

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

XXII CONVEGNO NAZIONALE
DI GEOTECNICA

Palermo 22-24 settembre 2004

VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI
DI SICUREZZA E ADEGUAMENTO
DELLE OPERE ESISTENTI

Estratto

PATRON EDITORE
BOLOGNA

IL CONTRIBUTO DELLA GEOTECNICA NELLA COMPrensIONE DEI DISSESTI STORICI DELL'ABITATO DI CAMPLI (TE).

Di Francesco R., Siena M., Tiberii M.G.
GEO&GEO Instruments, Teramo (TE)

Labagnara R., Di Matteo L.
Laboratorio Geotecnico GEA, Villa Raspa di Spoltore – Pescara (PE)

Scaella G.
Regione Marche, Autorità di Bacino Regionale, Ancona (AN)

SOMMARIO

La memoria riassume uno studio, ad ampio spettro di osservazione, inerente l'interazione lunga nove secoli tra la storia dell'abitato di Campli (TE) ed i dissesti idrogeologici. Campli, sorta come avamposto romano nei pressi di un sito archeologico dell'età del bronzo e circondata dai torrenti Fiumicino e Siccagno in profonda incisione, prosperò fino al XVII secolo, tanto da superare per importanza l'attuale città di Teramo (TE). Oggi essa è nota per il privilegio della "Scala Santa", concesso dal Papa Clemente XIV nel 1776 e condiviso in tutto il mondo con Roma e Gerusalemme. A partire dal XVII secolo ebbe inizio un lento ma inesorabile processo di decadimento, alla cui base è insita la natura geologicamente instabile del territorio, tanto da determinare una progressiva diminuzione dell'estensione del centro storico. Mentre diversi sono stati nel passato anche recente gli studi di carattere storico o geomorfologico, per la prima volta viene proposta un'interpretazione geotecnica dei dissesti idrogeologici tutt'ora attivi e che impegnano notevoli risorse umane ed economiche. Senza tali dissesti probabilmente oggi Teramo sarebbe in provincia di Campli.

Parole chiave: dissesti storici, softening, anisotropia, modelli numerici

1 INTRODUZIONE

L'abitato di Campli è situato in provincia di Teramo, su di un colle tra le valli dei torrenti Fiumicino e Siccagno, nella fascia collinare compresa tra i massicci carbonatici dei Monti Gemelli ed il Mare Adriatico. Di origine pre-romana, come dimostrato da reperti archeologici dell'età del bronzo (II millennio a.C.) era culla di una fiorente civiltà nel X - III sec. a.C. (necropoli di Campovalano); successivamente si ritiene fondata come "Municipium Romano". Il suo nome compare per la prima volta in un documento dell'894 e nel volgere di pochi secoli, a partire dal 1100, la città visse un notevole sviluppo socio-economico, al punto che nelle attività e nel numero di abitanti, all'inizio del XVII secolo, superava perfino la città di Teramo. Dalla fine del 1600 inizia un inesorabile decremento che non si arresta nemmeno quando nel 1776 viene concesso dal Papa Clemente XIV il privilegio della "Scala Santa", con le stesse indulgenze delle altre 2 esistenti al mondo: Roma e Gerusalemme.

L'ipotesi è che ad arrestare lo sviluppo non siano stati i pur numerosi saccheggi, non le epidemie e neppure il distruttivo terremoto del 2 febbraio 1703, bensì la natura geologicamente instabile del territorio. Interessante è l'analisi fatta dallo storico Nicolino Farina sulla "Pianta

prospettiva di Campli del 1763" di G.B. Pacichelli: "...il nucleo urbano era, come oggi, circondato da dirupi continuamente erosi dalle piene dei torrenti Fiumicino e Siccagno...". Dei quartieri originari costituenti il nucleo antico dell'abitato, Campli, Nocella e Castelnuovo, rimangono frammenti costituenti 3 frazioni, separate da fossi in profonda fase di incisione. Con la presente memoria viene illustrata la sintesi di uno studio storico, geologico-geomorfologico e geotecnico condotto nel periodo 1996-2004, a seguito dei numerosi lavori di



Figura 1. Indicazione della zona esaminata e ubicazione dei siti studiati.

