

ANALISI NUMERICA CON APPROCCIO ALE DI UN MODELLO FISICO DI SCUDO EPB

Nunzio Losacco

Università di Roma - Tor Vergata
nunzio.losacco@uniroma2.it

Giulia M. B. Viggiani

Università di Roma - Tor Vergata
viggiani@uniroma2.it

Justin Bel

Université de Lyon - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
justin.bel@entpe.fr

Denis Branque

Université de Lyon - Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
denis.branque@entpe.fr

Sommario

In questa nota vengono mostrati i risultati di analisi numeriche agli elementi finiti dello scavo meccanizzato di una galleria, effettuate con l'approccio Arbitrario Lagrangiano-Euleriano. La tecnica proposta consente di ottenere la perdita di volume e la pressione al fronte come risultati delle analisi, utilizzando come dati di ingresso la geometria, il modello geotecnico e i parametri operativi della macchina di scavo. L'applicabilità della tecnica proposta è verificata tramite il confronto delle previsioni numeriche con i risultati di un esperimento in scala. Infine sono mostrati i risultati di uno studio parametrico in cui si valuta l'effetto della rigidità del terreno e del regime di scavo.

1. Introduzione

Per lo studio degli effetti indotti dallo scavo meccanizzato di gallerie in terreni sciolti si rende spesso necessario ricorrere ad analisi numeriche, anche tridimensionali, con il metodo degli elementi finiti (FEM). Generalmente in queste analisi si opera una forte semplificazione del processo di scavo introducendo condizioni al contorno in prossimità dello scudo (Losacco *et al.*, 2014a) opportunamente calibrate in modo da ottenere, al termine dello scavo, un certo valore della perdita di volume e una distribuzione realistica di cedimenti in superficie. Per simulare l'effetto di sostegno in uno scudo a pressione di terra (EPB), si applica al fronte una distribuzione di pressione simile a quella litostatica.

La scelta del valore atteso della perdita di volume, rispetto a cui calibrare la perturbazione fittizia applicata al contorno del cavo, si basa sull'esperienza e su dati di letteratura ed è quindi piuttosto arbitraria. Allo stesso modo, la distribuzione di pressione al fronte adottata nelle analisi è poco realistica per uno scudo di tipo EPB, nel quale la pressione di sostegno effettivamente applicata è frutto dell'interazione fra il terreno pressurizzato nella camera di scavo, il terreno al fronte e la parte chiusa della testa fresante. I risultati delle simulazioni effettuate con tali modelli semplificati mostrano una scarsa sensibilità al valore della pressione applicata al fronte (Viggiani e Soccodato, 2004) tranne che per i valori estremi, contrariamente all'evidenza sperimentale.

In una nota precedente (Losacco *et al.*, 2014b) è stata introdotta una tecnica per la simulazione dello

scavo di una galleria con scudo EPB mediante un'analisi agli elementi finiti con formulazione arbitraria lagrangiana-euleriana (ALE; Donea *et al.*, 2004). La tecnica presentata non richiede l'introduzione di ipotesi aggiuntive sul volume perso atteso o sulla distribuzione della pressione di sostegno al fronte che, al contrario, sono risultati delle analisi. I parametri di ingresso delle analisi svolte sono esclusivamente il modello geotecnico, la geometria e i parametri operativi dello scudo EPB, in particolare il rapporto tra la velocità di avanzamento della macchina e la quantità di terreno estratto dalla camera di scavo nell'unità di tempo. L'efficacia del metodo proposto è valutata tramite un confronto tra i risultati delle analisi numeriche e i dati di un esperimento in scala di uno scavo in sabbia con scudo EPB realizzato presso l'ENTPE di Lione (Berthoz, 2012), nell'ambito del progetto europeo NeTTUN.

2. Modello in scala

Il modello fisico studiato è stato descritto in Losacco *et al.* (2014b), una sezione schematica è mostrata in Fig. 1a e le principali caratteristiche geometriche e operative sono brevemente riassunte nel seguito. La macchina di scavo è costituita da uno scudo di acciaio perfettamente cilindrico di diametro $D = 0.55$ m e asse a $z_0 = 0.875$ m dalla superficie del terreno. Azionando dei martinetti idraulici lo scudo viene fatto avanzare con velocità di circa 4 mm/min all'interno di un cassone di dimensioni $2.0 \text{ m} \times 1.3 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$. Il cassone è riempito con sabbia d'Hostun (Flavigny *et al.*, 1990), frazione S28, una sabbia quarzosa caratterizzata da $D_{50} = 0.35$ mm e uniforme ($U = D_{60}/D_{10} = 1.4$), asciutta. La massima lunghezza dello scavo è 0.95 m. La testa fresante ha lo stesso diametro dello scudo e presenta aperture sul 35% dell'area totale; durante l'avanzamento dello scavo la testa ruota con velocità angolare costante. La camera di scavo, situata dietro la testa, è tronco-conica e sulla parete, inclinata di circa 45° , sono presenti celle per la misura della pressione del terreno nella camera. È possibile regolare la pressione nella camera agendo sulla velocità di rotazione di una coclea che permette l'estrazione del terreno.

