

Modellazione numerica finalizzata allo studio del comportamento meccanico delle terre: applicazioni 3D per l'analisi della stabilità dell'area orientale dell'abitato di Ortona (CH)

Monia Calista, Barbara Di Giandomenico, Massimo Mangifesta

Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio – Università degli Studi di Chieti-Pescara
Campus universitario, via dei Vestini, 31 66013 Chieti Scalo.
m.calista@unich.it, bdigiandomenico@unich.it, m.mangifesta@unich.it

Numerical modelling finalized to study of mechanical behaviour of the soils: 3D application for the stability analysis of the east area of the Ortona (Chieti, Italy).

ABSTRACT: The evolution of the condition of a slope could be identified into three phases: the elastic one, an elasto-plastic of local instability and plastic which includes a well-defined sliding zone. This methodology has been applied to the stability of the coast zone of Ortona town (Chieti, Italy). The town is situated in the extreme east zone of the hilly mountain Apennines of Abruzzi which consists of the Adriatic coast and its near hinterland. For the reconstruction of physical modelling have been studied new algorithms able to represent material blocks with mechanical and homogenous characteristics. The using methodology considered the most suitable is the discretization for “definite points”. The method consist in the FLAC3D interface itself to a geometrical flexible modeller able to create mesh 3D, using the most complex geometries. The study has been executed using an analysis of stability with the method of the convergence of numerical code.

Key terms: Abruzzi, Numerical modeling, Flac^{3d}

Termini chiave: Abruzzo, Modellazione numerica, Flac^{3d}

Riassunto

L'evoluzione delle condizioni di stabilità di un versante possono essere identificate in tre fasi: una elastica, una elasto-plastica di instabilità locale ed una plastica che identifica una superficie di scorrimento ben definita. Questa metodologia è stata applicata alla stabilità della zona costiera del centro abitato di Ortona (Chieti, Italia).

La città è inserita nella parte più orientale dei rilievi collinari dell'Appennino abruzzese, che comprende la costa adriatica ed il suo più prossimo entroterra. Per la ricostruzione del modello fisico sono stati studiati nuovi algoritmi di calcolo in grado di rappresentare blocchi di materiale a caratteristiche meccaniche omogenee.

La metodologia più attendibile è risulta essere quella per “punti definiti”. Il metodo consiste nell'interfaciare il FLAC3D con un flessibile modellatore geometrico in grado di creare mesh 3D usando geometrie complesse. Lo studio è stato eseguito usando un processo di analisi di stabilità con il metodo della convergenza del codice numerico.

Introduzione

Il paese di Ortona (CH) è sempre stato afflitto da numerosi eventi franosi sviluppatasi principalmente sul versante orientale che si affaccia sul mare Adriatico con una ripida

falesia. Il paese di Ortona è ubicato su un altopiano costituito da sedimenti pleistocenici che s'innalzano fino a quote massime di circa 120 m sul livello del mare. La successione stratigrafica è costituita, dal basso verso l'alto, da argille marnose, sabbie e conglomerati; essa rappresenta il prodotto della sedimentazione della frazione regressiva del ciclo marino Calabriano, dalle argille marnose di base fino ai termini elastici conglomeratici a chiusura del ciclo (regressione). La successione ha generalmente immersione verso N-E con deboli inclinazioni (5°-10°) costituendo una struttura monoclinale a vergenza adriatica.

I principali movimenti, strettamente connessi tra di loro, sono riconducibili a due tipologie franose: per scivolamento rotazionale e per crollo. Ogni frana dell'area ha sempre prodotto una parete verticale, questo perché la formazione dei conglomerati, pur se non del tutto omogenea, poggia su terreni con caratteristiche meccaniche più scadenti (sabbie e argille marnose) che, per erosione o per plasticizzazione, determinano la formazione di mensole nella parte più alta dell'altopiano. Quando vengono superate le sollecitazioni di rottura si ha l'evento franoso con elevate velocità e con superficie di distacco pressoché parallela al bordo della falesia.

L'analisi di stabilità è stata eseguita utilizzando il programma Flac^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua),

un codice di calcolo numerico alle differenze finite, sviluppando, inoltre, specifici algoritmi per dare una stima numerica (fattore di sicurezza) alle deformazioni ottenute tramite la tecnica della riduzione delle resistenze mobilitate in funzione della convergenza o meno del codice numerico.

Contesto geologico e geomorfologico

Dal punto di vista geologico l'area è caratterizzata da sedimenti marini d'età pleistocenica (Calabriano), depositatisi in una depressione d'origine tettonica (Fossa Bradanica) subsidente nel Miocene-Pliocene. I terreni dell'area appartengono alla successione plio-pleistocenica adriatica (Fig. 1) e comprendono una successione terrigena di 3000 m di spessore (Crescenti, 1971a; Casnedi *et alii*, 1994; Ghisetti & Vezzani, 1998). La successione terrigena plio-pleistocenica è limitata a occidente dalle zone di affioramento del Flysch della Laga in corrispondenza delle quali si sviluppano le strutture della Mantagna dei Fiori e del Gran Sasso, a sud dalla struttura della Majella e ad est dall'attuale mare Adriatico.

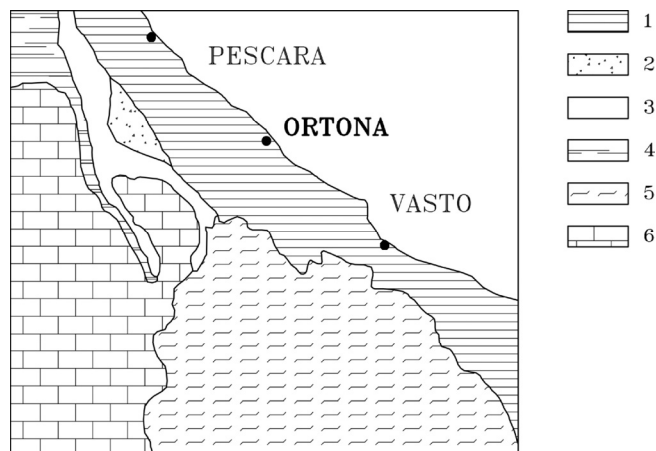


Figura 1 – Schema geologico semplificato dell'area marchigiano-abruzzese. 1) Depositi del Pliocene Superiore-Pleistocene. 2) Depositi del Pliocene medio. 3) Depositi del Pliocene inferiore. 4) Flysch della Laga. 5) Unità Sicilidi. 6) Unità carbonatiche abruzzesi.

Figure 1 – *Marchean-Abruzzi geological scheme. 1) Upper Pliocene and Pleistocene deposit. 2) Middle Pliocene deposit. 3) Lower Pliocene deposit. 4) Sicilidi Unit. 5) Abruzzi carbonate unit.*

La successione stratigrafica plio-pleistocenica e le caratteristiche sedimentarie dell'avanfossa adriatica sono state ricostruite utilizzando le numerose perforazioni petrolifere nel sottosuolo abruzzese e marchigiano. All'interno della successione si definiscono tre sequenze deposizionali limitate dalla discordanza alla base del Pliocene inferiore, da quella tra il Pliocene inferiore ed il Pliocene medio (intermedia) e da quella tra il Pliocene medio e il Pliocene superiore.

