

IDENTIFICAZIONE DEL “SOLIDO EQUIVALENTE” PER L’ANALISI DI FENOMENI DI INTERAZIONE INDOTTI DALLO SCAVO DI GALLERIE

Nunzio Losacco, Alberto Burghignoli, Luigi Callisto
*Università di Roma “La Sapienza”
nunzio.losacco@uniroma1.it*

Sommario

Lo studio degli effetti dello scavo di gallerie sulle strutture richiede la modellazione geometrica di dettaglio degli edifici in esame. In questa nota viene proposta una metodologia per l’identificazione di un modello semplificato dell’edificio, detto “solido equivalente”, che sostituisca il modello completo della struttura nelle analisi di interazione, demandando ad una fase successiva l’analisi di dettaglio del solo comportamento strutturale dell’edificio. L’uso del solido equivalente nelle analisi di interazione fornisce risultati in buon accordo con quelli ottenuti utilizzando il modello completo.

Introduzione

Lo studio dell’interazione terreno-struttura mediante analisi numeriche richiede la modellazione congiunta del terreno e dell’organismo strutturale in esame. Se in particolare lo studio è rivolto a valutare gli effetti indotti in un edificio dalla realizzazione di una galleria, le analisi possono richiedere un considerevole sforzo computazionale: risulta infatti necessario includere esplicitamente nelle analisi un volume significativo di terreno di notevole estensione; inoltre, l’edificio deve essere rappresentato nelle analisi con un sufficiente livello di dettaglio geometrico. Una semplificazione delle analisi è spesso auspicabile, non soltanto per l’ovvio sgravio computazionale, ma anche per rendere possibile una migliore comprensione dei fenomeni fisici che presiedono al problema studiato. Per semplificare le analisi di interazione, si può adoperare un approccio parzialmente disaccoppiato. In una prima fase l’edificio viene sostituito da una sua rappresentazione semplificata (il cosiddetto solido equivalente) nelle analisi di interazione. In una seconda fase, gli spostamenti ottenuti dall’analisi precedente sono applicati, in maniera disaccoppiata, ad un modello adeguatamente dettagliato del solo edificio, per studiarne il comportamento strutturale.

In questa nota si descrive una metodologia per l’identificazione del suddetto solido equivalente e si valutano le prestazioni dello stesso. Negli esempi presentati si fa uso di analisi numeriche tridimensionali, tutte svolte con il programma di calcolo agli Elementi Finiti Tochnog Professional versione 5.3 (Roddeman, 2010).

Definizione e identificazione del solido equivalente

Dato un solido di cui siano fissati geometria e modello costitutivo, esso risulta equivalente alla struttura esaminata se, all’applicazione di una perturbazione arbitraria, fornisce una risposta che approssima nel miglior modo possibile la risposta della struttura completa all’applicazione della medesima perturbazione. Naturalmente, la definizione precedente può essere soddisfatta solo per alcune classi di perturbazioni, ed è evidente che la procedura di identificazione del solido equivalente deve essere opportunamente orientata a riprodurre correttamente la classe di perturbazioni di maggior interesse, che nel caso specifico è costituita dagli spostamenti indotti dalla realizzazione di una galleria.

Nel presente studio l'identificazione del solido equivalente prevede l'esecuzione di analisi disaccoppiate con modelli isolati dell'edificio completo e di una sua rappresentazione semplificata. In queste analisi viene applicata alla base dei due modelli strutturali una distribuzione di cedimenti tipica per il problema in esame, costituita dai cedimenti previsti in condizioni di campo libero, ben descritti da una curva di probabilità gaussiana. In entrambi i modelli strutturali, l'applicazione di spostamenti imposti alla base genera una distribuzione di reazioni vincolari, con risultante nulla, che può essere descritta mediante l'andamento della forza di taglio risultante. Le proprietà meccaniche del solido equivalente sono quelle che minimizzano lo scarto fra le forze di taglio ottenute sul modello completo e quelle calcolate per il solido di geometria semplificata.