3. Modello numerico

L'esperimento è stato simulato mediante analisi numeriche FEM tridimensionali eseguite con il programma Abaqus Explicit (Dassault Systèmes, 2014). La configurazione iniziale del reticolo di calcolo è mostrata in Fig. 1b. Data la simmetria del problema rispetto a un piano verticale passante per l'asse della galleria, se si trascura la rotazione della testa fresante, nell'analisi è stata modellata solo metà della geometria. Lo scudo e la parete tronco-conica della camera di scavo sono stati modellati come superfici analitiche; a differenza del problema reale, nel modello numerico lo scudo è a faccia aperta, per facilitare la definizione del reticolo e lo studio dell'interazione tra terreno e scudo.

Il programma di calcolo permette di studiare l'interazione tra lo scudo e il terreno con i metodi della meccanica dei contatti (Wriggers, 2002); in particolare, il problema del contatto tra le varie superfici è stato risolto con un metodo di penalizzazione: la pressione di contatto è calcolata tramite molle fittizie la cui rigidità è sufficientemente alta da limitare il più possibile la compenetrazione tra le superfici interagenti; un modesto smorzamento è applicato per evitare le oscillazioni dovute alla natura dinamica del solutore.

Come spiegato in Losacco *et al.* (2015), nel metodo ALE il moto del materiale che riempie gli elementi può essere, in tutto o in parte, svincolato dal moto dei nodi del reticolo. La particolare implementazione del metodo in Abaqus Explicit consente di definire alcune porzioni della frontiera del reticolo numerico (frontiere Euleriane) attraverso cui è consentito il flusso di materiale in ingresso o in uscita. Nel modello numerico il setto posteriore della camera di scavo è una frontiera Euleriana, per cui è possibile simulare l'estrazione del terreno dalla camera di scavo con la velocità desiderata. Tale velocità è fissata in modo tale che la portata di terreno estratta dalla camera di scavo sia uguale al volume nominale scavato nell'unità di tempo, in tal modo si ottiene un regime di scavo "bilanciato",

come nell'esperimento. In linea di principio è possibile fissare la velocità di fuoriuscita del materiale in modo che il volume estratto nell'unità di tempo sia minore (regime di scavo "sotto-bilanciato") o maggiore (regime di scavo "sovrabilanciato") del volume di terreno teorico scavato.

Le facce del reticolo sono frontiere Lagrangiane: esse non possono essere attraversate dal flusso di materia, tuttavia il moto del materiale è svincolato dallo spostamento dei nodi nelle direzioni tangenti a dette superfici. Sulle facce che rappresentano il piano di simmetria del modello, il bordo laterale e il fondo del cassone è imposta una velocità nulla in direzione normale. Lo scavo è simulato adottando un sistema di riferimento solidale con lo scudo, per cui una velocità uguale e opposta a quella di avanzamento è applicata ai nodi della faccia frontale e della faccia posteriore del modello.

Poiché l'integrazione esplicita delle equazioni del moto utilizzata dal solutore è condizionatamente stabile, il passo di calcolo deve essere necessariamente minore del passo di calcolo critico stimato, con effetto deleterio sulla durata dell'analisi. Inoltre, l'algoritmo ALE impiega un tempo di calcolo significativo, soprattutto nella fase di ridefinizione del reticolo. Una strategia comunemente adoperata per ridurre la durata dell'analisi consiste nell'aumentare in maniera fittizia la massa del sistema e la velocità del processo simulato. Tale incremento, però, non può essere arbitrariamente grande per non indurre effetti dinamici non realistici nella soluzione del problema.