I terreni presenti nell'area possono essere suddivisi dal basso verso l'alto in:

- Le argille marnose grigio azzurre, impermeabili, hanno un elevato contenuto limoso e costituiscono la formazione più antica presente nell'area (sulla base di studi micropaleontologici (Catenacci, 1977). Il passaggio alle sovrastanti sabbie avviene gradualmente, in una decina di metri, per l'aumento della frazione siltosa-sabbiosa. Affiora unicamente in prossimità della località Saraceni ed il limite superiore mostra un'inclinazione di circa 10° con immersione ENE.

- Le sabbie costituiscono la formazione immediatamente sottostante al banco di conglomerati, ed il passaggio dall'una all'altra formazione è segnato dalla presenza di un livello argilloso. Sono presenti livelli argillosi lentiformi che delimitano localmente gli acquiferi. La potenza di tale formazione non supera i trenta metri e presenta caratteristiche che la rendono facilmente attaccabile dagli agenti atmosferici. L'età delle sabbie, sulla base di studi micropaleontologici è del Calabriano (Alberti *et al.*, 1967).

- Conglomerati clasto sostenuti, con ciottoli di dimensioni medie di 3-5 cm immersi in una matrice sabbiosa, i clasti sono in prevalenza calcarei. I conglomerati si sviluppano su tutta la parte sommitale del pianoro, conferendo alla formazione un alto grado di permeabilità principalmente dove si ha erosione e decalcificazione dei clasti. La peculiarità di questa formazione è che presenta piccoli strati argillosi che favoriscono la formazione di falde acquifere sospese che, al contatto con le sottostanti sabbie, vengono in superficie con vere e proprie sorgenti (località "fonte a mare"). Nella parte orientale tale formazione presenta scarpate con pareti subverticali ad opera sia delle incisioni fluviali che dell'intervento antropico. L'età di questa unità, sulla base di studi micropaleontologici è del Calabriano superiore (Alberti *et al.*, 1967).

- I materiali di frana sono costituiti da blocchi di conglomerati, detriti, sabbie sciolte e arenarie di natura eterometrica; ciò conferisce al tutto un'elevata permeabilità. La pendenza che i versanti assumono con tali materiali crea una diffusa instabilità che si accentua dove si ha l'emergenza di falde idriche o ruscellamento superficiale di acque meteoriche.

- I terreni alluvionali di fondovalle sono prevalentemente costituiti da materiali sabbioso-argillosi e sono interessati da notevoli escursioni del livello freatico. Per la loro posizione geomorfologica non presentano particolari problemi di instabilità.

- I detriti di scarpata sono presenti principalmente lungo i fianchi dei solchi vallivi e sono caratterizzati da materiali ghiaiosi e sabbiosi.

La struttura si eleva, nell'area in esame, fino a quote massime di circa 120 metri sul livello del mare, ed è evidentemente interessata da movimenti differenziali di sollevamento e abbassamento che hanno causato una dislocazione a blocchi.

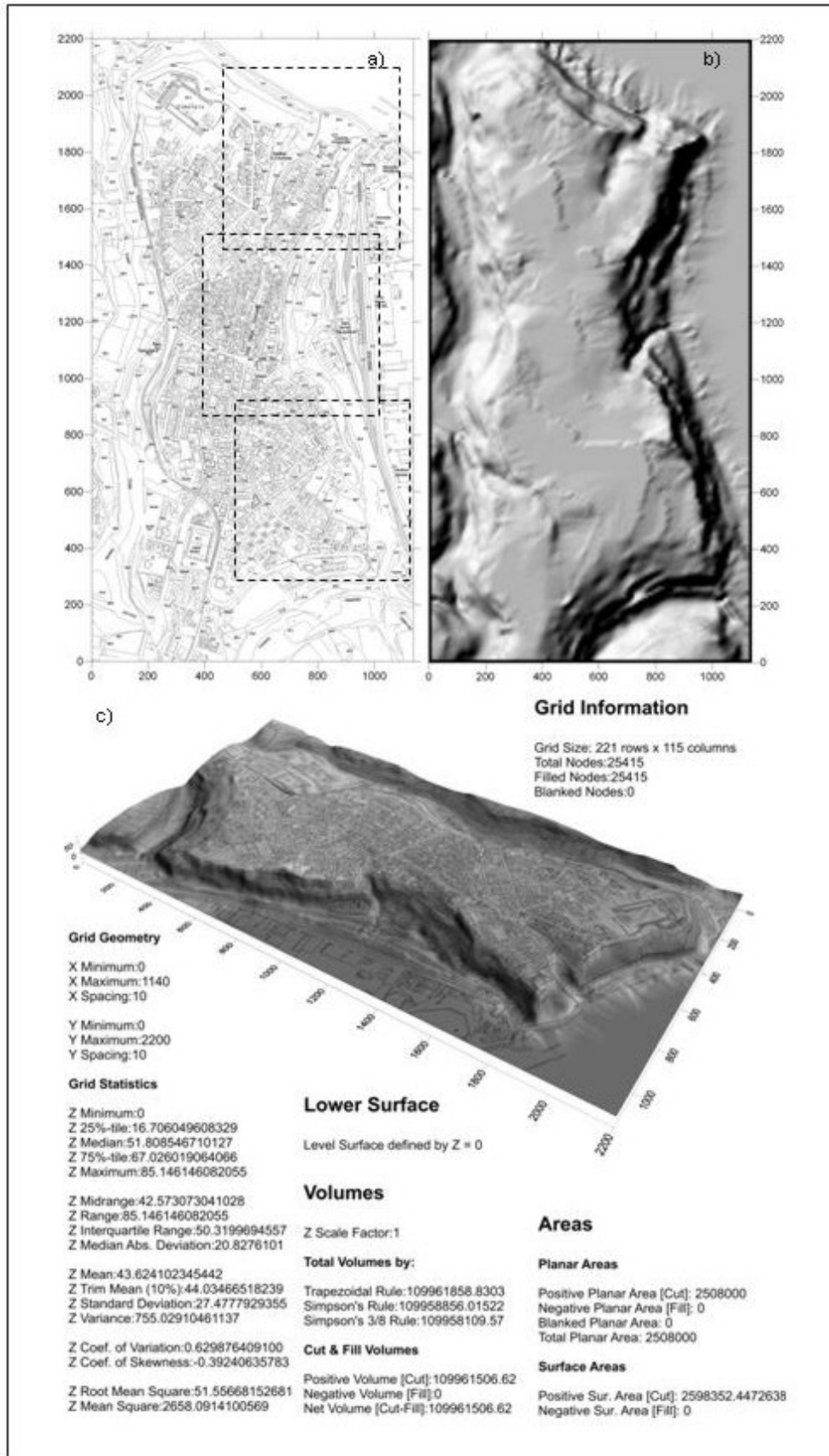


Figura 2 – a) Stralcio topografico di riferimento con la delimitazione dei tre settori utilizzati nella modellazione numerica. b) Ricostruzione Surfer del centro abitato di Ortona (CH). c) Ricostruzione tridimensionale con relative informazioni dell'interpolazione Kriging.
 Figure 2 – a) Topographical extract with represented the three sector used in the numerical modeling. b) Surfer reconstruction of the Ortona village. c) Three-dimensional reconstruction with Kriging interpolation.

Ricostruzione del modello tridimensionale

L'area indagata è situata nella porzione più orientale della regione Abruzzo, a ridosso della costa adriatica, e comprende una porzione del centro abitato di Ortona (CH). La superficie topografica è stata ricostruita mediante un rilievo aereo-fotogrammetrico restituito in scala 1:5000 (Fig. 2a).