La geometria scelta per il solido equivalente coincide per forma e dimensioni con la parte immersa dell'edificio completo (fondazione e piani di interrato). Per esempio, la Figura 1 mostra, nel piano di una facciata, lo schema geometrico dell'edificio completo e del corrispondente solido equivalente. Il comportamento del materiale costituente l'edificio è descritto da un legame isotropo linearmente elastico, caratterizzato dai parametri indipendenti E e ν . Il comportamento del solido equivalente è invece lineare elastico trasversalmente isotropo, con asse di simmetria materiale in direzione verticale, caratterizzato da cinque parametri indipendenti. Variando due di questi parametri, detti E_1 e G_2 , è possibile modificare indipendentemente la rigidezza flessionale e la rigidezza al taglio del solido nel piano della facciata.

I valori di primo tentativo di E_1 e G_2 sono ricavati imponendo l'uguaglianza fra le rigidezze del modello ridotto e quelle dell'edificio completo calcolate analiticamente. Per il solido equivalente, quindi, inizialmente si pone: $E_1 = E_1^* = EI/I_{eq}$ e $G_2 = G_2^* = GA/A_{eq}$, dove I e A sono rispettivamente il momento di inerzia e l'area della sezione trasversale delle facciate dell'edificio, calcolate tenendo conto della presenza delle aperture secondo lo schema proposto da Pickhaver (2006); I_{eq} e A_{eq} sono invece le omologhe proprietà del solido equivalente.

La Figura 2 mostra un esempio degli andamenti della forza di taglio per la struttura completa e per il modello semplificato. È possibile notare che i valori assoluti del taglio calcolati nel modello ridotto con i parametri meccanici di primo tentativo sono sempre più alti, a parità di ascissa, di quelli ottenuti per la struttura completa. La minimizzazione dello scarto fra le due curve permette di individuare un coefficiente riduttivo α_{eq} da applicare a entrambi i moduli E_1^* e G_2^* per ottenere i parametri del solido equivalente. In Figura 2, quindi, è riportato anche l'andamento del taglio ottenuto per il solido equivalente, avente $E_1 = \alpha_{eq}E_1^*$ e $G_2 = \alpha_{eq}G_2^*$.

Il procedimento descritto è stato applicato sia ad una singola facciata sia ad un edificio a pianta rettangolare costituito da quattro facciate. In entrambi i casi è stato effettuato uno studio parametrico variando i rapporti geometrici e la percentuale di aperture sulle facciate. Inoltre è stata fatta variare l'effettiva configurazione deformata della struttura, cambiando la posizione e l'orientazione del modello rispetto all'asse del campo di spostamenti imposto.

A titolo di esempio in Figura 3 si riporta l'andamento di α_{eq} al variare del rapporto di forma H/L nel caso di singola facciata con percentuale di aperture 19%. È possibile osservare che α_{eq} dipende solo da H/L e dal rapporto L/H' tra la lunghezza della facciata e l'altezza del solido equivalente. α_{eq} non dipende invece dalla effettiva configurazione deformata imposta. Questa evidenza permette di attribuire un carattere generale ai risultati mostrati in Figura 3 per la classe di problemi studiata.

Analisi numeriche di interazione.

Per valutare l'adeguatezza della procedura di equivalenza proposta, è necessario controllare che il solido equivalente individuato rappresenti adeguatamente il comportamento strutturale per la classe di problemi di interazione studiata. Per il presente studio, il termine di paragone per valutare le prestazioni del solido equivalente è costituito dall'interazione di un modello strutturale completo con lo scavo di una galleria superficiale.

Schema del problema.

La geometria e il modello geotecnico per il problema analizzato sono rappresentativi di situazioni incontrate nell'attraversamento del centro storico di Roma nell'ambito della realizzazione della Metro C (tratta T2). Analogamente, la struttura scelta come caso di studio è rappresentativa - per geometria, percentuale di aperture e parametri dei materiali - di alcuni edifici in muratura di epoca rinascimentale presenti nel centro storico di Roma. La Figura 4 mostra la stratigrafia del sito in esame e una sezione trasversale della galleria. La distribuzione delle pressioni interstiziali è idrostatica con quota piezometrica al contatto fra i riporti e le argille limose.

