

PROPRIETÀ GEOLOGICO-TECNICHE DELLA POZZOLANA FLEGREA ED EFFETTO DELLA SUZIONE SULLA STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO

ENGINEERING GEOLOGICAL PROPERTIES OF THE PHLEGRAEAN POZZOLAN SOIL (CAMPANIA REGION, ITALY) AND EFFECT OF THE SUCTION ON THE STABILITY OF CUT SLOPES

PANTALEONE DE VITA(*), ANNA CLAUDIA ANGRISANI(*) & ENRICO DI CLEMENTE(**)

(*) Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Napoli "Federico II" - Italy

(**) Dipartimento di Scienze della Terra - Laboratorio di Geologia Applicata - Università di Napoli "Federico II" - Italy

RIASSUNTO

La pozzolana è una roccia piroclastica da sciolta a tenera, molto diffusa nei Campi Flegrei ed utilizzata fin dall'antichità nella preparazione di malte cementizie. La rilevanza industriale ed economica di questo materiale geologico e la sua diffusa coltivazione nell'area flegrea, mediante cave a fossa, hanno motivato lo studio delle sue proprietà geologico-tecniche al fine di comprendere le condizioni di stabilità dei fronti di scavo. La pozzolana, per la sua prevalente componente sabbioso-limosa presenta, tra le altre particolarità tipiche dei depositi piroclastici, una non trascurabile coesione apparente, in condizioni di parziale saturazione. Da ciò è scaturito l'interesse per l'analisi della stabilità dei pendii artificiali realizzati con questo materiale, anche in considerazione dell'effetto indotto dalle variazioni del contenuto d'acqua in relazione al regime idrologico. Lo studio ha riguardato un'area campione corrispondente ad un fronte di scavo di una cava a fossa situata nel Comune di Giugliano in Campania (NA), in località Zaccaria-Setteccainati, dove la pozzolana affiora con le sue caratteristiche tipiche. Al fine di valutare la possibile influenza del regime idrologico sulle proprietà meccaniche della terra piroclastica, e quindi sulla stabilità dei pendii artificiali, sono state applicate metodologie geologico-tecniche diversificate, integrate con tecniche tipicamente utilizzate per la caratterizzazione delle proprietà idrauliche delle terre in condizioni di parziale saturazione.

Nel presente lavoro sono illustrati e commentati i risultati delle indagini sperimentali, di campo e di laboratorio, condotte sulla terra pozzolanica, comprendenti l'identificazione e la classificazione geologico-tecnica dei terreni piroclastici e la stima delle loro proprietà meccaniche e di ritenzione idrica. L'applicazione del modello di resistenza al taglio in condizioni di parziale saturazione ha consentito la valutazione della coesione apparente derivante dalla suzione. Da questi risultati, verificati mediante prove di taglio in condizioni di parziale saturazione, è stato possibile comprendere come le peculiari proprietà meccaniche di questi terreni e l'effetto della suzione influenzino sensibilmente l'altezza critica dei fronti di scavo e quindi la loro stabilità.

PAROLE CHIAVE: terre piroclastiche, attività estrattive, coesione apparente, stabilità dei pendii, fronti di scavo

ABSTRACT

Pozzolan is an incoherent to pseudo-coherent pyroclastic soil that is much diffused in the Phlegraean Fields and has been used since ancient times for cement making. The industrial and economic relevance of this geological material gives rise to quarrying activities distributed in the Phlegraean area, which are carried out by means of pit quarries. These issues stimulated engineering geological analyses of the quarry cut slopes discussed in this paper and aimed to develop advanced slope stability analyses. Pozzolan soil, due to its prevailing sandy and silty components, among the other typical features of pyroclastic soils, does not have a negligible apparent cohesion in unsaturated conditions. These engineering geological issues motivated the interest in the stability analyses of cut slopes in pozzolan soil, also considering the effect due to the variable water content related to hydrologic regime. This paper regards the results of engineering geological analyses carried out on a sample area that corresponds to a cut slope of a pozzolan pit quarry located in Giugliano in Campania (NA) in the Zaccaria-Setteccainati locality where the pozzolan outcrops with its typical features. In order to evaluate the influence of the hydrologic regime on the mechanical characteristics of pyroclastic soils, and therefore on the stability of the artificial slopes, different engineering geological analyses have been carried out, coupled with those techniques pertaining to the unsaturated soil hydraulic characterisation.