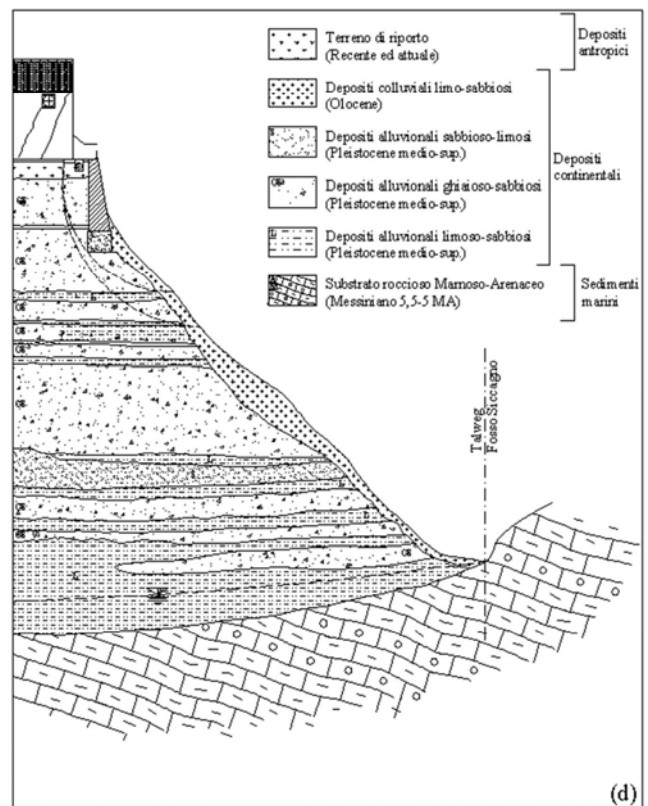
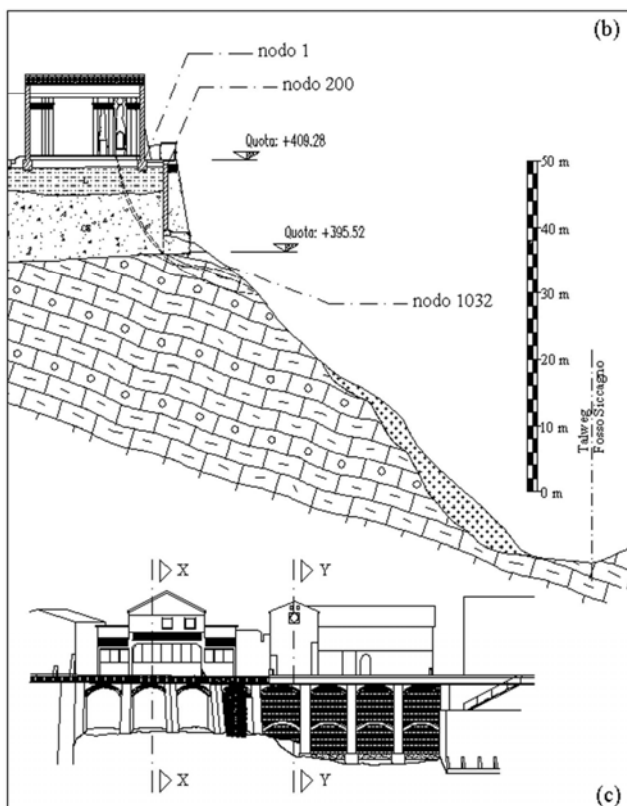
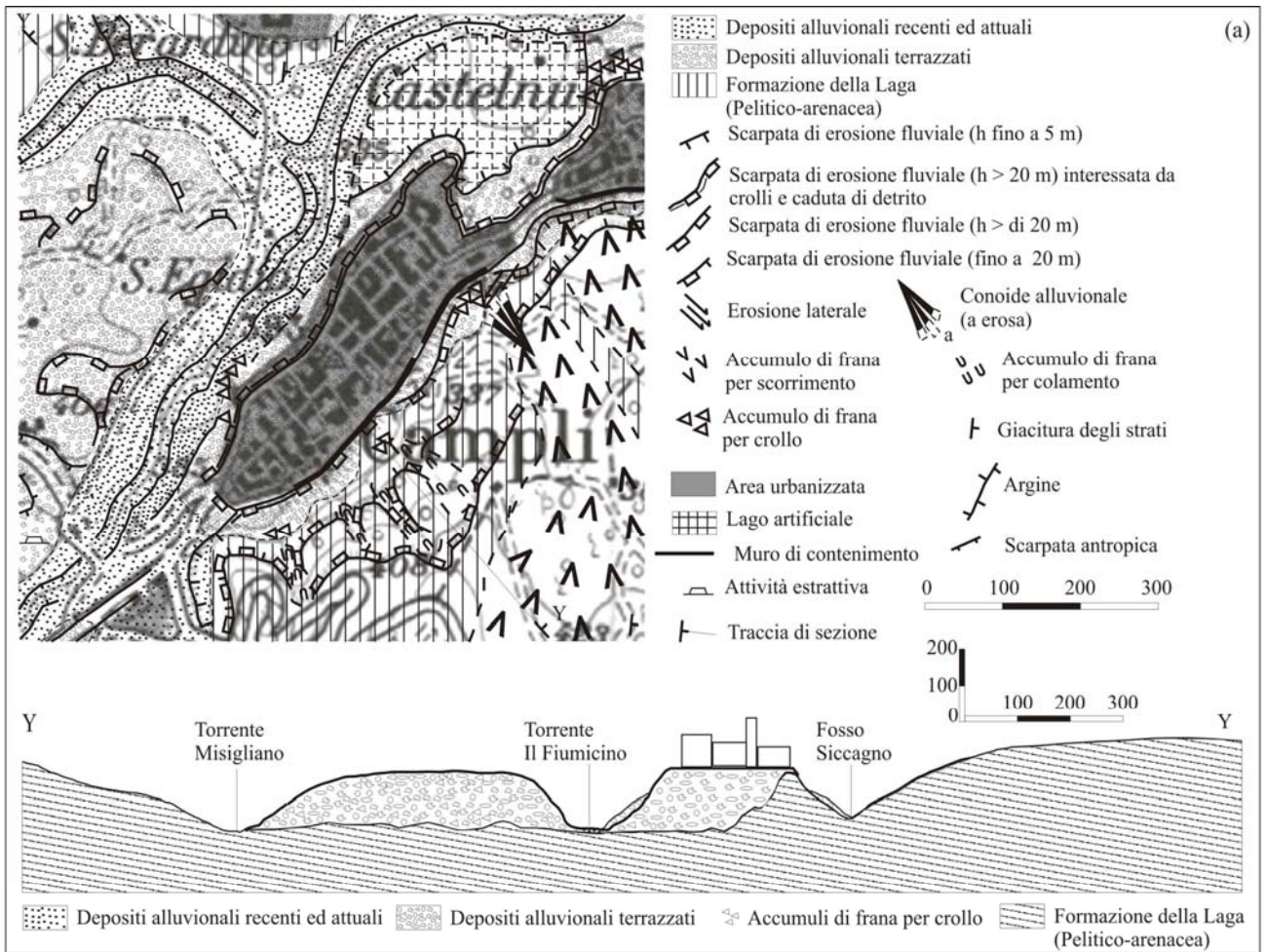