Si è tenuto conto dello scavo di un'unica galleria, ad asse rettilineo e a profondità costante. La galleria, a sezione circolare, è realizzata tramite una TBM a scudo chiuso di tipo EPB. Il rivestimento è costituito da anelli di CA prefabbricato di spessore 30 cm. Nel tratto in esame lo scavo è effettuato interamente nello strato di argilla limosa.

L'edificio di riferimento è costituito da quattro facciate ed ha quattro piani fuori terra. La fondazione dell'edificio è costituita semplicemente dal prolungamento delle facciate fino al piano di posa, posto al tetto dello strato di argilla (profondità $z = -6$ m). In tutte le analisi si è studiato il caso semplice di un edificio con asse ortogonale rispetto all'asse della galleria. Sono stati analizzati i due diversi casi di edificio simmetrico e asimmetrico rispetto all'asse della galleria, il primo soggetto quindi a una deformata principalmente di *sagging*, l'altro a una deformata di *hogging*.

Dettagli delle analisi numeriche

Il comportamento dei terreni è stato descritto con un modello costitutivo elastico isotropo-perfettamente plastico con criterio di snervamento di Mohr-Coulomb e dilatanza nulla. Il modulo di Young a piccole deformazioni E'_0 è una funzione della tensione efficace media p' . L'andamento di E'_0 con la profondità è mostrato in Figura 5. Nelle analisi delle fasi di scavo, il modulo di Young è assunto pari ad un'aliquota costante del valore a piccole deformazioni, per tenere conto dei livelli medi di deformazione attesi nel terreno sovrastante la galleria.

Tutte le analisi sono state effettuate in termini di tensioni efficaci, assumendo un comportamento non drenato per il solo strato di argilla. Il tetto delle ghiaie di base, considerato molto rigido rispetto agli strati sovrastanti, costituisce il bordo inferiore del reticolo di elementi finiti. I valori dei parametri meccanici per i terreni inclusi nell'analisi sono riportati nella Tabella 1.

Il comportamento del rivestimento della galleria e dell'edificio è stato descritto con un modello costitutivo elastico lineare isotropo; i relativi parametri meccanici sono riassunti nelle Tabelle 2a e 2b. Analisi strutturali preliminari hanno evidenziato l'opportunità di trascurare la presenza degli orizzontamenti dell'edificio, che non contribuiscono sostanzialmente alla rigidità complessiva. Prima dello scavo della galleria, è stata simulata la costruzione dell'edificio, in modo da riprodurre uno stato tensionale realistico nei terreni. Una vista assonometrica del modello FE dell'edificio è mostrata in Figura 6.

Le proprietà meccaniche del solido equivalente sono state ottenute attraverso la procedura di identificazione descritta nella sezione precedente. I valori di E_1^* , G_2^* e α_{eq} sono riportati in Tabella 2c. Per riprodurre correttamente lo stato tensionale nei terreni di fondazione, è stata applicata all'estradosso del solido una distribuzione uniforme di forze verticali con risultante uguale al peso della parte fuori terra dell'edificio completo.

Lo scavo della galleria è stato riprodotto simulando passo-passo l'avanzamento del fronte di scavo, con una tecnica a parziale controllo degli spostamenti. Sono stati modellati in maniera semplificata lo scudo della macchina di scavo e il rivestimento. La tecnica adottata prevede l'imposizione al contorno di scavo, nella sezione che separa il rivestimento dallo scudo, di un campo di spostamenti verticali che provochi una ovalizzazione del cavo. Il valore del massimo spostamento applicato in corona è scelto in modo da ottenere, in analisi svolte in condizioni di

campo libero, un fissato valore del volume perso V_L , calcolato al piano campagna. Contemporaneamente, al fronte è applicata una pressione pari alla tensione orizzontale totale preesistente. Dopo la simulazione di ogni avanzamento di scavo, si simula l'installazione di un nuovo anello di rivestimento e si rimuove la condizione sugli spostamenti. Per i dettagli della tecnica adottata per la simulazione dello scavo si rimanda a Losacco (2011).