In this paper, the results of field and laboratory experimental analyses carried out on the pozzolan soil including soil identification and the engineering geological classification, the estimation of mechanical and water retention properties are discussed. The application of the unsaturated shear strength model has allowed the estimation of the apparent cohesion effect. From these results, verified by means of direct shear tests in unsaturated conditions, the role of mechanical properties, the suction effect on the cut slope critical height and, therefore, on the slope stability, have been comprehended.

KEY WORDS: pyroclastic soil, quarries, apparent cohesion, slope stability, cut slopes

PREMESSA

Con il termine pozzolana è propriamente inteso il materiale piroclastico, da sciolto a pseudocoerente, estratto nei pressi di Pozzuoli (Napoli - Italia meridionale), e, nell'accezione più ampia, anche i prodotti vulcanici simili estratti nelle cave situate nei pressi di Roma e di altre località del Lazio. La pozzolana è un deposito piroclastico prevalentemente da flusso a granulometria variabile (SCHMIDT, 1981) dalle ceneri fini (limo e argilla) a grossolane (sabbia) con inclusi lapilli (ghiaia), costituiti in prevalenza da pomice ed in subordine da scorie. La pozzolana presenta un tipico colore grigio chiaro ed è costituita da frammenti pomice e vetrosi finissimi e da ceneri di composizione alcalina-trachitica. Quando alterata e/o pedogenizzata assume un colore marrone brunastro. Dal punto di vista vulcanologico, la pozzolana è ascrivibile alla facies sciolta della Formazione del Tufo Giallo Napoletano (DE LORENZO, 1904; RITTMANN, 1950a; 1950b; ROSI & SBRANA, 1983; DI GIROLAMO *et alii*, 1984; SCARPATI *et alii*, 1993), rappresentativa del terzo periodo dell'attività vulcanica del distretto dei Campi Flegrei (DI GIROLAMO *et alii*, 1984).

La pozzolana è stata utilizzata fin dall'epoca romana (viene menzionata come "*rena di Cuma*" nel *De Architettura* di Vitruvio) nella produzione di una sorta di cemento, l'*opus caementicum*, in grado di fare rapidamente presa anche sott'acqua e dotato di durata eccezionalmente lunga. L'uso di questo impasto facilitò, già in epoca romana, la costruzione di cupole di grande ampiezza, come quella del Pantheon, in quanto la presa più rapida facilitava la costruzione delle centine. L'utilizzazione della pozzolana e delle relative tecniche costruttive andarono perdute con la fine dell'Impero Romano, ma nel tardo Rinascimento il suo uso venne reintrodotta in ambito edilizio ed attualmente essa è ancora utilizzata nella produzione di leganti idraulici. Le proprietà della pozzolana derivano dalla sua composizione caratterizzata prevalentemente da silice (SiO_2) e da allumina (Al_2O_3), mal cristallizzate o completamente amorfe; essa è in grado di provocare l'indurimento della calce e di rendere il conglomerato molto resistente all'azione dell'acqua, grazie alla formazione di silicati di calcio idrati (C-S-H) e alluminati di calcio idrati (C-A-H), per reazione della calce con la silice e l'allumina della pozzolana. Inoltre, la miscela calce-pozzolana ha la capacità non solo di indurire in assenza di CO_2 ma anche con velocità maggiore di quella usualmente richiesta dal processo di carbonatazione della calce.

La tecnica più diffusa di coltivazione della pozzolana è, nell'area flegrea, quella delle cave a fossa, conseguente all'esigenza di ottemperare sia all'estrazione di ingenti volumi e sia alla morfologia poco acclive delle aree dove questo materiale è affiorante o subaffiorante. Da ciò deriva la presenza di numerose cave con fronti di scavo subverticali ed elevati fino a 30 m, che, tuttavia, appaiono generalmente stabili e con occasionali instabilità limitate alla parte più superficiale, in concomitanza di eventi pluviometrici di elevata intensità e/o durata. Da queste caratteristiche dei fronti di scavo è scaturito l'interesse per l'approfondimento delle conoscenze sulle proprietà di questo materiale geologico che, oltre a poter motivare la stabilità dei