Nella ricostruzione del modello digitale 3D del terreno (Digital Elevation Model o Digital Terrain Model), che rappresenta l'evoluzione altimetrica delle tradizionali carte topografiche, particolare importanza è data alla scelta dei metodi d'interpolazione e all'errore prodotto nel caso specifico. I metodi d'interpolazione in campo ambientale, per la rigenerazione di superfici, possono essere distinti in deterministici e stocastici. I metodi stocastici producono un risultato molto più aderente alla realtà in quanto riescono, con le loro funzioni matematiche, a far fronte alle varie problematiche di irregolarità dei siti e degli errori nelle analisi.

Tra i diversi metodi geostatistici (ricostruzione del comportamento spaziale di una variabile in funzione della casualità) il metodo più significativo è il Kriging che permette di interpolare i valori delle variabili misurate in campagna, e di studiarne la variazione assunta verificando la precisione dove non sono state effettuate misure dirette. Il Kriging tiene conto della somma pesata dei punti all'interno di una determinata area. I pesi vengono calcolati all'interno di un insieme di $(n-1)$ equazioni lineari, dove n è il numero di punti usati per la determinazione del punto stimato in ogni specifico sito all'interno della griglia (Matheron, 1967).

Ogni informazione del rilievo è tradotta in una terna di coordinate xyz in modo da trasformare l'informazione lineare in un dato puntuale. Sono state identificate 23.583 terne di coordinate corrispondenti al del numero di punti del campionamento, su un'area di circa 2,508 km² (Fig. 2b).

L'area da analizzare è stata ricalcolata con una distribuzione dei punti a spaziatura regolare $x-y$ di 10x10 (metri) ottenendo 25.415 nodi distribuiti in 221 righe e 115 colonne (Fig. 2c).

Per ottimizzare l'analisi numerica al fine di ottenere una sufficiente precisione di calcolo sono stati isolati tre settori, ciascuno analizzato separatamente, sovrapposti per circa il 15% dell'area (0.408 km²) così come visibile in figura 2a. Infatti la ricostruzione del modello fisico è funzione della complessità delle geometrie da analizzare. Allo scopo è stato effettuato uno studio per la messa a punto di alcuni algoritmi di discretizzazione numerica in grado di prendere in considerazione sia le caratteristiche topografiche, sia le eventuali geometrie sepolte.

Utilizzando i dati d'interpolazione al Kriging, le informazioni nodali sono state sostituite da un insieme di superfici triangolari adiacenti in modo da racchiudere un'area ben definita. Lavorare in un ambiente tridimensionale significa utilizzare corpi volumetrici con forme regolari o irregolari; infatti, ogni litologia (conglomerati, sabbie, argille) è stata identificata con un proprio volume (Fig. 3a) dato dalla sovrapposizione della superficie topografica, di quella relativa al contatto conglomerato-sabbie e della superficie di contatto sabbie-argilla. Per velocizzare il processo di calcolo nel codice Flac^{3D} e vista l'eccessiva irregolarità delle geometrie si è discretizzato il modello volumetrico esclusivamente con maglie tetragonali regolari (Fig. 3b).

Metodologia di analisi

Analizzare la stabilità di un versante significa definire le condizioni di sicurezza in senso globale. Esistono diverse metodologie per la valutazione dello stato di rottura o dello stato limite, tra cui i metodi dell'equilibrio limite (Pendio indefinito, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price, GLE) e i metodi numerici (elementi finiti, differenze finite) al fine di calcolare il fattore di sicurezza (FS).

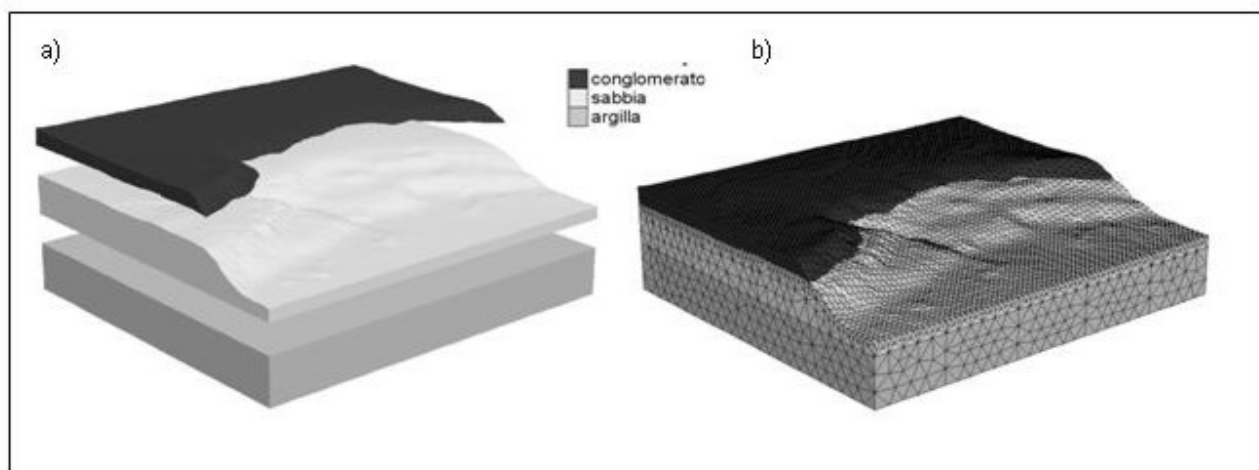


Figura 3 –Settore 2. a) Ricostruzione volumetrica di ogni singola litologia. b) Discretizzazione del modello fisico.
 Figure 3 –Sector 2. a) 3D reconstruction of each lithology. b) Discretization of the physical model.

Il fattore di sicurezza assume particolare interesse in quanto prende in considerazione le incertezze sui parametri di resistenza al taglio e sulle relazioni tra le resistenze determinate in laboratorio e quelle reali nei materiali, le incertezze sui carichi in gioco nel versante. L'analisi di stabilità di un pendio usando i metodi numerici (elementi finiti, differenze finite) utilizza la tecnica di riduzione delle resistenze di mobilitazione verificando la convergenza o meno dell'algoritmo di calcolo. Il fattore viene determinato utilizzando un decadimento parametrico (coesione e angolo di attrito) in modo da portare il versante nelle condizioni di non equilibrio.

Il decadimento è ottenuto dividendo i parametri resistivi (c' e ϕ') per un fattore riduttivo SRF, dove c' è la coesione e ϕ' è l'effettivo angolo di attrito di resistenza del terreno (ciò è in linea con le più attuali normative europee che utilizzano gli Eurocodici). La mancanza della convergenza numerica sarà accompagnata da un notevole aumento dello spostamento sui nodi del modello (Ng, C. W. W., Zhang, L. M., Ho, K. K. S. & Choy, C. K., 2000).

Lo stato evolutivo del versante può essere identificato in tre fasi fondamentali una elastica, una elasto-plastica di instabilità locale e una plastica di instabilità globale. Nella prima fase il versante è considerato in perfette condizioni elastiche, con il crescere del fattore riduttivo si hanno dei minimi spostamenti nodali e l'algoritmo tende a convergere. Nella seconda fase il versante è in condizioni di deformazioni elasto-plastiche con valori di spostamenti più marcati. Tuttavia, il valore del SRF a questo punto non è il fattore di sicurezza del pendio, perché la rottura non si avrà

fino a che non si sviluppa una zona plastica molto più estesa, evolvendo nella superficie di scorrimento. D'altra parte si può avere un'instabilità locale che potrebbe essere accompagnata da grandi spostamenti e tensionamenti localizzati principalmente nelle zone superficiali. Nella terza ed ultima fase l'algoritmo di calcolo tende alla non convergenza e la mesh è caratterizzata da spostamenti inaccettabili e incontrollabili (rottura globale del pendio).