Risultati delle analisi

Le Figure 7a e 7b mostrano i profili dei cedimenti previsti dalle analisi di interazione alla base di una facciata ortogonale all'asse della galleria, rispettivamente nel caso asimmetrico e nel caso simmetrico. I risultati si riferiscono al termine della analisi, quando il fronte di scavo si trova ad una distanza molto grande dalla sezione esaminata. Nelle suddette figure vengono messi a confronto i risultati ottenuti utilizzando il modello completo dell'edificio con quelli derivanti dall'uso del solido equivalente nelle analisi di interazione. Viene mostrato, inoltre, il profilo dei cedimenti previsto alla stessa quota dalle analisi di campo libero, a parità di spostamenti applicati al contorno di scavo. Il valore del volume perso indicato nelle figure ($V_L = 3.0\%$) si riferisce alla condizione di campo libero. Un tale valore di V_L , molto elevato rispetto ai valori previsti per gallerie realizzate con macchine EPB nel contesto geotecnico descritto, è stato scelto allo scopo di mettere in risalto eventuali differenze fra i risultati ottenuti con le diverse analisi.

Dall'esame delle suddette figure risulta evidente l'effetto della presenza dell'edificio, la cui rigidità globale tende a ridurre la curvatura del profilo dei cedimenti. I profili di cedimenti ottenuti con l'uso del solido equivalente prima definito sono in ottimo accordo con i corrispondenti risultati ricavati con il modello strutturale completo, sia nel caso di edificio asimmetrico sia in quello di edificio simmetrico rispetto all'asse della galleria, con una differenza appena maggiore in quest'ultimo caso.

I risultati mostrati sono stati successivamente elaborati in termini di indicatori del danno, con riferimento al modello di trave tozza (Burland and Wroth, 1974). Si è così potuto procedere alla stima della categoria di danno atteso sulla struttura in elevazione in base alla classificazione proposta da Burland (1995). La Figure 8a e 8b mostrano i punti rappresentativi del danno previsto sulla facciata in esame per ciascuna analisi svolta. I punti rappresentativi dello stato di danno ottenuti con il solido equivalente e con il modello completo dell'edificio sono pressoché coincidenti tra loro a parte un leggero scostamento dovuto al diverso valore delle deformazioni orizzontali alla base previsto nei due tipi di analisi. L'effetto degli allungamenti orizzontali è in ogni caso modesto. Negli stessi diagrammi è indicato lo stato di danno che si otterrebbe calcolando Δ/L e ϵ_h dai risultati delle analisi di campo libero (per una definizione di questi parametri si veda ad esempio Burland, 1995). È interessante notare che in quasi tutti i casi il danno atteso ricade in categoria 0.

A scopo di verifica, nelle analisi di interazione con il modello strutturale completo, la categoria di danno è stata valutata anche a partire dalla distribuzione della massima deformazione principale (di allungamento) ottenuta sulla facciata. Il massimo allungamento riscontrato sulla facciata è risultato essere in buon accordo con il valore estrapolato dalle carte di danno di Burland.

Tabella 1. Parametri dei terreni inclusi nelle analisi.

Strato	γ (kN/m^3)	K_0	φ' ($^\circ$)	c' (kPa)	E'_0 (GPa)	ν
Riporto	18.5	0.5	30	5	vedi Figura	0.3
Argilla	18.2	0.645	25	20	vedi Figura	0.3

Tabella 2. Parametri meccanici degli elementi strutturali.

(a) Rivestimento della galleria.			(b) Edificio.			(c) Solido equivalente.			
γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν	γ (kN/m ³)	E_1^* (GPa)	G_2^* (GPa)	α_{eq}
25.0	30.0	0.15	18.5	1.5	0.20	18.5	98.5	2.18	0.53

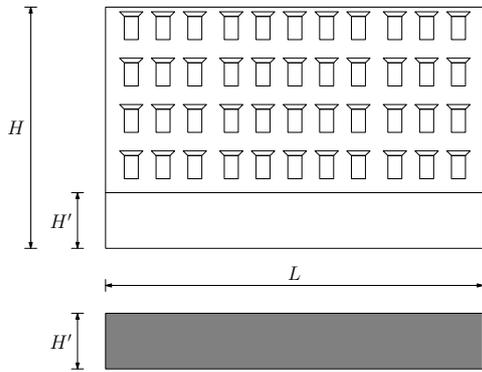


Figura 1. Geometria della struttura e del solido equivalente.