PREFACE

The term pozzolan properly indicates an incoherent to pseudo-coherent pyroclastic soil mined in the area surrounding Pozzuoli (Naples - southern Italy); in a wider meaning, any similar volcanic deposits quarried in the vicinity of Rome and in other localities of Lazio (central Italy) are also intended. Pozzolan soil is mainly an ash flow deposit with grain size (SCHMIDT, 1981) varying from fine ash (silt and clay) to coarse ash (sand) with subordinated lapilli (gravel) constituted by pumices and secondarily by scoriae. Pozzolan soil presents a typical light grey colour and it is made up of by very fine pumiceous vitreous fragments as well as fine ash both with an alkali-trachytic composition. It assumes a brownish colour when weathered and pedogenised. From the volcanological point of view, pozzolan soil represents the eruptive products of the incoherent facies of the Neapolitan Yellow Tuff (DE LORENZO, 1904; RITTMANN, 1950a; 1950b; ROSI & SBRANA, 1983; DI GIROLAMO *et alii*, 1984; SCARPATI *et alii*, 1993), representative of the third period of the Phlegraean Fields volcanic activity (DI GIROLAMO *et alii*, 1984).

Pozzolan soil has been used since Roman epoch (it is mentioned as "Cuma's sand" in the Vitruvius' *De Architettura*) in the production of a sort of cement, the *opus caementicum*, able to rapidly set underwater and with a very long life. This mixture favoured the construction of huge cupolas, in Roman times, such as that of the Pantheon, because of the rapid cement setting for centring construction. The use of pozzolan soil as well as the relative construction techniques, were lost when the Roman Empire came to an end. In the late Renaissance, the use of pozzolan soil in the building industry was restored and it is still in use for the preparation of hydraulic cements. Pozzolan properties derive from its composition that is mainly characterised by silica (SiO_2) and by alumina (Al_2O_3) with a low crystallization grade or completely amorphous from which the lime setting and the resistance to the water depend. This is due to the formation of calcium hydrate silicate (C-S-H) and calcium hydrate alumina (C-A-H) and related to the reaction of the lime with the silica and the alumina of the pozzolan. Moreover, the mixture lime-pozzolan not only has the capacity to set without CO_2 but also with a velocity faster than that requested by the usual carbonatization process of lime.

The most diffused technique of pozzolan quarrying in the Phlegraean area is that of the pit quarries, which complies both to the extraction of considerable volumes and to the gentle topography of the areas where this material outcrops or where it is scarcely covered. From these constraints, derives the existence of numerous quarries with subvertical and cut slopes, up to 30 m high, that are generally stable and occasionally unstable only in the surficial part, in concomitance of high intensity/duration rainfall events. From these conditions of the cut slopes the interest in deepening the knowledge of engineering geological properties of such a geological material has derived. Besides the comprehension of the sta-

fronti di scavo, fornisce elementi conoscitivi tali da consentire la programmazione di interventi di recupero e la gestione di nuove cave.

In questo lavoro sono stati analizzati i pendii costituenti i fronti di scavo di una cava a fossa, situata nel Comune di Giugliano in Campania (NA) nella località Zaccaria-Sette Cainati. Le indagini sperimentali effettuate per la caratterizzazione geologico-tecnica della terra pozzolanica sono state articolate in prove di campo e di laboratorio. Le prove di laboratorio hanno permesso l'identificazione e la classificazione della terra piroclastica nonché la stima delle sue proprietà idrauliche e meccaniche nel campo della parziale saturazione, mentre le prove di campo hanno essenzialmente riguardato il monitoraggio della suzione per un periodo a cavallo di una stagione idrologica (2005-2006). Tali prove hanno fornito dati utili per l'analisi dell'effetto della variazione del contenuto d'acqua sulle caratteristiche meccaniche delle terre piroclastiche e quindi sulla stabilità dei fronti di scavo.

CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E STRATIGRAFICA DELL'AREA DI STUDIO

La cava a fossa su cui è stato incentrato lo studio è sita nel settore nord-occidentale della Piana Campana e, più precisamente, alla periferia nord del distretto vulcanico dei Campi Flegrei (Fig. 1).

bility of artificial slopes, the focus of the study is to achieve new findings dealing with the restoration of the existing quarries and the management of new ones.