Figura 2. Geologia e geomorfologia dell'abitato di Campli. a) carta geomorfologica e profilo geologico; b) sezione stratigrafica Y-Y presso la Chiesa della Misericordia; c) vista frontale del sito "A"; d) sezione stratigrafica X-X.

consolidamento dell'abitato. In particolare, considerata la complessità e l'articolazione dei contatti alluvioni-substrato, viene analizzato il comportamento di 2 siti ritenuti interessanti: "sito A", consolidamento del versante eseguito dal Genio Civile di Teramo nel 1954 (località Campli), storicamente interessato da dissesti idrogeologici (figg. 1 e 3); sito "B" (fig. 1), relativo all'analisi delle condizioni di stabilità di una scarpata sita in località Nocella, di origine fluviale a parete subverticale, con altezza di circa 60 m, caratterizzata anch'essa da franosità storica.

Le analisi, condotte con metodi numerici ad elementi finiti, hanno di fatto confermato le informazioni di carattere storico e geologico-geomorfologico, a condizione di implementare nei modelli matematici fenomeni complessi come l'anisotropia strutturale primaria (derivante dal modello deposizionale) interessante i depositi alluvionali cementati e quella secondaria, legata ai fenomeni di alterazione degli stessi a partire dalle pareti esposte e dai sistemi di fratturazione. Solo raramente i processi in atto sono da ascrivere a fenomeni di alterazione del sottostante substrato marnoso, costituito da alternanze di arenarie e argille mioceniche sovraconsolidate e fessurate. Per queste ultime è risultato indispensabile esplorare i vari legami costitutivi esistenti in letteratura, al fine di cogliere al meglio il comportamento rammollente associato al sistema di fratturazione (argille strutturalmente complesse).



Figura 3. Vista aerea dell'abitato di Campli nel dopoguerra (per gentile concessione del Comune di Campli). Il riquadro indica il sito A, storicamente noto essere soggetto a dissesti e crolli.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E STORICO

L'abitato di Campli (TE) sorge su di un lembo di terrazzo alluvionale bordato da pareti subverticali (fig. 2) legate alla profonda incisione fluviale operata dai torrenti Fiumicino e Siccagno (Buccolini et al., 1994). I depositi alluvionali sono rappresentati da conglomerati cementati in matrice sabbiosa e limosa, con letti e lenti limo-sabbiosi, il cui spessore in affioramento raggiunge i 70 metri (fig. 2d). Tali depositi poggiano sulla Formazione

della Laga (Messiniano finale, 5,5÷5 MA), caratterizzata da una alternanza di strati marnosi ed arenacei interessati da due sistemi di fratturazione. L'assetto strutturale è funzione quindi di una inclinazione degli strati verso est di 50°-60° e di due famiglie di discontinuità con pendenze di 30° ed 85°.

Il primo dissesto per il quale si hanno notizie storiche si verificò nel 1700, interessando gran parte della frazione di Nocella (sito B), con conseguente crollo di numerose abitazioni (Bucciarelli I., 1988). Al 1814 risale un documento storico che cita la frana avvenuta presso la Chiesa di Santa Maria in Platea, con il coinvolgimento di una strada, mentre un altro documento del 20 gennaio 1831 informa della frana che ha interessato il versante meridionale dell'abitato di Campli con il crollo del muro di sostegno a ridosso della Chiesa della Misericordia (sito A). Il muro, successivamente ricostruito, subì ulteriori crolli, stante la relazione del Corpo Reale del Genio Civile datata 11 dicembre 1927, l'intervento del Genio Civile del 1954 nonché un intervento di consolidamento eseguito nel triennio 1999-2001. Nel corso degli ultimi anni si sono verificate nuove frane tra le quali è da citare quella del 1976 relativa alla frazione Castelnuovo, la quale ha provocato il crollo di una parete di terreno e del sovrastante edificio, mentre nel 1973 furono evacuate 10 abitazioni di Campli comune. Infine nel 1984 si sono verificati dissesti interessanti il muro di sostegno in via della Scala.

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

L'analisi stratigrafica e la determinazione delle proprietà geotecniche dei geomateriali sono passati attraverso diverse fasi di studio e livelli di approfondimento sviluppati nell'arco di un decennio. La presenza di depositi alluvionali caratterizzati da anisotropia primaria e di un substrato arenaceo-pelitico interessato da due famiglie di giunti ha richiesto l'impiego di diverse metodologie al fine di determinare, talora statisticamente, le proprietà di resistenza e deformabilità degli stessi. Inoltre il ricorso a modelli numerici complessi, capaci di cogliere gli aspetti salienti dei problemi affrontati, ha imposto l'utilizzo di una procedura interattiva (Doležalová et al., 2001), dal momento che lo studio del comportamento reale di strutture geotecniche non può essere limitato alla pura predizione e/o alla verifica mediante back analysis, ma deve necessariamente evolvere attraverso passi di calibrazione tra le soluzioni numeriche, i monitoraggi ambientali e strutturali, le prove in situ e quelle di laboratorio. Se ciò può essere utile per strutture in fase di progetto risulta invece necessario nel caso di applicazioni rivolte allo studio di fenomeni storici.