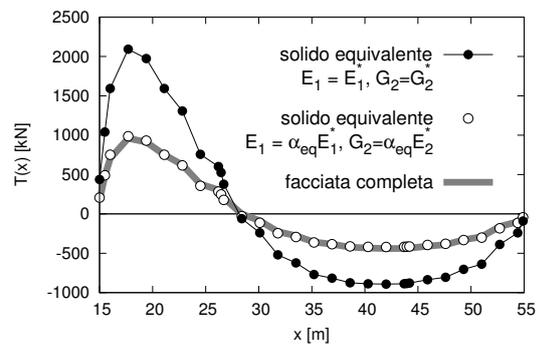


Figura 2. Andamento del taglio prima e dopo l'ottimizzazione.

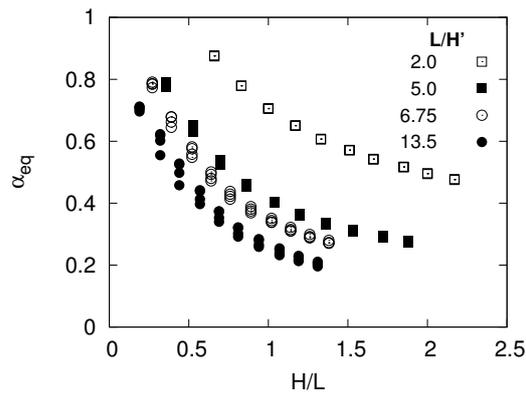


Figura 3. Dipendenza di α_{eq} da H/L .

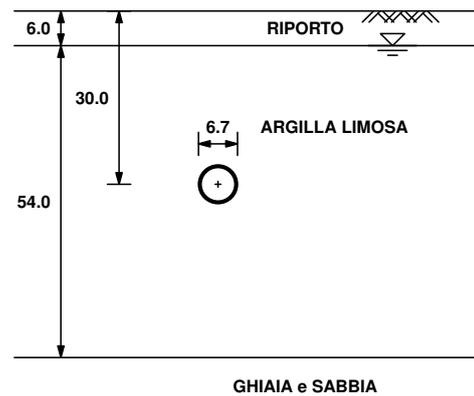


Figura 4. Modello geotecnico del problema.

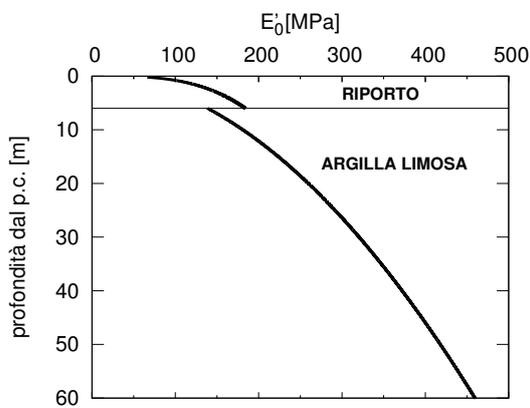


Figura 5. Andamento di E_0' con la profondità.

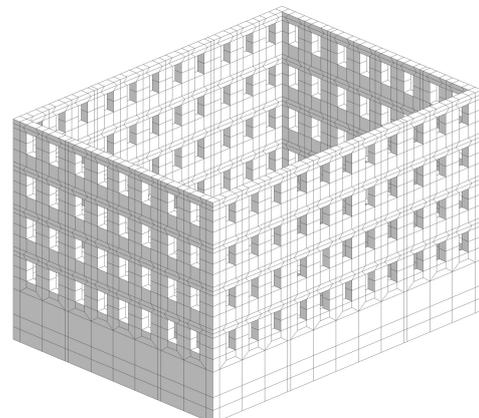


Figura 6. Modello FE dell'edificio.