In this paper, the cut slopes of a pit quarry located in Giugliano in Campania (NA) in the Zaccaria-Sette Cainati locality were analysed. The experimental studies carried out for the engineering geological characterisation of pozzolan soil were articulated in field and laboratory tests. The laboratory tests permitted the identification and the classification of the pyroclastic soil as well as the estimation of its hydraulic and mechanical properties in unsaturated regime, while field tests essentially regarded the suction monitoring across an annual hydrological cycle (2005-2006). Such tests allowed the collection of data useful for the comprehension of mechanical characteristics of pyroclastic soils and therefore on cut slope stability.

GEOLOGICAL AND STRATIGRAPHICAL CHARACTERIZATION OF THE STUDY AREA

The pit quarry in which the study was focused is located in the northwestern sector of the Campanian Plain and more precisely in the northern periphery of the Phlegraean Fields (Fig. 1).

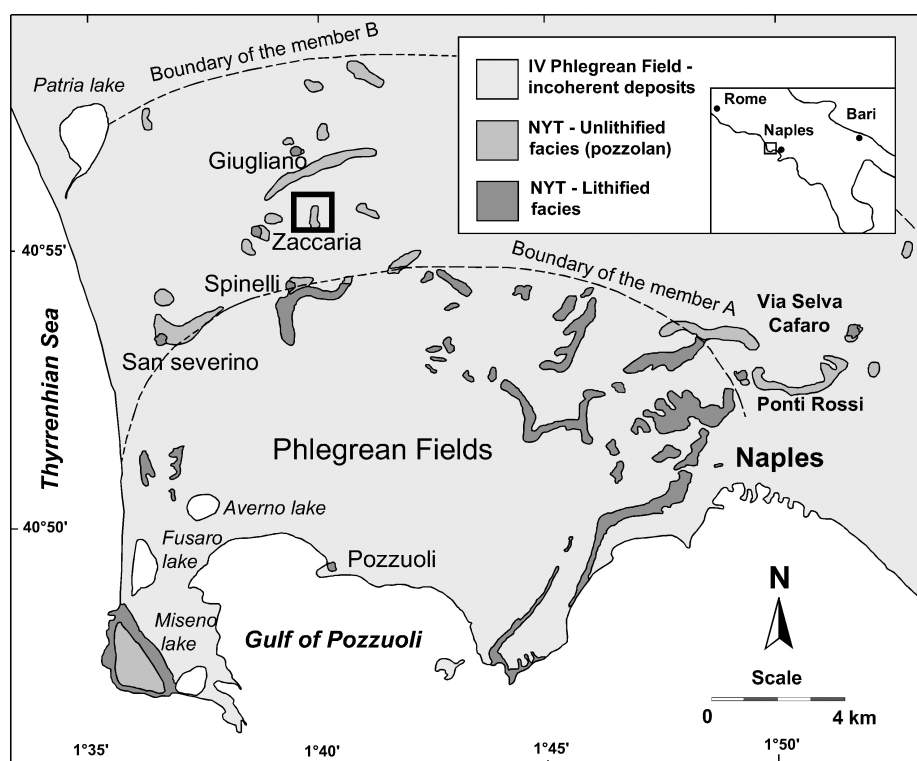


Fig. 1 - Carta geologica dei Campi Flegrei riferita agli affioramenti dei depositi del IV periodo flegreo (8.000-500 anni fa), caratterizzati in prevalenza da piroclastiti sciolte, e del III periodo (35.000-10.500 anni fa), alla cui fine è stato ascritto il Tufo Giallo Napoletano, distinguibile nella facies litificata (membro A) e non litificata (membro B) (da COLE & SCARPATI, 1993; ridisegnata). Il quadrato indica l'ubicazione della cava oggetto di studio
 - Geological map of Phlegraean Fields referred to the outcroppings of the IV Phlegraean period (8,000-500 years B.P.), characterised by loose pyroclastic deposits, and of the III Phlegraean period (35,000-10,500 years B.P.), to which end the Neapolitan Yellow Tuff (NYT) has been attributed, that can be distinguished in a lithified facies (member A) and unlithified facies (member B) (redrawn from COLE & SCARPATI, 1993). The square indicates the location of the quarry analysed in this paper