Modellazione numerica ed analisi dei risultati

Lo studio è stato eseguito riproducendo le condizioni di stato iniziale o attuale e su queste è stata impostata un'analisi di stabilità studiata con il metodo della non convergenza del codice di calcolo. Una volta ricostruito il modello fisico dell'area e definite le condizioni al contorno è stata eseguita l'analisi utilizzando il modello costitutivo di Mohr-Coulomb.

Questo, nel codice, richiede le seguenti informazioni meccaniche dei materiali: *Densità* (kg/m^3) γ , *Angolo di attrito interno* (gradi) ϕ' , *Modulo di compressibilità volumetrica* (Pa) K , *Modulo di elasticità tangenziale* (Pa) G , *Coesione* (Pa) c' , *Resistenza a trazione* (Pa) σ^t .

Per definire tali caratteristiche meccaniche (Tab. 1) si sono utilizzate le informazioni relative alle prove di laboratorio di alcuni campioni prelevati in zona e a diverse profondità su cui sono state eseguite una serie di prove di laboratorio come granulometrie, limiti di Atterberg, prove triassiali e prove edometriche.

Tabella 1 - Parametri geotecnica utilizzati nella modellazione numerica.
Table 1 – Geotechnical parameters used in the numerical modeling.

	Densità (Kg/m ³)	Attrito (°)	Modulo volumetrico (Pa)	Modulo di taglio (Pa)	Coesione (Pa)	Tensione (Pa)
Conglomerato	2100	45	2.88E8	1.73E8	0.38E6	0.03E6
Sabbia	2080	26	3.40E7	1.60E7	1.67E4	3.42E4
Argilla	2050	22	2.60E7	1.20E7	3.68E4	9.11E4

La fase di analisi è stata suddivisa in tre stadi fondamentali: 1) Analisi Elastica, 2) Analisi Plastica, 3) Analisi di Stabilità.

Data la complessità delle geometrie e l'elevato numero di elementi nel modello, per riprodurre gli stati iniziali di tensione si è pensato di impostare una prima analisi, definita elastica, mediante un modello a deformazioni plastiche nulle. Per evitare ogni condizione di plasticizzazione sono stati utilizzati dei parametri coesivi estremamente elevati (1E10 Pa).

Questa fase è stata utilizzata per riprodurre le condizioni iniziali del modello andando a calcolare i relativi valori degli stress s_{xx} , s_{yy} , s_{zz} , s_{xy} , s_{xz} , s_{yz} per ogni singolo elemento. Questi valori sono stati utilizzati come base per il calcolo nella fase plastica dove, una volta azzerati gli

spostamenti e le velocità ritenute prive di significato, si sono reimpostati i valori di coesione e di tensione limite reali e ricalcolato lo stato di equilibrio globale. La terza ed ultima fase è stata eseguita per lo studio della stabilità globale, applicando una apposita analisi a risoluzione ciclica scritta in linguaggio FISH interno al codice di calcolo numerico *Flac^{3D}* (Itasca Consulting Group, Inc. 1996).

Questa fase è stata implementata tramite un algoritmo di calcolo (Fig. 4) preparato utilizzando la tecnica di riduzione delle resistenze mobilitate. In base a questo si è eseguita, per ogni settore, una serie di analisi sequenziali mirate a portare il versante in condizioni di equilibrio limite.

Il fattore riduttivo, SRF, è stato inizialmente incrementato con un coefficiente di 0,05 e poi di 0,01 in modo da ottenere un risultato più accurato.

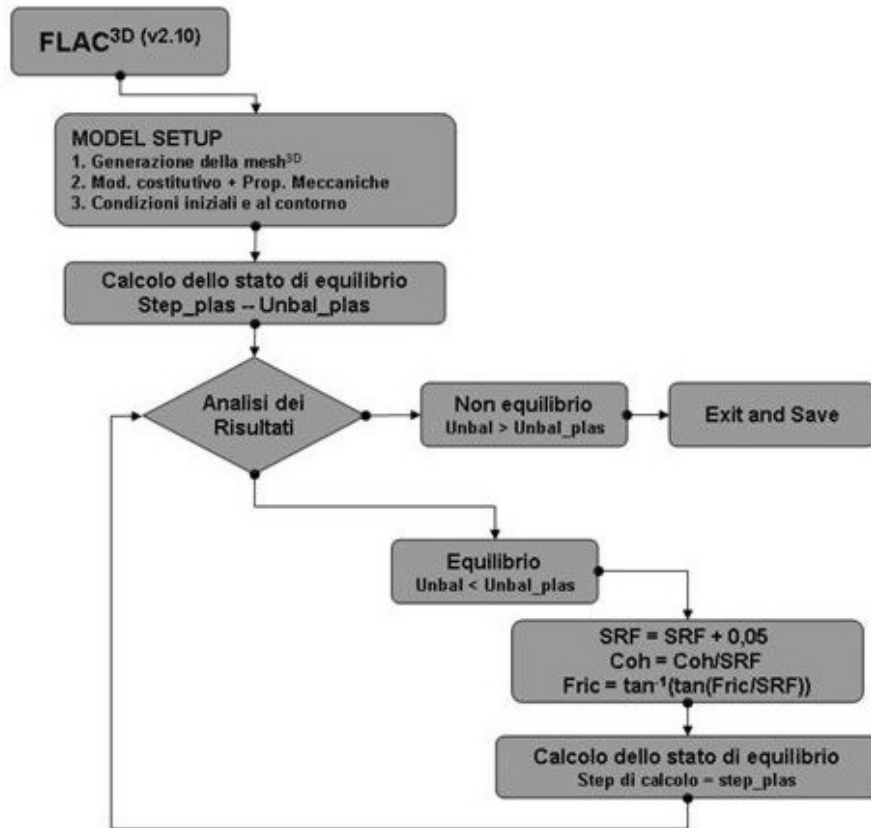


Figura 4 – Flowchart dell’algoritmo costruito nel calcolo del fattore di sicurezza.
 Figure 4 – Flowchart of the algorithm developed for the calculation of the safety factor.