Tale studio ha quindi richiesto l'esecuzione di 11 sondaggi a carotaggio continuo e 4 prove penetrometriche dinamiche concentrati sul solo abitato di Campli, l'esecuzione di rilievi geomeccanici relativi agli ammassi arenacei, prove di laboratorio sulle alluvioni e sulle peliti del substrato integrate da dati noti in letteratura (Sciarrà N., 1988). Particolarmente delicata è risultata la caratterizzazione geotecnica delle alluvioni e delle peliti, dal momento che il procedimento interattivo ha

evidenziato la necessità di utilizzare leggi costitutive complesse integrate da leggi capaci di riprodurre per entrambi i litotipi i processi esterni (softening) e per le argille anche i processi interni (creep). I risultati delle analisi relative alle peliti del substrato, forniti dalla combinazione di prove di taglio diretto, edometriche e triassiali ed interpretati secondo il modello Drucker-Prager-Cap (elastico non lineare - plastico incrudente o rammollente), sono riassunti nella tabella 1:

Tabella 1. Proprietà geotecniche delle peliti del substrato secondo il modello Drucker-Prager-Cap (Cap Model).

γ_n [kN/m ³]	c' [MPa]	ϕ' [°]	ψ [°]	E' [MPa]	ν	λ	P_c [MPa]	R
21.6	0.2÷2	27	15	150	0.22	0.055	1.01	1.21

dove, con riferimento alla figura 4, λ (indice di compressibilità) è tale che $C_c = \log_e 10\lambda$, p_c identifica l'ampiezza iniziale della superficie incrudente ellittica "el", $R = (p_c - p_{cs})/J_2^{-0.5}$ costituisce il rapporto tra gli assi maggiori e minori di "el", $J_2^{-0.5}$ identifica il punto di intersezione tra l'involuppo a rottura DP (Drucker-Prager) e la superficie incrudente nel piano deviatorico. Il Cap Model in sostanza è basato sul fatto che l'isteresi volumetrica esibita da molti geomateriali può essere descritta da un modello plastico, se tale modello è basato su una superficie di snervamento incrudente che include condizioni di stress idrostatico (Chen W.F. et al., 1985).

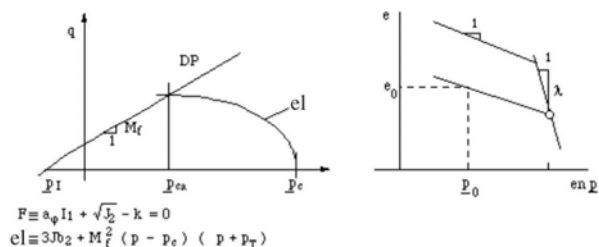


Figura 4. Cap Model (modello Drucker-Prager con plasticità incrudente o rammollente) e relativa prova edometrica di riferimento (da ZACE, 2003).

Per quanto concerne i depositi alluvionali, in relazione alla elevata rigidezza dipendente dalle condizioni di cementazione chimica, è stato preferibile adottare un modello elastico non lineare - perfettamente plastico (tabella 2), con superficie di snervamento di Drucker-Prager e da una regola di flusso deviatorico ($\psi=0$).

Tabella 2. Proprietà geotecniche delle alluvioni secondo il modello Drucker-Prager.

	γ_n [KN/m ³]	c' [MPa]	ϕ' [°]	ψ [°]	E' [MPa]	ν
limi	16.9	0.5	26.5	0	60	0.35
ghiaie	18.0	0.5	34	0	90	0.35

La formulazione della non-linearità del problema meccanico è stata basata su un approccio incrementale mediante lo schema iterativo di Newton-Raphson. Infine le arenarie stratificate e fratturate del substrato sono state modellate come un materiale multisuperficie (Modello Multilaminare), con la matrice assimilata ad un mezzo elasto-plastico tipo Hoek-Brown, mentre gli strati ed i giunti esibiscono un comportamento attritivo alla Coulomb (Bisetti et al., 2001). Nel modello proposto possono essere introdotti fino a 3 piani di scivolamento variamente orientati (α_i inclinazione degli strati e dei giunti), ognuno dei quali rimane fisso nello spazio ed è caratterizzato da una coesione c_i , un angolo di attrito ϕ_i ed un angolo di dilatanza ψ_i (tabelle 3 e 4).

Tabella 3. Proprietà geotecniche della matrice rocciosa arenacea secondo il modello Hoek-Brown.

γ_n [kN/m ³]	f_c [MPa]	f_t [MPa]	e	E' [MPa]	ν
24.0	40	4	0.52	3900	0.20

Tabella 4. Proprietà geotecniche della stratificazione e dei giunti delle arenarie secondo il modello Multilaminare

	α_i [°]	ϕ' [°]	ψ' [°]	c' [MPa]
strati	17	35	15	1.7
I giunto	60	35	15	1.7
II giunto	85	35	15	1.7

Le condizioni di plasticità e la regola di flusso possono essere derivate per ogni piano, conducendo ad un problema di plasticità multisuperficie il quale richiede che tutte le condizioni di plasticità siano simultaneamente soddisfatte per ogni stato di sforzo nel materiale. La regola di flusso è governata da un flusso potenziale, generalmente con una regola di flusso non-associata, mentre la deformazione plastica totale deriva dalla somma del contributo di ogni piano, assumendo nel contempo un comportamento elastico perfettamente plastico.

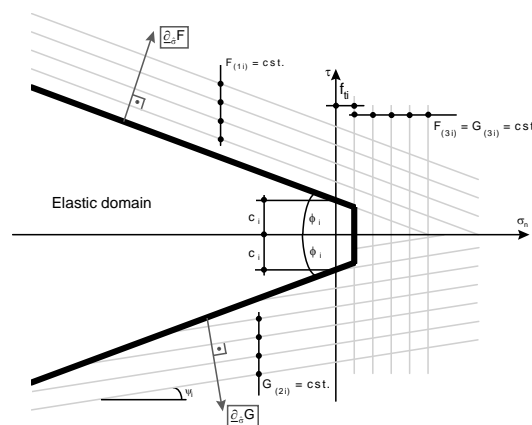


Figura 5. Modello Multilaminare per rocce stratificate (da ZACE, 2003).