Com'è noto, una delle manifestazioni più importanti dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei (DE LORENZO, 1904; RITTMANN, 1950a; 1950b; ROSI & SBRANA, 1983; DI GIROLAMO *et alii*, 1984; SCARPATI *et alii*, 1993) è l'eruzione del Tufo Giallo Napoletano (TGN), ascritta alla fine del terzo periodo (35.000-10.500 anni fa) dell'attività vulcanica del distretto dei Campi Flegrei (DI GIROLAMO *et alii*, 1984), i cui prodotti sono costituiti prevalentemente da pomici, di dimensioni talora notevoli, e frammenti litici (trachite od ossidiana) dispersi in una matrice cineritica prevalentemente grossolana. Tali prodotti presentano composizione variabile da trachitica a fonolitica, probabile conseguenza di una zonazione all'interno della camera magmatica (DE GENNARO *et alii*, 2000). L'età del Tufo Giallo Napoletano è stata oggetto di diverse stime. L'ultima datazione radiometrica ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), effettuata su cristalli di sanidino prelevati da campioni di pomici, ha recentemente attribuito l'età di 15.473 ± 292 anni (D'INSINGA *et alii*, 2004). I depositi del TGN si rinvengono (Fig. 1), in affioramento o ricoperti dai prodotti piroclastici sciolti del quarto periodo flegreo (8.000-500 anni fa), con tre differenti facies, cui competono caratteristiche geologico-tecniche molto differenti: una facies litoide dal tipico colore giallo, che prende il nome di tufo; una facies intermedia, meno coerente, che prende il nome di Mappamonte e rappresenta la prima fase del processo di zeolitizzazione; la facies sciolta conosciuta come pozzolana, dal tipico colore grigio chiaro e costituita da frammenti pomiceo-vetrosi finissimi e da ceneri di composizione alcali-trachitica. A differenza della facies litoide, la facies sciolta conserva ancora i caratteri deposizionali primari, non essendo stata soggetta al fenomeno della zeolitizzazione che, dopo la messa in posto, per effetto della circolazione di fluidi ad elevata temperatura (LIRER & MUNNO, 1975), tende ad obliterare le strutture sedimentarie.

Nella zona di Giugliano in Campania affiorano i due membri in cui è suddivisa la formazione del Tufo Giallo Napoletano (COLE & SCARPATI, 1993), il membro A ed il membro B. Tali membri poggiano su una breccia poligenica violacea che è associata alla Formazione dell'Ignimbrite Campana ascrivibile al secondo periodo flegreo (42.000-39.000 anni fa) ed è costituita da blocchi scoriacei grossolani di diametro variabile tra 30 e 50 cm, immersi in scarsa matrice (DI GIROLAMO *et alii*, 1984).

Il Membro A, che costituisce la base della Formazione, si è formato attraverso più eventi vulcanici da caduta (Fig. 2), interrotti da una serie di episodi di *surges* piroclastici. Nel deposito si riconoscono sei unità deposizionali (COLE & SCARPATI, 1993) che, dal basso verso l'alto, sono: l'unità A1, costituita da livelli di cenere arricchita in pomici, frammenti vetrosi, frammenti di feldspati, mica e clasti litici con diametro inferiore a un millimetro e caratterizzata dalla presenza di strutture sedimentarie quali *sand-waves* e laminazioni incrociate che evidenziano un'origine per *surge* piroclastico; l'unità A2, costituita da strati di ceneri con intercalazioni di lapilli accrezionati, in cui è possibile distinguere laminazioni incrociate; le unità da A3 ad A6, costituite di strati di ceneri a grana fine con intercalazioni di livelli di pomici e di lapilli da caduta.