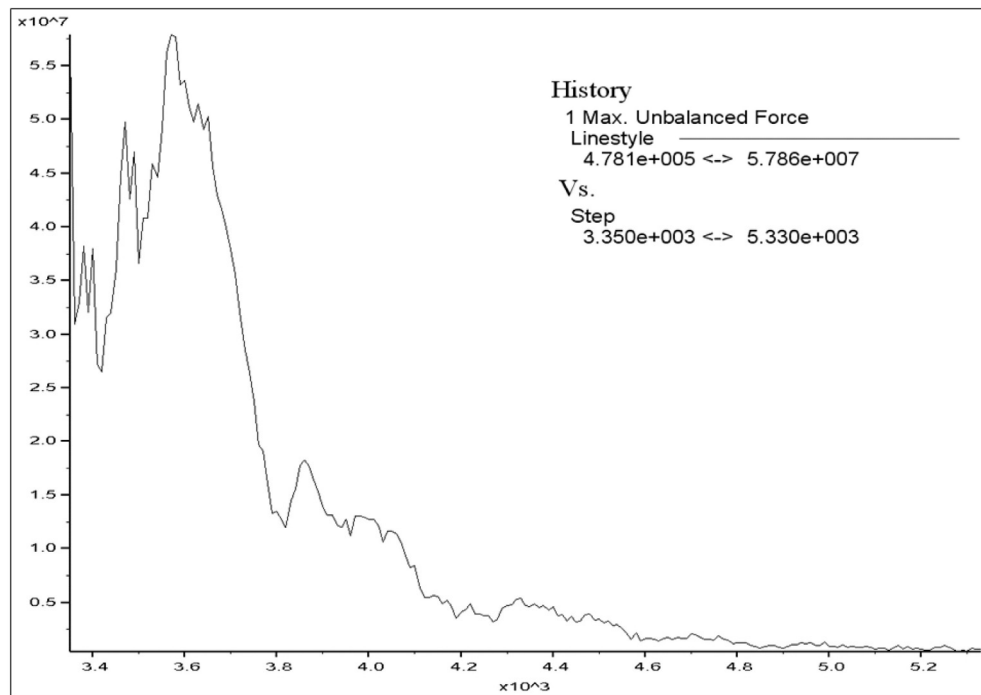


Figura 5 – Settore 3. Grafico delle massima forza non bilanciata.
 Figure 5 – Sector 3. Graphic of the maximum unbalanced force.

L'analisi del settore 3, nella fase plastica, ha reso evidente una precaria condizione di equilibrio, con le massime deformazioni principalmente in zone dove si manifestano attualmente fenomeni di instabilità. La convergenza dell'algoritmo è verificata dall'andamento del "max unbalanced force" calcolata come la somma delle massime forze presenti su tutti i nodi della mesh 3D (Fig. 5).

Definite le condizioni attuali del versante, per quantizzare numericamente la stabilità si è pensato di far lavorare il codice secondo la riduzione delle resistenze di mobilitazione, spingendo il sistema ad una condizione di

non equilibrio e uguagliando SRF al valore del fattore di sicurezza. Il calcolo è stato ottenuto facendo lavorare il Flac^{3D} secondo un algoritmo, scritto in linguaggio FISH, che produce una serie di cicli di calcolo concatenati tra loro. Ad ogni ciclo il valore SRF viene aggiornato di un coefficiente pari a 0,05 e di conseguenza il codice si ricalcola i nuovi valori di coesione, angolo di attrito e di resistenza a trazione. Il calcolo viene eseguito entro un determinato numero di step pari alla differenza tra quelli necessari per raggiungere l'equilibrio nella fase elastica e quelli necessari per l'equilibrio plastico.

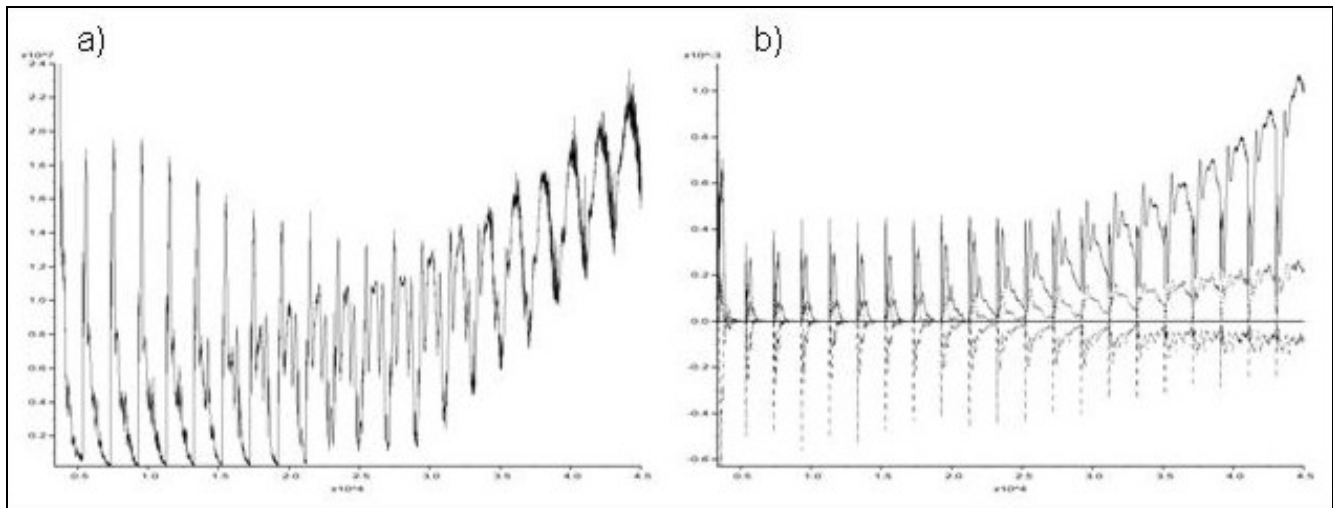


Figura 6 – Settore 3. a) Diagramma della massima forza non bilanciata nel calcolo dell'analisi di stabilità. b) Andamento delle velocità di spostamento al nodo 4475.

Figure 6 – Sector 3. a) Diagram of the maximum unbalanced force in the calculation of the stability analysis. b) Displacement rate relative to 4475 node.

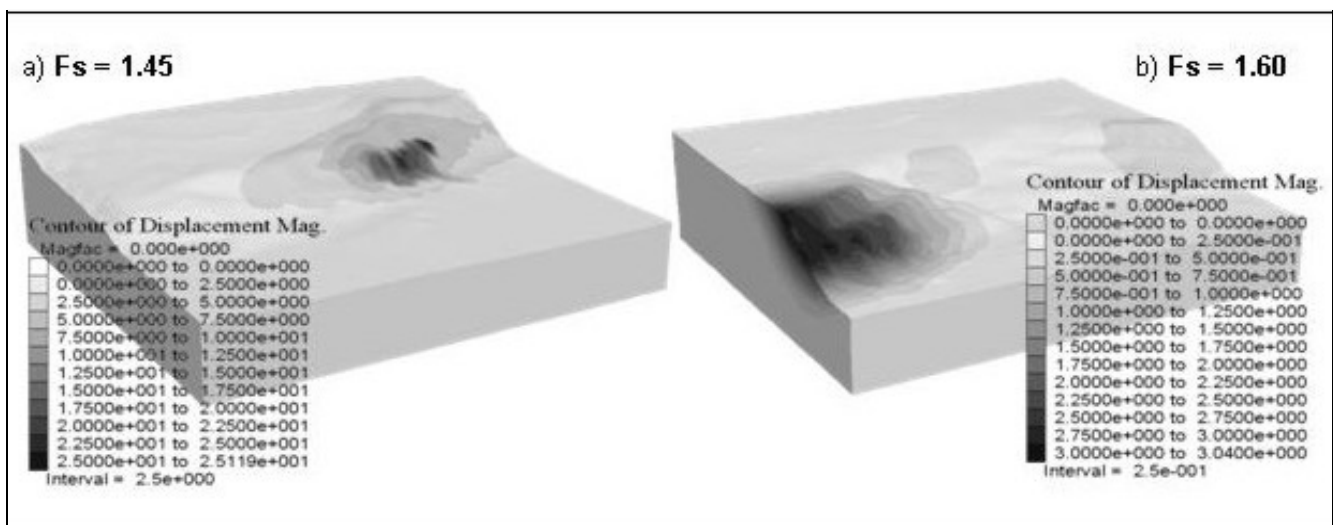


Figura 7 – Spostamenti totali nel calcolo dell'analisi di stabilità; a) settore 3; b) settore 2.