In questo studio preliminare, per il terreno è stato scelto un semplice modello costitutivo isotropo, elastico lineare e perfettamente plastico, con criterio di snervamento alla Mohr-Coulomb e flusso non associato. I valori dei parametri fisici e meccanici della sabbia di Hostun utilizzati nell'analisi (modulo di Young E' , coefficiente di Poisson ν' , coesione c' , angolo d'attrito ϕ' , angolo di dilatanza ψ , peso per unità di volume γ , coefficiente di attrito scudo-terreno μ) sono stati desunti dalla vasta letteratura sul comportamento di questo materiale e sono riassunti in Tabella 1.

Lo studio degli effetti indotti dallo scavo di una galleria in condizioni stazionarie è stato svolto attraverso una serie di analisi parametriche in cui sono stati fatti variare il modulo elastico del terreno e il regime di scavo. Data la necessità di estendere la lunghezza di scavo, e quindi di aumentare la dimensione longitudinale del dominio in modo da minimizzare gli effetti di bordo, e per quanto detto sopra riguardo l'onere computazionale dell'analisi, lo studio parametrico è stato svolto in condizioni piane. In particolare è stata studiata una sezione longitudinale del problema di scavo della galleria, avente le stesse dimensioni del modello fisico nella direzione verticale. I bordi verticali del dominio sono posti a 3 m di distanza dal fronte di scavo e, a differenza del modello tridimensionale, sono entrambi frontiere Euleriane, con nodi fissi nello spazio ma con la possibilità di essere attraversati dal flusso di terreno in entrata e in uscita. La velocità del materiale in ingresso dal bordo frontale del reticolo è fissata uguale e contraria alla velocità di scavo, una pressione costante pari alla tensione orizzontale litostatica è applicata al bordo di uscita. La velocità di estrazione del materiale dalla camera di scavo viene fatta variare a seconda che si intenda simulare condizioni di scavo bilanciato, sovrabilanciato o sotto-bilanciato. Data la condizione di deformazione piana assunta nelle analisi, il modello analizzato è assimilabile all'esecuzione di uno scavo con fronte infinitamente esteso in direzione trasversale, più che alla realizzazione di una galleria, per questo motivo i risultati delle analisi parametriche possono essere interpretati solo qualitativamente.

4. Discussione dei risultati

4.1 Analisi del modello fisico dell'ENTPE

Durante l'analisi si rileva un incremento della forza esercitata dal terreno sulla parete della camera di scavo in direzione opposta all'avanzamento, fino al raggiungimento di una condizione quasi-stazionaria, come mostrato in Fig. 2a. La distribuzione della pressione normale lungo l'asse del fronte di scavo, per un avanzamento pari a metà della lunghezza massima di scavo, è riportata in Fig. 2b. Si può notare che la distribuzione è significativamente diversa dal profilo listostatico comunemente assunto nelle analisi di scavo di gallerie con scudi EPB. È evidente che la pressione raggiunge un

minimo in prossimità dell'asse della galleria; i picchi rilevati in prossimità dei bordi dello scudo sono probabilmente dovuti al fatto che nella schematizzazione usata non viene simulata la rimozione del terreno al fronte, per cui lo scudo risulta infisso nel terreno.

In Fig. 3a è rappresentata l'evoluzione della conca di subsidenza longitudinale con l'avanzamento dello scavo; nella stessa figura si riporta la curva stazionaria ricavata dalle misure sperimentali. L'accordo tra i risultati è discreto per un avanzamento inferiore alla metà della massima lunghezza di scavo e particolarmente buono dietro il fronte. Al contrario, nelle analisi si rileva un notevole sollevamento della superficie del terreno davanti al fronte, che diventa via via più evidente al procedere dello scavo e comporta l'allontanamento della conca numerica dalla curva sperimentale stazionaria. La Fig. 3b mostra lo sviluppo della conca di subsidenza trasversale a 60 cm dal bordo iniziale del cassone. L'accordo tra risultati numerici e misure sperimentali è soddisfacente fino a un avanzamento dello scavo pari a 50 cm. Si fa notare che l'analisi preliminare dello stesso problema, svolta con un approccio tradizionale lagrangiano, in cui viene simulato l'avanzamento dello scavo passo-passo e l'applicazione di una pressione al fronte pari a quella media misurata durante l'esperimento, mostra cedimenti superficiali pressoché nulli in tutte le fasi dell'avanzamento (Losacco *et al.*, 2015). La risposta evidenziata dalle analisi ALE è coerente con la pressione di sostegno calcolata che è più del 50% maggiore di quella rilevata sperimentalmente, come mostrato in Fig. 2b. Considerata la relativa semplicità del modello descritto, i risultati possono essere ritenuti soddisfacenti e si propone di estendere il metodo proposto allo studio di casi reali.