As it is known, one of the most important events of the volcanic activity in the Phlegraean Fields (DE LORENZO, 1904; RITTMANN, 1950a; 1950b; ROSI & SBRANA, 1983; DI GIROLAMO *et alii*, 1984; SCARPATI *et alii*, 1993) is the Neapolitan Yellow Tuff eruption (NYT) which refers to the end of the third period of Phlegraean Fields' volcanic activity (35,000-10,500 years B.P.) (DI GIROLAMO *et alii*, 1984), and whose components are mainly constituted of pumices, which are occasionally of a great dimension, and lithic fragments (trachyte and obsidian) dispersed in a fine to coarse ash matrix. Such products are variable in composition from trachytic to monolytic, that can probably be attributed to a zonation in the magmatic chamber (DE GENNARO *et alii*, 2000). The age of the Neapolitan Yellow Tuff has been updated several times, the last radiometric dating ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), carried out on sanidine crystals from pumice samples, has more recently dated the Formation to 15.473 ± 292 year B.P. (D'INSINGA *et alii*, 2004). The deposits of the NYT have been observed (Fig. 1), outcropping or buried by the incoherent volcanic deposits of the fourth Phlegraean period (8,000-500 years B.P.), with three different facies, to which very different engineering geological properties correspond: a typically yellow lithoid facies whose the term tuff has been attributed; an intermediate facies, less coherent, named Mappamonte that represents the first stage of the zeolitization process; the incoherent facies known as pozzolan, characterised by the typical light grey colour and constituted by very fine pumiceous vitreous fragments and ashes of an alkali-trachytic composition. Differently from the lithoid facies, the incoherent one preserves the original depositional characters because it has not been subjected to the zeolitization process which, owing to the high temperature fluid circulation (LIRER & MUNNO, 1975), tends to obliterate the sedimentary structures after deposition.

In the area surrounding Giuliano in Campania, two members A and B of the Neapolitan Yellow Tuff Formation outcrop (COLE & SCARPATI, 1993). Such members overlay a purplish polygenetic breccias constituted by large scoriaceous volcanic bombs ranging from 30 to 50 cm in diameter and immersed in a scarce matrix, which was associated to the Campanian Ignimbrite Formation belonging to the second Phlegraean period (42,000-39,000 years B.P.) (DI GIROLAMO *et alii*, 1984).

Member A constitutes the bottom of the Formation which was formed by means of numerous pyroclastic fall events (Fig. 2) interrupted by a series of pyroclastic surge episodes. In the deposits, six depositional units have been identified (COLE & SCARPATI, 1993) that, from the bottom to the top, are A1 to A6 units. A1 unit, constituted of ash levels enriched in pumices, vitreous fragments, feldspar fragments, mica and less than one millimeter diameter lithic clasts and moreover characterised by the presence of sedimentary structures as sand-waves and cross-laminations from which, it has been hypothesised, was produced by a pyroclastic surge. The A2 unit is constituted of ash levels intercalated with accretionary lapilli in which it is possible to distinguish cross-laminations. Units A3 to A6, are constituted of fine ash levels with intercalated pumices levels and pyroclastic fall deposits.