Figure 7 – Total displacements in the calculus of the stability analysis; a) sector 3; b) sector 2.

Alla fine di ogni ciclo di analisi, la convergenza dell'algoritmo viene testata confrontando la massima forza non bilanciata del sistema con la massima forza non bilanciata dell'analisi plastica. L'instabilità del sistema e quindi l'individuazione del fattore di sicurezza viene determinato sulla base dell'interpretazione del grafico in figura 6 in cui ogni picco rappresenta un ciclo di calcolo eseguito con determinati parametri resistivi dovuti ad un fattore riduttivo crescente.

È possibile notare che se nei primi cicli di calcolo si ha la convergenza dell'algoritmo, quando l'SRF raggiunge un valore pari a 1,45, con le relative riduzioni parametriche, la forza non bilanciata mostra un andamento sempre crescente con i cicli perché il sistema ormai non converge e il modello non è stabile.

Le stesse considerazioni vengono dedotte analizzando il grafico delle componenti x , y e z della velocità di spostamento di un singolo nodo che possono essere paragonate anche all'andamento dei valori degli spostamenti. Entrambi mostrano l'instabilità nello stesso ciclo di calcolo, che nelle velocità si manifesta con dei valori che non sono più prossimi allo zero.

Una problematica da non trascurare in un calcolo numerico è sicuramente l'errore prodotto dalla presenza dei confini virtuali, definiti come piani di simmetria locale utilizzati per definire spazialmente il modello. Da queste analisi si osserva che le massime deformazioni si impostano principalmente sui bordi delle griglie e che, di conseguenza, il fattore di sicurezza è leggermente sovrastimato, 1,60 per il Settore-2 (Fig. 7a) e 1,45 per il Settore-3 (Fig. 7b).

Per meglio studiare il versante si è pensato di individuare un'area intermedia tra il settore 2 ed il settore 3 in modo da ottenere un risultato più congruo con le condizioni reali e ridurre al minimo gli effetti di bordo.

Partendo dallo studio topografico bidimensionale, interpolando i dati ottenuti con il Surfer e ricostruito un modello fisico discretizzato in tetraedri (62.000 elementi), si sono ripetute tutte le analisi ricalcolando gli stress iniziali, le deformazioni attuali e il fattore di sicurezza.

L'algoritmo, così come descritto, è stato predisposto in modo che nei primi cicli di calcolo venga utilizzato un fattore SRF pari a 0.05; una volta definita l'instabilità globale del sistema, il calcolo procede con un valore di SRF pari a 0.01 per ottenere una migliore precisione nella rappresentazione dell'andamento della forza non bilanciata e una più accurata definizione del momento di divergenza del diagramma. Nel caso esaminato, la deviazione della forza non bilanciata, determina un fattore di sicurezza pari a 1.31. Osservando i grafici di figura 8 si evidenzia una precaria instabilità nella parte alta del modello dove si registrano i massimi spostamenti sia in direzione x , perpendicolare al versante (Fig. 8a) sia in direzione z (Fig. 8b). Il risultato numerico ha fornito con buona precisione nella simulazione delle reali condizioni dell'area, dove attualmente si verificano fenomeni franosi di crollo con distacchi di materiale dalla parte alta del versante. (Fig. 9).

Molto più complessa è stata la ricostruzione geometrica del settore più a nord dell'abitato (Settore 1), in quanto, a differenza degli altri due, è interessato dall'attraversamento di una linea ferroviaria esistente e dall'attuale realizzazione in galleria del raddoppio tra le stazioni di Ortona-Km 2+138 e Casalbordino-Km 28+271. Entrambe le gallerie hanno un andamento arcuato con un raggio di curvatura pari a 385,00 m per quella esistente e 590,00 m per quella in costruzione (Fig. 10), ed entrambe interessano l'area del centro storico della città, principalmente la zona del *Castello Aragonese* (XV secolo) di rilevante interesse storico.

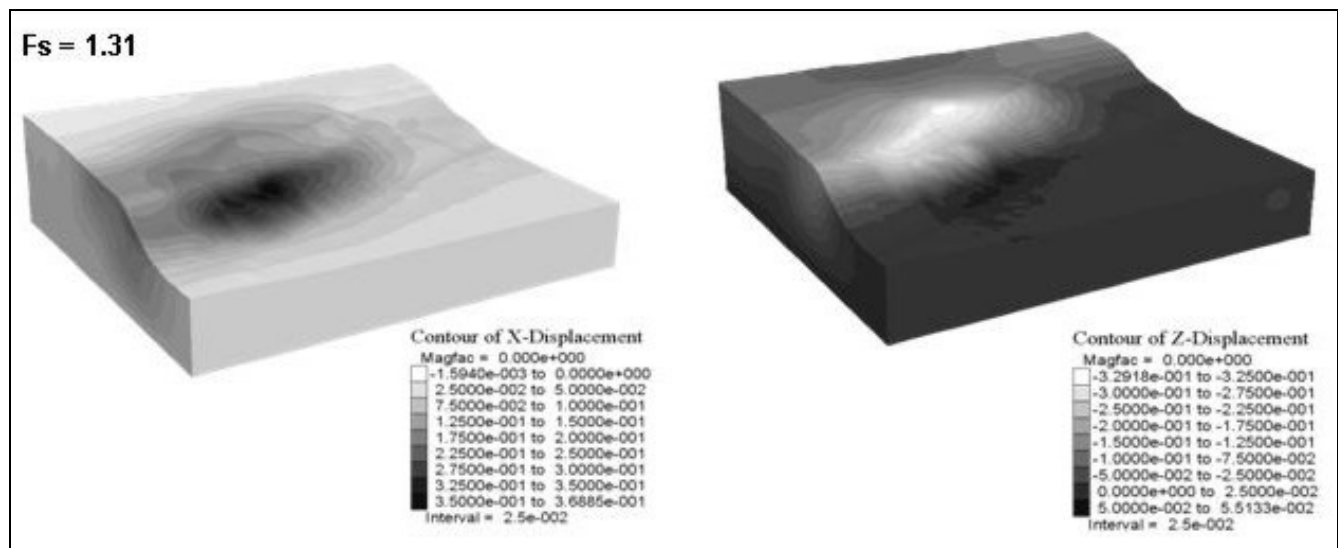


Figura 8 – Andamento degli spostamenti nella zona intermedia tra il settore 2 e 3; a) componente x ; B) componente z .
Figure 8 – Contours displacements within the area between sector 2 and 3. a) x -displacement. b) z -displacement.



Figura 9 – Foto del Versante Salesiani analizzato nelle verifiche con evidenti segni di instabilità.

Figure 9 – Photo of Salesiani slope analyzed in the numerical modeling with evidenced instability phenomena.