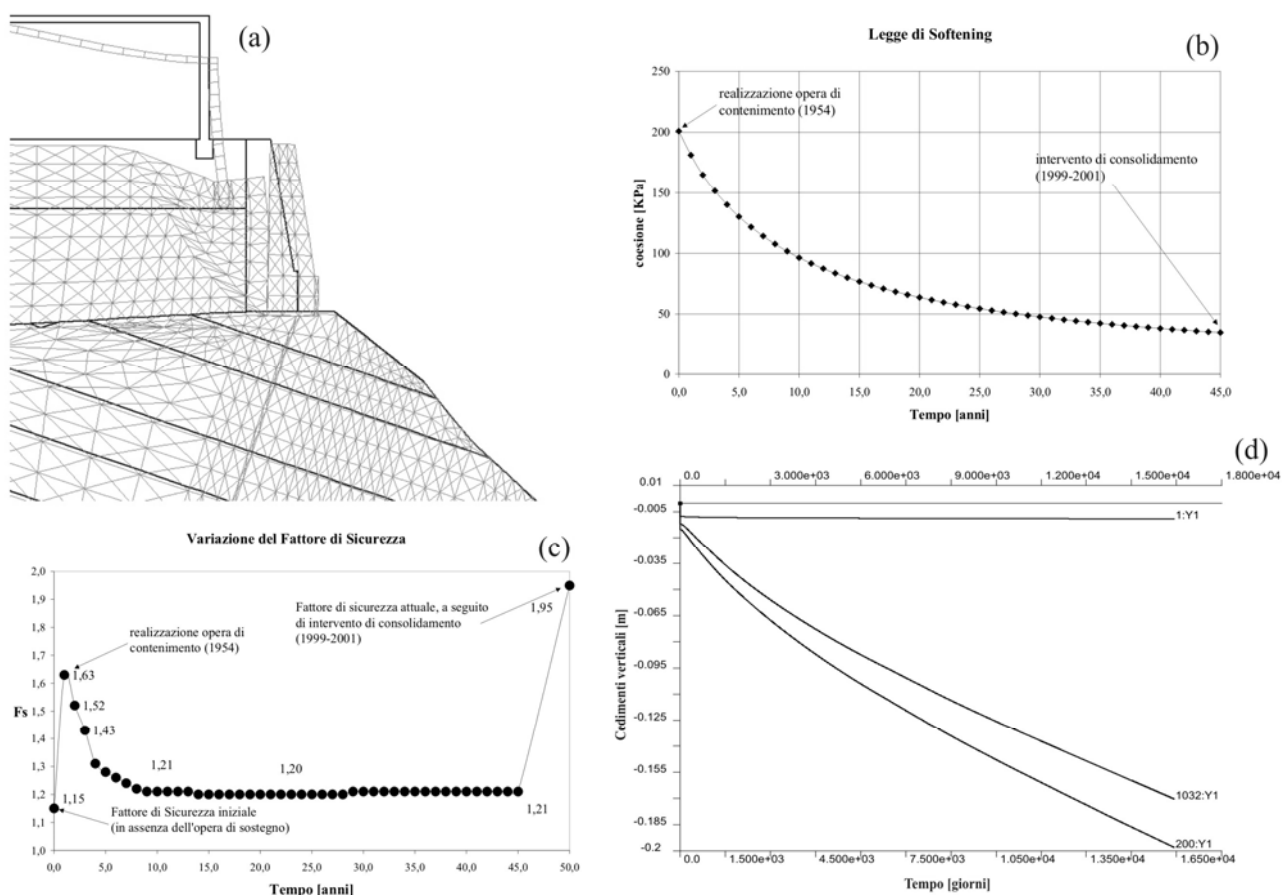


Figura 6. Modello numerico relativo al sito "A": a) analisi di stabilità post-intervento (1954 – $F_s = 1.63$); b) legge di softening relativa ai processi di rammollimento esterni; c) variazione nel tempo dei coefficienti di sicurezza; d) curve tempo-cedimento per punti nodali significativi (rif. fig. 2).

4 MODELLI NUMERICI

4.1 Sito A – Campi centro storico

Riguarda parte di una scarpata, che delimita il settore meridionale dell'abitato di Campi (fig. 3), attualmente soggetta a vincolo idrogeologico e caratterizzata da condizioni di elevata acclività, sulla quale risulta ubicata l'antica Chiesa della Misericordia interessata da un diffuso quadro fessurativo convergente con le deformazioni della scarpata stessa. L'ultima opera di sostegno di tale scarpata è stata eseguita dal Genio Civile di Teramo nel 1954 mediante la realizzazione di una struttura di sostegno costituita da speroni in muratura, fondati su blocchi di calcestruzzo, collegati da arcate a sesto ribassato e timpani in mattoni pieni, sviluppati su di un fronte di circa 80 m e per un'altezza di 14 metri. Il manufatto, seppur fondato nel substrato, non ha assolto alla funzione di prevenzione e bonifica dei fenomeni franosi: segni evidenti sono le lesioni alla struttura dello stesso nonché all'abitato sovrastante. Nel periodo 1999-2001 tale struttura è stata consolidata nell'ambito di un ben più ampio progetto di recupero e riqualificazione del centro storico di Campi, tutt'ora in corso. Durante le fasi di studio propedeutiche alla progettazione esecutiva è stata scavata una trincea esplorativa in prossimità della sommità dell'opera di contenimento di cui alla

figura 2b, laddove erano maggiormente evidenti le deformazioni dell'insieme struttura-scarpata. La presenza di numerose fasi di ricarica del manto stradale, in relazione al continuo abbassamento della struttura e di parte del retrostante piazzale, ha consentito di stimare il cedimento verticale complessivo, ammontante a circa 20 cm, nonché il tasso di cedimento medio annuo pari a circa 0.43 centimetri/anno.