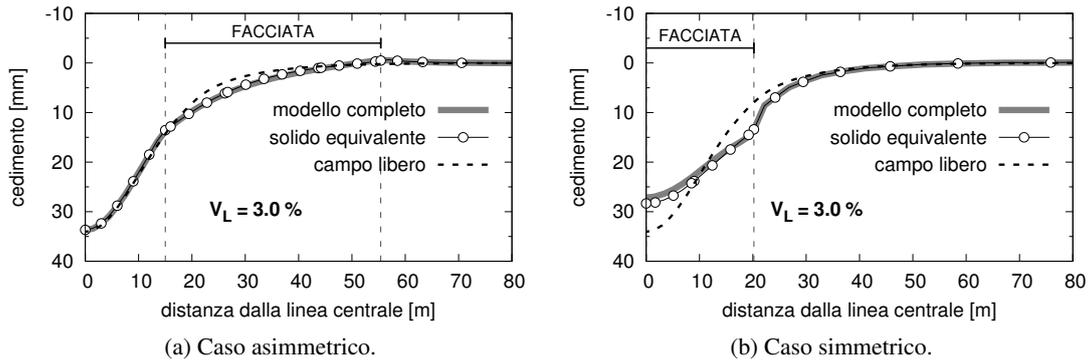


Figura 7. Cedimenti alla base della facciata.

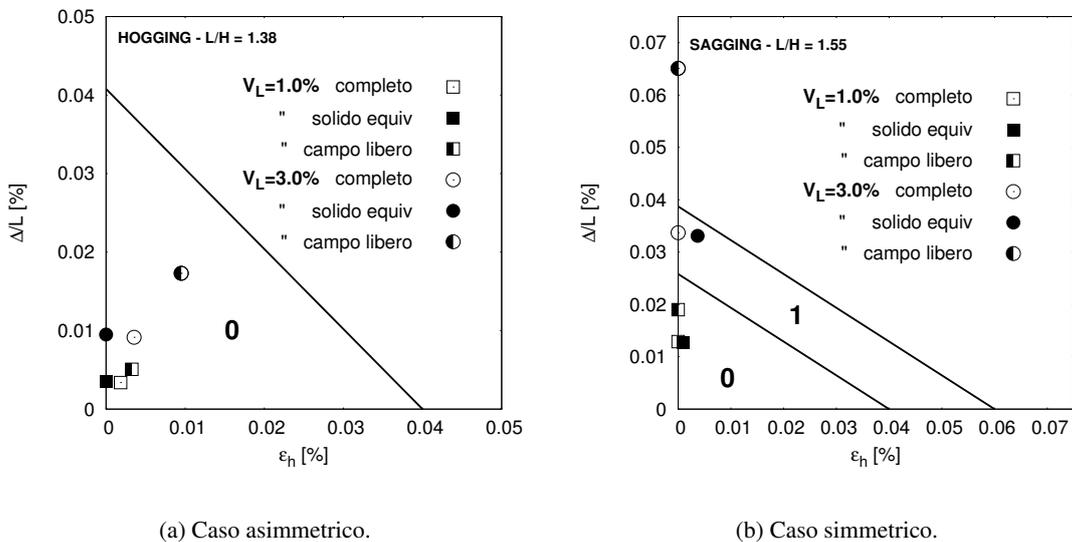


Figura 8. Danno atteso sulla facciata.

Bibliografia

- Burland, J. B. (1995). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Invited Special Lecture. In Ishihara (ed.), *1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, IS Tokyo '95*. Balkema, Rotterdam.
- Burland, J. B. and Wroth, C. P. (1974). Settlement of buildings and associated damage. In *Proc. Conference. 'Settlement of structures'*. Pentech Press, London.
- Losacco, N. (2011). *Development and testing of a simplified building model for studying soil-structure interaction problems due to tunnelling in soft ground*. PhD thesis, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, "La Sapienza" Università di Roma. In preparation.
- Pickhaver, J. A. (2006). *Numerical modelling of building response to tunnelling*. PhD thesis, Department of Engineering Science, University of Oxford.
- Roddeman, D. G. (2010). *Tochnog Professional User Manual, version 5.3*. FEAT, www.feat.nl.