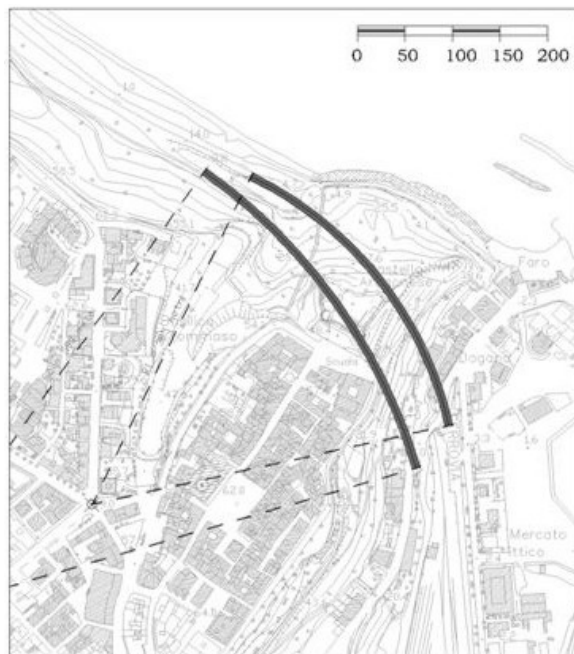


Figura 10 - Planimetria del Settore 1 con la relativa posizione della gallerie ferroviarie.

Figure 10 - Planimetry of sector 1 with the railway galleries.

L'analisi è stata molto più complessa in quanto il modello è stato implementato con una serie di elementi strutturali in grado di simulare la presenza delle gallerie. Schematizzando l'opera in calotta, piedritti e platea, anche

in questo caso si è fatto ricorso alla programmazione FISH per definire le posizioni spaziali degli elementi di rivestimento in base alle caratteristiche di raggio interno, raggio esterno e dimensioni caratteristiche di scavo, riproducendo una geometria ad andamento circolare.

Lo scavo è stato modellato manualmente per meglio rappresentare l'intersezione che esso ha con la superficie topografica. Anche in questo caso sono stati creati tre volumi, con l'unica differenza che sono state estrapolate le forme ed i volumi delle due gallerie. La particolare geometria dell'infrastruttura sotterranea ha portato a discretizzare 320.000 elementi tetragonali in modo da ottenere una miglior precisione nelle immediate vicinanze delle zone di scavo (Fig. 11) e principalmente nelle aree interessate dall'imbocco Nord e Sud.

L'algoritmo utilizzato è in grado di identificare tutti i nodi presenti sulle superfici di scavo e impostarvi delle strutture di rivestimento di tipo *shell*, che nel *Flac^{3D}* sono rappresentate da elementi piani con tre nodi di contatto e ognuno con sei gradi di libertà. Strutturalmente gli elementi sono stati studiati con un modello isotropico definendo il modulo di Young, il coefficiente di Poisson, e lo spessore di rivestimento. Tralasciando le deformazioni strutturali, le analisi sono state condotte secondo gli stessi criteri utilizzati per gli altri settori. Escludendo le fasi di scavo e i relativi cedimenti strutturali degli elementi di sostegno, in entrambi i casi analizzati (galleria singola esistente e galleria doppia) i risultati hanno mostrato una buona stabilità globale con un fattore di sicurezza rispettivamente di 1,50 e 1,53.

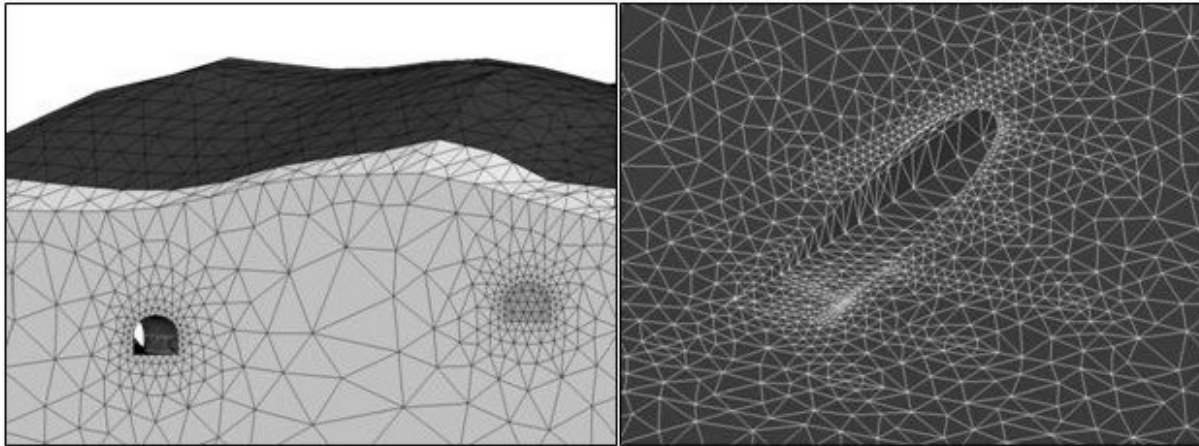


Figura 11 – Ricostruzione geometrica del Settore 1 con la relativa posizione delle gallerie ferroviarie
 Figure 11 – Geometric reconstruction of the sector 1 with the location of the railway galleries.

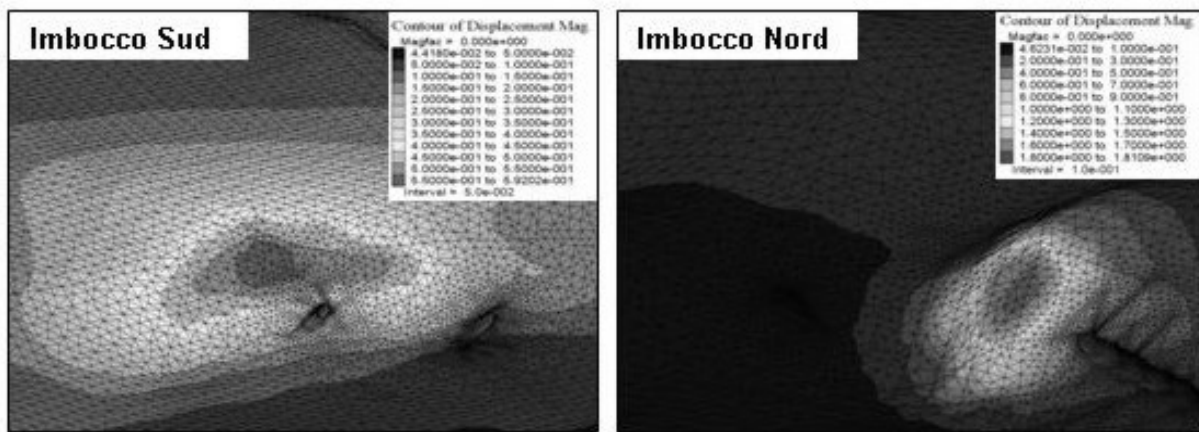


Figura 12 – Massimo spostamento registrato nelle zone di imbocco della galleria.
 Figure 12 – Maximum displacement recorded at the entrance railway galleries.

Un particolare interessante da non trascurare sono le deformazioni ottenute sulla seconda galleria nelle zone degli imbocchi dove si manifestano alcune deformazioni appena sopra lo scavo, anche se in condizioni di sicurezza (Fig. 12).