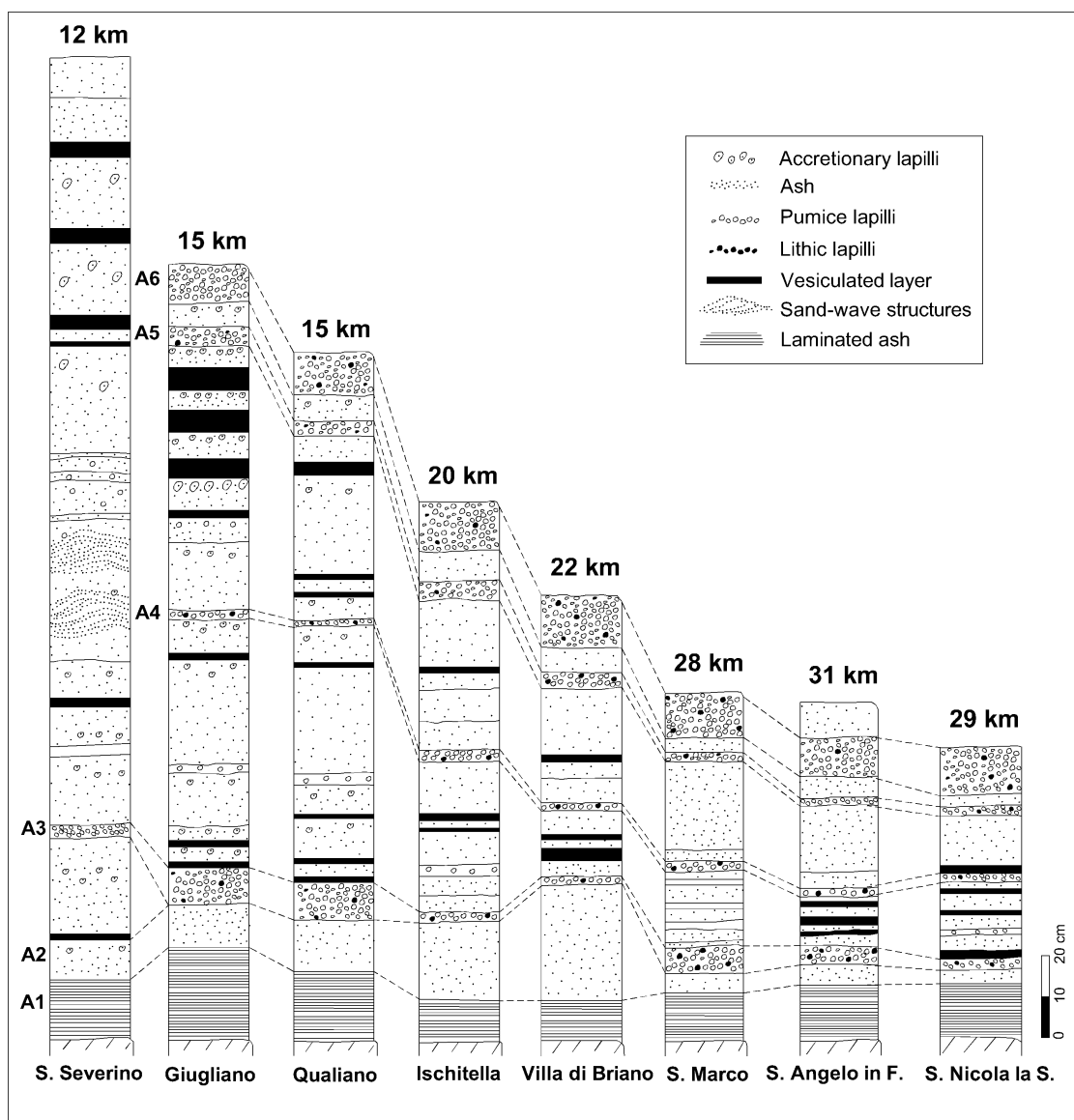


Fig. 2 - Colonne stratigrafiche raffiguranti il membro A e relativa distanza dal centro eruttivo (ridisegnato da COLE & SCARPATI, 1993)
 - Stratigraphic columns sketching member A in relation with the distance from the eruptive centre (redrawn from COLE & SCARPATI, 1993)

Il Membro B, su cui sono state preferenzialmente incentrate le analisi discusse in questo lavoro, è stato generato dalla seconda fase dell'eruzione del TGN, caratterizzata dalla successione di numerosi flussi piroclastici con regime variabile da turbolento a laminare. Esso si presenta, in funzione dei diversi meccanismi deposizionali, con sei diverse litofacies (Fig. 3). In particolare, le litofacies riconosciute (COLE & SCARPATI, 1993) sono dal basso verso l'alto: litofacies massiva, con riempimento di depressioni morfologiche preesistenti (MPV); litofacies a gradazione inversa (IG); litofacies con sand-waves regressivo (RS); litofacies stratificata (S); litofacies con aggregato particellare (PA); litofacies con ceneri vescicolari (VA).

Member B, on which the analyses were concentrated, was generated by the second phase of the NYT eruption, characterised by several pyroclastic flows with regime variable from turbulent to laminar. It presents six different lithofacies depending on the different depositional mechanisms (Fig. 3). In particular, the observed lithofacies (COLE & SCARPATI, 1993) are from the bottom to the top: massive lithofacies with filling of pre-existent depressions (MPV); lithofacies with inverse gradation (IG); lithofacies with regressive sand-waves (RS); stratified lithofacies (S); lithofacies with particle aggregate (PA); lithofacies with vesicular ash (VA).