La costruzione di un modello numerico convergente con i processi fisici osservati ha richiesto l'esecuzione di decine di simulazioni di complessità sempre maggiore. Nella costruzione del modello sono stati utilizzati diverse leggi costitutive, ognuna capace di cogliere il comportamento dei singoli geomateriali coinvolti. Il problema, nella sua configurazione finale è stato simulato con la realizzazione dell'opera di contenimento nel 1954 e la ricostruzione della storia tensionale e deformativa nei successivi 50 anni, con la determinazione dei fattori di sicurezza iniziali, intermedi e finali (fig. 6c). Per la convergenza con i cedimenti misurati è stato necessario implementare nel calcolo il comportamento reologico delle peliti del substrato (processo di rammollimento interno), così come emerso dalle prove edometriche di lunga durata, nonché il rammollimento delle stesse legato all'evoluzione di processi esterni (softening). In effetti le prove di taglio diretto, eseguite in diverse condizioni di sottosaturazione ed in saturazione, hanno consentito di individuare un'ampia forbice relativa della coesione

intercetta, variabile da un minimo di 20 kPa (compatibile con Sciarra N., 1988), ad un massimo di 200 kPa. L'utilizzo indifferente del valore minimo della coesione è apparso immediatamente incongruente con la geometria del problema, dal momento che com'è noto nella meccanica delle terre, a differenza di quanto accade nella maggioranza dei problemi di Ingegneria Strutturale nei quali lo stato tensionale indotto dal peso proprio delle strutture è trascurato (o inglobato nei carichi esterni), la non linearità del legame costitutivo dei terreni impone di mettere in conto lo stato tensionale dovuto al peso proprio degli stessi. Con un valore di soli 20 kPa le bancate marnose sono risultate inidonee a sostenere il carico litostatico sovrastante, rappresentato da depositi alluvionali di spessore di circa 14 m (fig. 2b).

La variazione della coesione è stata di conseguenza simulata sia nello spazio che nel tempo: nel primo caso mediante l'utilizzo di un'apposita procedura di calcolo implementata nel software utilizzato (Z_SOIL.PC) e denominata "data superelement", mentre nel secondo caso applicando una legge di softening (fig. 6b) utilizzando una funzione iperbolica inversa (da Chan D.H., 1999, modificata):

$$c' = c_0 \left[1 - \frac{t}{c^* t + t_f \left(\frac{c_0}{c_0 - c_f} - c^* \right)} \right] \quad (1)$$

dove c_0 , c_f e c^* rappresentano rispettivamente la coesione iniziale, finale ed il tasso di variazione, t il tempo, t_f il tempo di riferimento.

Per quanto concerne invece il rammollimento inteso come processo interno (creep), lo stesso è stato simulato mediante il modello di Kelvin-Voigt, con legge di variazione logaritmica del tipo:

$$C(t, t_0) = A \ln(1 + Bt) \quad (2)$$

con $C(t, t_0) = \varepsilon^{cr}$ (deformazioni per creep) ed A e B parametri derivabili da prove edometriche (da ZACE, 2003). Per ottenere infine la totale convergenza del modello numerico con tutti gli elementi derivanti dalle indagini storiche, geologiche e geotecniche è stato necessario anche simulare la presenza delle intercalazioni delle bancate arenacee con gli strati pelitici, con una inclinazione apparente degli stessi di circa 17° a franapoggio, nonché dei relativi sistemi di giunti associati (tab. 4).

I risultati hanno quindi evidenziato un cedimento verticale (Δs) dell'opera di sostegno di 19.79 cm (fig. 6d – nodo 200) in perfetto accordo con i rilievi eseguiti, a fronte di uno spostamento orizzontale (Δu) di soli 0.18 centimetri, in buon accordo con i rilievi strutturali. Il nodo

1, appartenente alla base del muro esterno della Chiesa della Misericordia (fig. 2b) ha di conseguenza fornito valori di $\Delta s = 0.9$ cm e $\Delta u = 0.018$ cm, con un rapporto di inflessione $\Delta/L = 1.13e^{-3}$, responsabile del quadro fessurativo dal quale l'edificio risulta essere affetto, tale da richiedere interventi di consolidamento fondale e strutturale.

Le analisi di stabilità, eseguite durante la simulazione dell'intero processo, hanno di fatto fornito coefficienti di sicurezza sempre molto superiore all'unità (fig. 6c), con valori minimi di 1.15 in assenza dell'opera di sostegno e di 1.20-1.21 a distanza di circa 10 anni dalla realizzazione dell'intervento di consolidamento (anno 1954). I dati calcolati dimostrano di conseguenza come un fattore di sicurezza non sia esclusivamente espressione di salvaguardia, ma indica semplicemente una condizione al contorno lontana dal possibile collasso, ovvero rappresenta una condizione necessaria ma non sufficiente nella progettazione delle opere di sostegno. Infine la figura 6a fornisce la tipologia di collasso per l'analisi di stabilità dell'insieme terreno-struttura anno 1954, con un relativo fattore di sicurezza di 1.63.

4.2 Sito B – frazione Nocella



Figura 7. Fratture di trazione sulla scarpata bordante il settore meridionale della località Nocella (sito B).