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro è lo studio del cinematisimo e la verifica della stabilità del versante orientale dell'abitato di Ortona, già più volte oggetto di fenomeni franosi, impostando una metodologia di analisi sperimentale mirata sia alla ricostruzione geometrica tridimensionale, sia all'analisi dello stato tensionale e dell'evoluzione cinematica dei versanti. Ricostruire geometricamente una porzione di terreno significa implementare le misure del piano (bidimensionale) con le quote altimetriche di ogni punto o curva (Fig. 13). Per ottenere una migliore precisione, le informazioni geometriche sono state interpolate secondo il metodo Kriging in grado di tener

conto della media pesata dei punti all'interno di una determinata area, riuscendo a ricostruire un modello digitale di circa 2,5 km². Le stesse analisi sono state eseguite sia per la superficie topografica e sia per le superfici di contatto stratigrafico.

La modellazione numerica è stata eseguita con il Flac^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in three Dimensions) integrando il codice di base con una serie di algoritmi scritti e testati in linguaggio FISH in modo da poter eseguire delle analisi mirate ad uno studio globale della stabilità dei versanti, fornendo una nuova forma di calcolo numerico capace di sfruttare le condizioni di sbilanciamento nodale delle forze inerziali o degli spostamenti per verificare il raggiungimento delle situazioni di instabilità.

Dai risultati ottenuti si sono studiati gli stati evolutivi per ogni settore di interesse, riuscendo a trovare una buona congruenza con le reali condizioni di instabilità della parte più orientale dell'abitato ortonese e principalmente del versante Salesiani (D'Annibale G. 1977) già soggetto a numerosi eventi franosi susseguendosi nel corso degli anni.

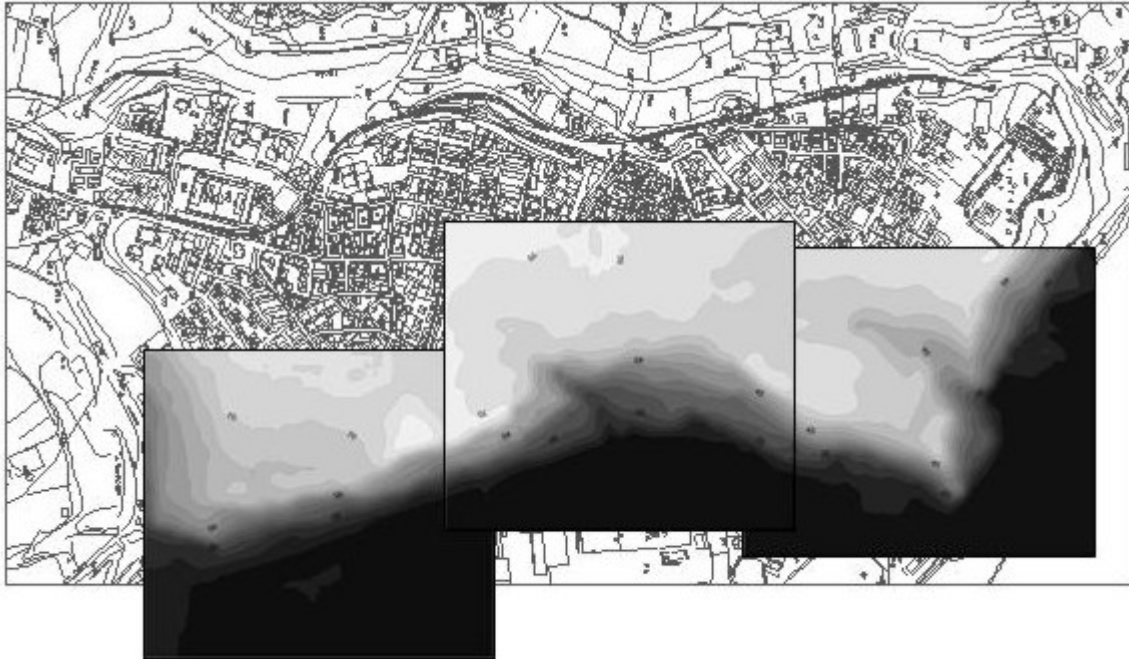


Figura 13 – Rilievo aereo-fotogrammetrico con restituzione 1:5000 e relative ricostruzioni digitali dei tre settori analizzati nella modellazione numerica.

Figure 13 – Aero-photogrammetric extract with 1:5000 scale and digital reconstruction of the tree sectors analyzed in the numerical modeling.

Oltre allo studio dalla stabilità, le analisi del settore 1 sono state integrate con la ricostruzione geometrica sia della galleria ferroviaria esistente che di quella in fase di realizzazione. Le analisi di questo settore hanno fornito dei risultati in linea con gli studi per le realizzazioni di gallerie superficiali (Barry N., Whittaker and Russel C. Frith, 1990) definendo le massime deformazioni e i massimi spostamenti

nelle zone nevralgiche dell'infrastruttura, imbocco nord e sud.

In definitiva la metodologia di analisi proposta è risultata efficace e flessibile in maniera tale da poter proporre un nuovo strumento di analisi applicabile allo studio della stabilità globale e locale dei versanti e alla loro interazione con eventuali opere antropiche.

Bibliografia

- AA.VV., 1999. Flac and numerical modeling in geomechanics, proceedings of the international flac symposium on numerical modelling in geomechanics Minneapolis, Minnesota (USA). – a.a. Balkema publishers.
- AA.VV., 2001. Flac and numerical modeling in geomechanics, proceedings of the international flac symposium Lyon (France). – a.a. Balkema publishers.
- Alberti A., Dragone M., Manfredini M., Segre A. G., 1967. Carta Geologica d'Italia, Foglio 150, Roma. – Serv. Geol. It.
- Barry N., Whittaker and Russel C. Frith, 1990. Tunnelling, design stability and construction. Institution of Mining and Metallurgy. London.
- Catenacci V., 1974. Note illustrative del Foglio 147, Lanciano, della Carta Geologica d'Italia. – Serv. Geol. It.
- Casnedi R., Crescenti U., Tonna M., 1984. Evoluzione dell'avanfossa adriatica meridionale nel plio-pleistocene sulla base di dati di sottosuolo. - Mem. Soc. Geol. Italiana, 24. Roma.
- Crescenti U., 1971a. Sul limite Mio-Pliocene in Italia. - Geologica Romana, 10, 1-21, Roma.
- D'annibale G., 1977. Note sul movimento franoso salesiani sud di Ortona (Chieti) – Geologia Tecnica, 2, 19-26.
- Haas A., Matheron G., Serra Jj., 1967. Morphologie mathématique et granulométries en place. Annales des Mines - Part I : Vol. XI, 736-753 - Part II : Vol. XII, 768-782.
- Itasca consulting group, inc., 1996. Flac3d version 2.10, Fast Lagrangian Analysis of Continua in three dimension. Minneapolis, USA.
- Ng, C. W. W., Zhang, L. M., Ho, K. K. S. & Choy, C. K., 2000. Influence of laterally loaded sleeved piles on slope stability. Can. Geotech. J. 38: 553-566.
- Ng, C. W. W., Zhang, L. M., Tang, W. H. & Choy, C. K. 2000. Behaviour of laterally loaded sleeved piles constructed in sloping ground. Foundations – Proc. 19th Annual Seminar, HKIE Geotechnical Division, 97-106.
- Ng, C. W. W., Zhang, L. M., Ho, K. K. S., Tang, W. H. & Choy, C. K., 2000. Effect of sleeved pile and pile group on slope stability. Proc. Symposium on Slope Hazards and Their Prevention, Hong Kong, 477-482.
- Vezzani I., Ghisetti F., 1998. Carta geologica dell'Abruzzo, scala 1:100000. – s.e.l.c.a., Firenze.