4.2 Studio parametrico

La Fig. 4a mostra i profili dei cedimenti superficiali normalizzati ottenuti in tre diverse analisi, svolte in condizioni piane e con regime di scavo bilanciato, utilizzando per il terreno un valore del modulo di Young E' rispettivamente pari a 1 MPa, 3 MPa e 5 MPa. I cedimenti sono normalizzati rispetto al cedimento stazionario w_{ref} ottenuto per l'analisi di riferimento in cui $E'=1$ MPa. È evidente l'effetto dell'aumento della rigidità nel ridurre i cedimenti del terreno. In corrispondenza del fronte di scavo il cedimento superficiale passa da $0.43 w_{ref}$ a $0.26 w_{ref}$ all'aumentare del modulo da 1 a 3 MPa. Nell'analisi con $E = 5$ MPa si osserva un leggero sollevamento della superficie, che raggiunge un picco a una distanza $0.35 D$ davanti al fronte, con D l'altezza dello scavo. Il profilo di cedimenti raggiunge la condizione stazionaria a una distanza di circa $1.5 D$ dietro al fronte. Per l'analisi con $E = 3$ MPa il cedimento stazionario è $0.82 w_{ref}$ mentre non è stato possibile osservare una condizione stazionaria per l'analisi con il modulo più alto; dalla curva può comunque essere estrapolato un valore stazionario pari a $0.58 w_{ref}$.

Le distribuzioni di pressione al fronte ottenute in condizioni stazionarie per le tre analisi sopra descritte sono rappresentate in Fig. 4b. L'andamento è qualitativamente molto simile a quello mostrato in Fig. 2b per l'analisi tridimensionale e non è significativamente influenzato dal valore assunto per il modulo di Young del terreno; il valore minimo, ottenuto in prossimità dell'asse della galleria, risulta all'incirca uguale alla tensione orizzontale litostatica.

L'effetto del regime di scavo è stato studiato variando la velocità di estrazione del terreno dalla camera di scavo di $\pm 10\%$ rispetto al valore adottato nell'analisi di riferimento, svolta in condizioni di scavo bilanciato, e mantenendo costante la velocità di avanzamento. La Fig. 5a mostra che, se il regime di scavo è sovra-bilanciato, i cedimenti aumentano notevolmente, come atteso in un caso reale. In particolare il cedimento massimo, è pari a $1.6 w_{ref}$ e il cedimento in corrispondenza del fronte di scavo è più che raddoppiato rispetto all'analisi di riferimento. Se lo scavo è sotto-bilanciato, al contrario, si osserva un notevole sollevamento della superficie, in accordo con le evidenze sperimentali. L'analisi mostra lo stesso valore del cedimento stazionario ottenuto in condizioni di scavo bilanciato. Per giustificare questo risultato occorre precisare che mentre nel caso di scavo sovra-bilanciato la portata in massa estratta è maggiore del 17% di quella ottenuta nell'analisi di riferimento, nel caso di scavo sotto-bilanciato tale portata è solo 3.2% minore del valore di riferimento. Questa discrepanza è dovuta

al fatto che nelle analisi non è possibile prescrivere la quantità di massa estratta nell'unità di tempo ma soltanto la velocità di estrazione.

Come evidenziato in Fig. 5b, l'effetto del regime di scavo sulla pressione al fronte risulta molto più pronunciato rispetto all'influenza della rigidità del terreno. In particolare, la pressione al centro del fronte di scavo è inferiore alla tensione orizzontale litostatica, al contrario, quando lo scavo è sotto-bilanciato il valore è significativamente maggiore quasi ovunque.

5. Ringraziamenti

Questa ricerca è svolta nell'ambito del progetto europeo NeTTUN: "New Technologies for Tunnelling and UNDERground works" supportato dalla Commissione Europea attraverso il Programma Quadro 7.