È riferito all'analisi di stabilità di una scarpata, in località Nocella, di origine fluviale a parete subverticale, con altezza di circa 60 m, caratterizzata da variazioni latero-verticali di facies tipiche dei modelli deposizionali tipo conoide subaerea. Le lesioni strutturali sugli edifici, gli accumuli gravitativi alla base della scarpata, le antiche strade troncate che conducono nel vuoto e le fratture di trazione costituiscono chiari indici di instabilità regressiva e quindi di una pericolosità latente. Già il Palma nel 1832 citava: *alla Nocella davano ingresso tre porte: di quella da capo e di quella da piedi rimangono le vestigie ...omissis ... le fortificazioni su questo lato ...omissis ... sono state inghiottite dai fiumi, che rodono tutti e tre i divisati Quartieri.*

Dall'analisi geomorfologica e dalle informazioni di carattere storico è emerso che la scarpata in questione subisce una regressione per "scatti", caratterizzata da fenomeni di crollo improvviso palesati dall'evoluzione di fratture di trazione (fig. 7).



Figura 8. In primo piano il settore interessato da un crollo nel dicembre 2003, con regressione della scarpata di circa 2 metri.

La figura 8 mostra chiaramente come tale instabilità regressiva coinvolga progressivamente l'abitato della frazione della Nocella, laddove l'estensione topografica delle frane, e quindi l'arretramento delle scarpate, è funzione dell'elevata rigidità dei depositi alluvionali cementati e del sistema di fratturazione associato agli scarichi tensionali.

Anche in tale caso la costruzione del modello numerico ha richiesto diverse simulazioni di complessità crescente, per i quali nella figura 9 vengono presentati i risultati attinenti al modello iniziale ed a quello finale. Nel primo caso il sistema è caratterizzato dalla presenza dei soli litotipi, per cui il fattore di sicurezza e la deformata a rottura dipendono esclusivamente dalle proprietà geotecniche dei terreni e dalla geometria del problema. In tali condizioni il coefficiente di sicurezza della scarpata è pari a 1.48, mentre l'estensione e la forma della zona a rottura non corrispondono alle informazioni di carattere geologico-geomorfologico nonché alle informazioni storiche ed alle testimonianze dirette.

Nel modello finale sono stati introdotti elementi elastoplastici di contatto, al fine di simulare la presenza e l'estensione delle fratture di trazione, mentre la variazione della coesione per cementazione è stata simulata con le stesse modalità del sito "A", e cioè con una procedura di calcolo definita "data superelement" (ZACE, 2003). In tal modo sono stati tenuti in conto i processi di rammollimento esterni legati all'alterazione meteorica della cementazione a partire dalle superfici esposte e dalla presenza delle fratture di trazione. Il relativo coefficiente di sicurezza risulta essere di 1.04 denotando quindi condizioni prossime al collasso, mentre la geometria della zona a rottura risulta aderente alla realtà, con particolare riferimento alla figura 7.

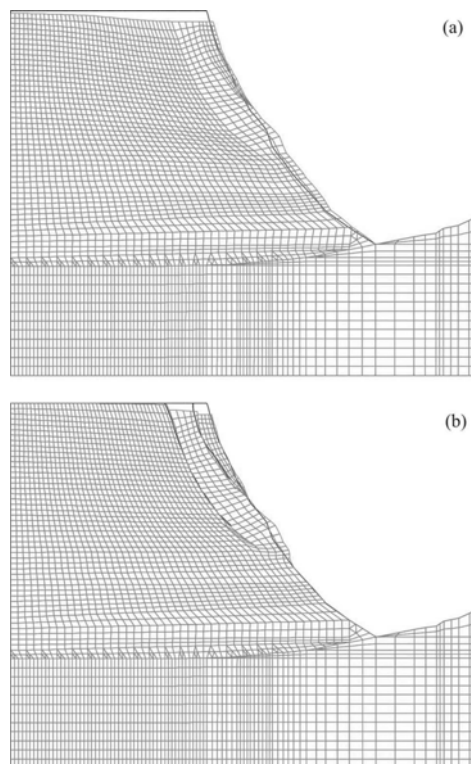


Figura 9. Analisi di stabilità della scarpata di cui alla figura 7; a) modalità di rottura per un modello semplice; b) modalità di rottura in presenza di fratture di trazione e di una legge di variazione della cementazione chimica (softening).

5 CONCLUSIONI

L'abitato del Comune di Campli, noto in tutto il mondo per la condivisione con Roma e Gerusalemme del privilegio della Scala Santa, è storicamente noto essere soggetto a dissesti idrogeologici. Il primo dissesto per il quale si hanno informazioni scritte è del 1700 e a tale periodo risale il lento ed inesorabile abbandono dell'abitato a causa della progressiva diminuzione dell'estensione del centro storico delle frazioni Nocella, Campli e Castelnuovo. L'ultimo crollo importante risale al 1976 con il coinvolgimento di un intero edificio residenziale.

Mentre diversi sono stati gli studi a carattere geologico-geomorfologico riguardanti i problemi citati, per la prima volta viene proposta un'interpretazione geotecnica dei dissesti in parola, quale sintesi di circa un decennio di indagini geognostiche di supporto dei numerosi interventi di consolidamento tutt'ora in essere.

Nel dettaglio è stato analizzato il comportamento di due siti di particolare interesse (siti "A" e "B"), laddove risultano coinvolte scarpate subverticali che cingono la porzione meridionale degli abitati di Campli e della Nocella, con il coinvolgimento di edifici residenziale e religiosi recenti ed antichi.

