica eseguita ha le stesse ipotesi dell'analisi precedentemente descritta ma in aggiunta vengono modellate le colonne come 'zone' (elementi solidi) caratterizzate da un comportamento elastico. Le colonne sono posizionate al di sotto delle torri seguendo una maglia 5m x 5m, e prevedono un diametro di 180 cm. Si può notare come l'utilizzo delle colonne in jet grouting abbia ridotto i cedimenti di circa il 30% rispetto al caso di terreno naturale; conseguentemente, si stima un cedimento differenziale massimo di circa 1 cm. Tale valutazione risulta essere in accordo con i requisiti di progetto.

4. 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 ed inizializzazione dello stato tensionale) con quelle più tipiche di un software di calcolo strutturale, tipicamente modellazione agli elementi finiti, definizione dei carichi e dei vincoli. 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. Per problematiche complesse l'uso del link è necessario al fine di ottenere risultati avanzati che la modellazione separata non avrebbe permesso di raggiungere, ottimizzando quindi la scelta progettuale.

L'uso del link tra i due ambienti costituisce la strada futura da percorrere, al fine di eseguire analisi avanzate e globali come sempre più richiesto dalla Normativa, motivo per il quale il link funziona anche in direzione inversa permettendo di importare nel Midas Gen, i cedimenti del terreno dal Flac3D, potendo quindi eseguire le verifiche strutturali con l'effettivo stato deformativo del terreno.

I prossimi passi di sviluppo dell'interoperabilità puntano al passaggio totale dall'ambiente di calcolo strutturale di tutte le funzionalità avanzate come ad esempio analisi per fasi, sezioni composte, carichi da traffico veicolare, accelerogrammi ecc.

BIBLIOGRAFIA

ITASCA Consulting Group, Inc, Itasca Software 9.0 documentation, Choice of Constitutive Model – 2023

A.Zirpoli (2020). L'interazione terreno-struttura per la valutazione del sistema fondazionale di un edificio multipiano- Ingenio – settembre 2020

A.Zirpoli (2020). L'interoperabilità tra calcolo strutturale e geotecnico per lo studio della sicurezza di ponti esistenti - Ingenio – ottobre 2020