Tabella 1. Proprietà fisiche e meccaniche per la sabbia di Hostun

E'	ν'	c'	ϕ'	ψ'	γ	μ
[MPa]	[-]	[MPa]	[°]	[°]	[kN/m ³]	[-]
1.0	0.2	0.0	33	0	13.5	0.19

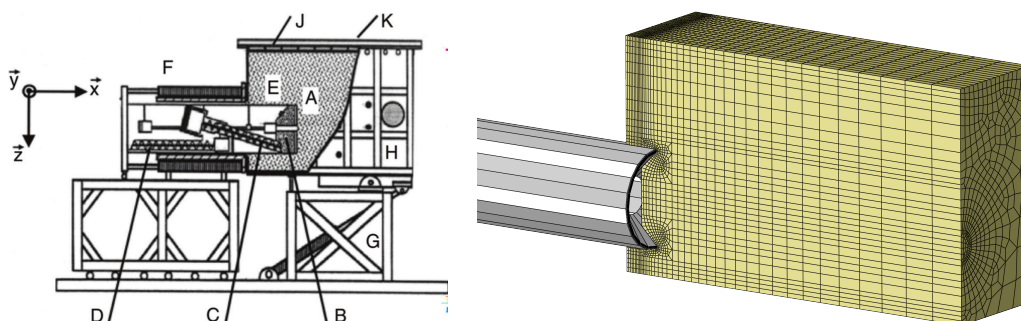


Fig. 1. Analisi 3D: a) modello fisico dell'ENTPE; b) configurazione iniziale del reticolo di calcolo

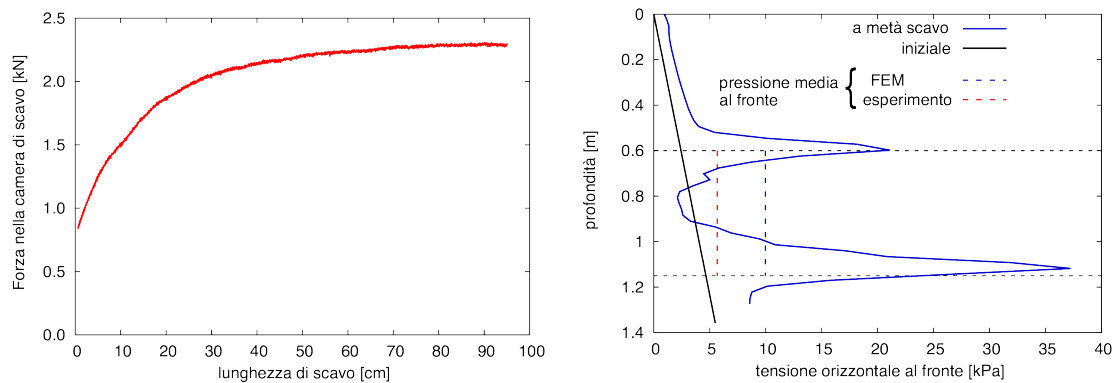


Fig. 2. Analisi 3D: a) evoluzione della forza nella camera di scavo; b) pressione al fronte a metà dello scavo

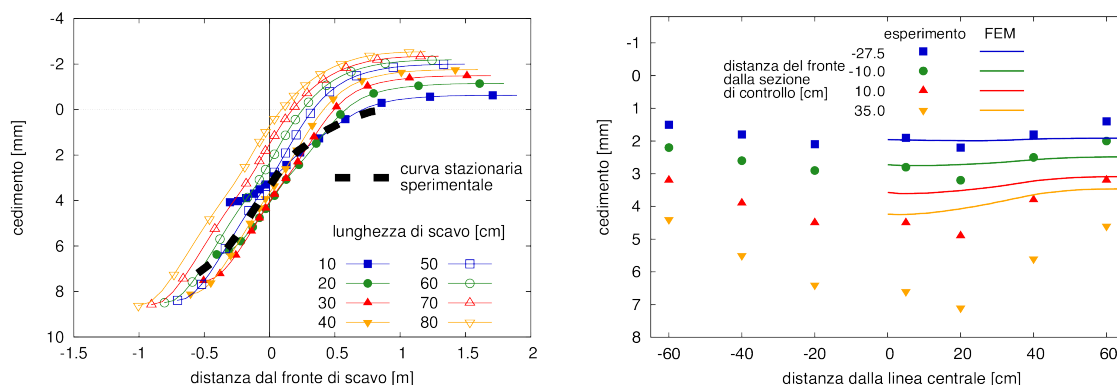


Fig. 3. Analisi 3D evoluzione delle conche di subsidenza: a) longitudinale; b) trasversale