Le modellazioni numeriche ad elementi finiti hanno di fatto confermato le ipotesi di lavoro, basate sulle informazioni non solo geologico-geomorfologiche e geotecniche, ma anche di natura storica, a partire dal

reperimento di antichi documenti presso l'Archivio di Stato di Teramo (TE). Il ricorso a modelli numerici complessi, capaci di cogliere gli aspetti salienti dei problemi affrontati, ha imposto l'utilizzo di una procedura interattiva affinché gli stessi potessero evolvere attraverso passi di calibrazione tra le soluzioni numeriche, i monitoraggi ambientali e strutturali, le prove in situ e quelle di laboratorio.

Nel caso del sito "A", le deformazioni rilevate sull'opera di sostegno della scarpata e sulla limitrofa Chiesa della Misericordia sono da attribuire alla sovrapposizione del comportamento reologico delle argille del substrato con fenomeni di softening legati all'alterazione meteorica delle stesse a partire dalle superfici esposte, come dimostrato anche da prove di laboratorio eseguite in diverse condizioni di sottosaturazione ma anche di totale saturazione. Il coefficiente di sicurezza dell'insieme terreno-struttura, calcolato in tali condizioni, si è sempre rivelato superiore all'unità, evidenziando di conseguenza come un'analisi di stabilità rappresenti una condizione necessaria ma non sufficiente nella progettazione delle strutture di sostegno.

Per quanto riguarda invece il sito "B", le analisi di stabilità hanno richiesto l'implementazione nel modello numerico di elementi elasto-plastici di contatto che simulassero la presenza e l'estensione delle fratture di trazione oltre ad una legge di variazione nello spazio delle condizioni di cementazioni chimica dei depositi alluvionali affioranti lungo l'intera scarpata analizzata. Il relativo fattore di sicurezza è risultato pari a 1.04, ovvero corrispondente a condizioni di incipiente collasso.

E' probabile che il processo sia attualmente autoalimentante, ovvero che a partire dalle prime condizioni di collasso coeve con le fasi di approfondimento del reticolo idrografico si sia instaurato un sistema di fratturazione derivante dallo scarico tensionale. Tali fratture oggi alimentano l'instabilità regressiva dei versanti, mentre i crolli che si susseguono, talora di dimensioni importanti tali da coinvolgere settori dell'abitato, suggeriscono lo sviluppo di nuove fratture. A ciò infine si sovrappone la variazione dell'entità della cementazione chimica, la quale conferisce un'elevata rigidità ai depositi alluvionali, sia nello spazio che nel tempo, in funzione dello sviluppo di processi di rammollimento.

L'esecuzione di prospezioni geofisiche, con l'utilizzo di metodologie tipo sismica a riflessione ad alta risoluzione in onde S_H e georadar, finora negate per mancanza di fondi, potrebbero fornire un valido aiuto nella ricerca e mappatura delle fratture presenti sotto gli abitati di Campli, Nocella e Castelnuovo, e fornire di conseguenza nuovi elementi necessari per la formulazione di scenari di possibili danni.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV., 1996. *Le valli della Vibrata e del Salinello*. Documenti dell'Abruzzo Teramano, Fondazione Cassa di Risparmio della Provincia di Teramo, 1996

- Bucciarelli I., 1988. *Indagine storica sui fenomeni franosi della provincia di Teramo: un esempio sulla correlazione fra franosità e sviluppo urbanistico del paese di Campli*. Tesi di Laurea Università G. D'Annunzio, Chieti
- Buccolini M., Crescenti U., Sciarra N., 1994. *Interazione fra dinamica dei versanti ed ambienti costruiti: alcuni esempi in Abruzzo*. Il Quaternario 7(1), 179-196
- Bisetti A., Commend S., Tendon D., Zimmermann Th. 2001. *Finite element stability analyses of natural caves*. Eurock 2001
- Chan D.H., 1999. *Analysis and case histories of time dependent movement of soil*. Rivista italiana di geotecnica, XXXIII (1), 23-24
- Chen W.F., Baladi G.Y., 1985. *Soil Plasticity: Theory and Implementation*. Elsevier New York, 113-155
- Doležalová M., Hladík I., Zemanová V., Danko J., 2001. *Problem solving by interactive use of numerical models and field measurements*. Proceedings X International Conferenze on computer methods and advances geomechanics, Tucson 2001 - Vol. 1, 39-48
- Palma N., 1832. *Storia della città e diocesi di Teramo*. Archivio di Stato di Teramo (TE)
- Sciarra N., 1988. *Geologia e geotecnica di argille consistenti del Pliocene abruzzese*. Boll. Soc. Geol. It., 107
- ZACE (2003). *Z_SOIL.PC Theoretical Manual*. Elmepress International, Zace Services Ltd, Lousanne.

ABSTRACT

GEOTECHNICS CONTRIBUTION IN THE COMPREHENSION OF THE HISTORICAL INSTABILITY IN THE TOWN OF CAMPLI (TE).

Keywords: historical instability, softening, anisotropy, numeric models.

The memory summarizes a study with a broad spectrum of observation, regarding the history of the Campli area (TE), and the hidrogeological instability during a period of nine centuries. Campli was a Roman outpost by an archeologic site of the bronze age, surrounded by the two streams Fiumicino and Siccagno, it flourished till the XVIIth century so much to become more important than Teramo. Today it is well known for the privilege of its "Holy staircase" granted by the Pope Clemente XIV in 1776 and it is ad famous all over the world ad Rome and Gerusalem. From the 17th century a slow and unavoidable process of declane started, because of the unstable geological nature of the place which caused a progressive reduction of the expansion of the historic centre. In the past several historical a geomorphological studies have been carried on but today for the first time a geotechnic interpretation of the hidrogeological instability still in action that takes up remarkable, economic and human resources, is proposed.

Probably without these instabilities Teramo would be in the district of Campli.