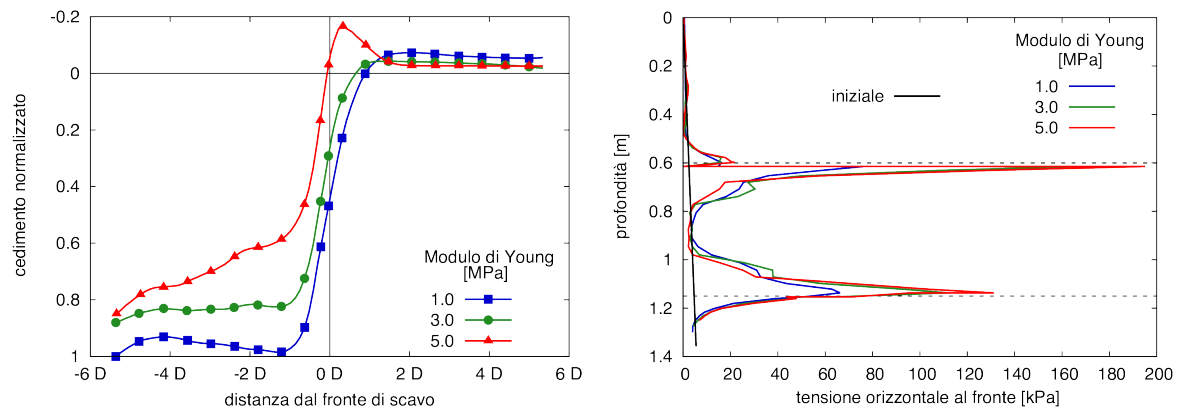


Fig 4. Analisi parametriche 2D, effetto della rigidità: a) cedimenti superficiali; b) pressione al fronte

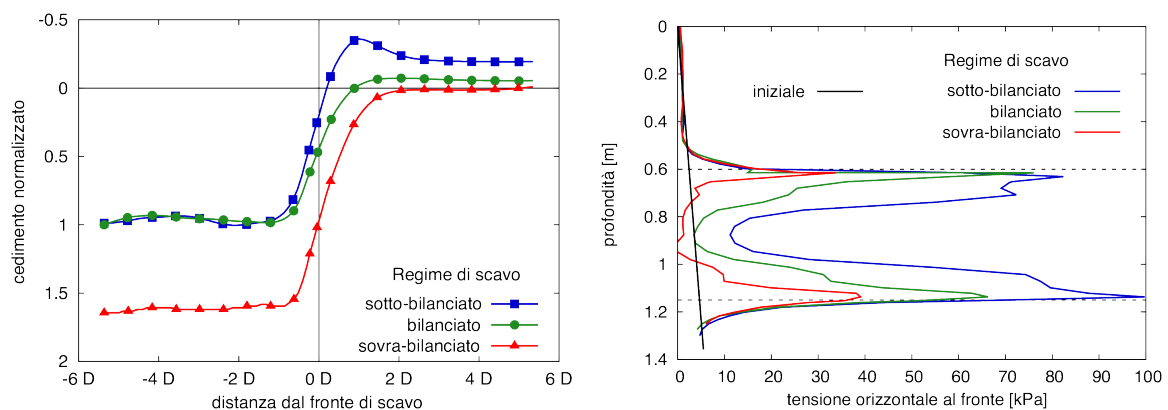


Fig 5. Analisi parametriche 2D, effetto del regime di scavo: a) cedimenti superficiali; b) pressione al fronte

Bibliografia

- Berthoz N. (2012). Modélisation physique et théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés. Phd thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, France.
- Dassault Systèmes. (2014). Abaqus Theory Guide, Version 6.14. Simulia Corporation, Providence.
- Donea J, Huerta A, Ponthot J-Ph, Rodriguez-Ferran A. (2004). "Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods". Encyclopedia of Computational Mechanics. Stein, de Borst, Hughes, Eds. John Wiley & Sons, New York.
- Flavigny E, Desrues J, Palayer B. (1990). "Le sable d'Hostun". *Revue Française de Géotechnique*, 53, 67-70.
- Losacco N, Burghignoli A, Callisto L. (2014a). "Uncoupled evaluation of the structural damage induced by tunnelling". *Géotechnique*, 64(8), 646 – 656.
- Losacco N, Viggiani G M B, Branque D. (2014b). "Modellazione numerica dello scavo meccanizzato di gallerie con il metodo ALE". Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, IARG 2014. Perugia.
- Losacco N, Viggiani G M B, Branque D, Berthoz N. (2015). "ALE FE analysis of a laboratory test for the simulation of mechanised tunnelling in soft soil". World Tunnelling Congress, ITA WTC 2015. Dubrovnik.
- Viggiani G M B, Soccodato F M (2004). "Predicting tunnelling-induced displacements and associated damage to structures". *Rivista italiana di geotecnica*, 38, 11 – 25.
- Wriggers P. (2006). Computational Contact Mechanics. Springer, Berlin – Heidelberg