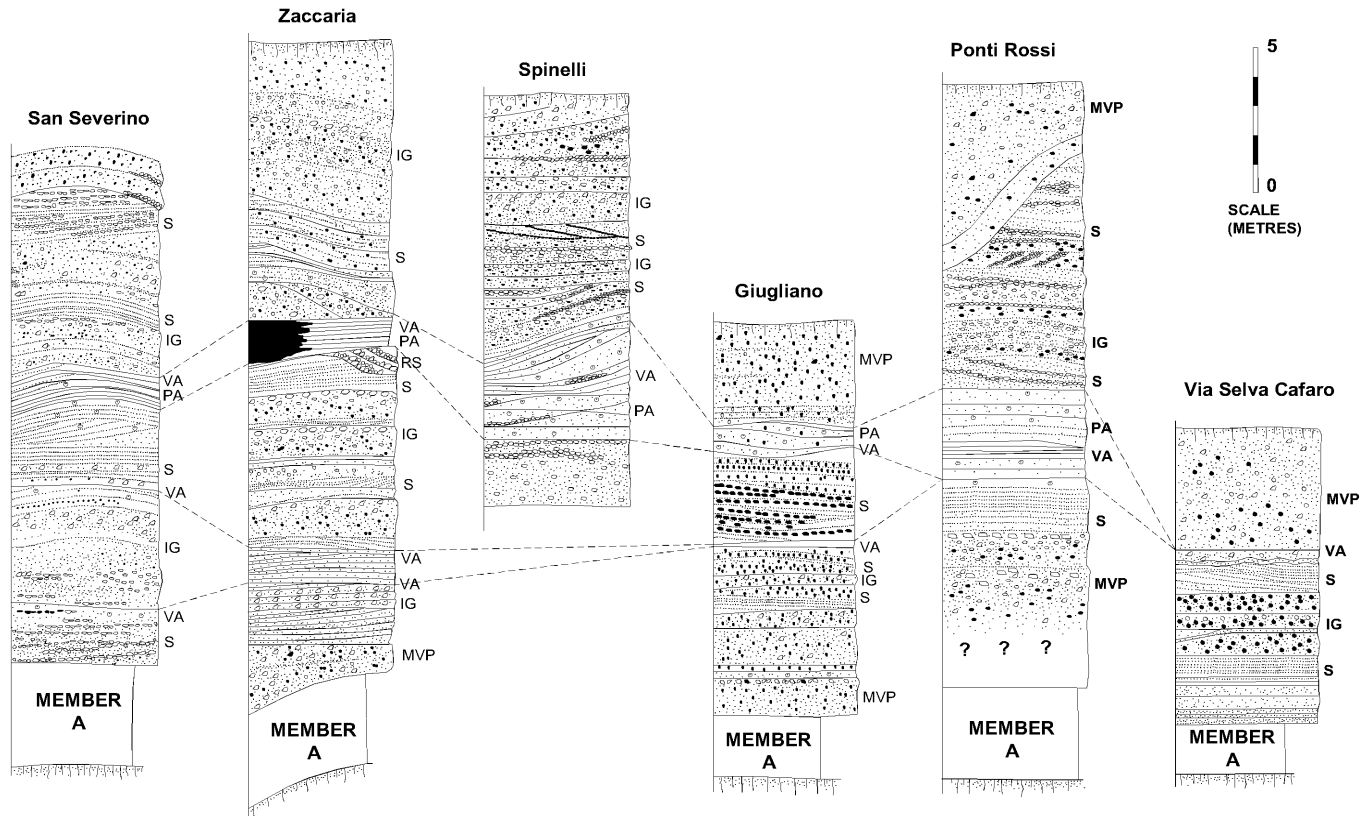


Fig. 3 - Colonne stratigrafiche raffiguranti il membro B (ridisegnato da COLE & SCARPATI, 1993)
 - Stratigraphic columns sketching the member B (redrawn from COLE & SCARPATI, 1993)

Il Membro B si distingue dal membro A per la maggiore dimensione della frazione pomicea, molto porosa, di colore grigio chiaro e dalla forma sub-arrotondata, che si ritrova immersa in una matrice cineritica fine. Questo membro presenta nella zona di Giugliano in Campania uno spessore variabile da 15 a 20 m.

IDENTIFICAZIONE E CLASSIFICAZIONE GEOLOGICO-TECNICA DEI TERRENI PIROCLASTICI

Al fine di identificare e classificare i terreni in studio, è stata effettuata una campagna di prelievo di campioni a diverso grado di disturbo (Q3÷Q5; AGI, 1977) nell'ambito di un fronte di scavo ritenuto rappresentativo e logisticamente accessibile. I campioni di maggiore qualità (Q5) utilizzati per le prove meccaniche sono stati ottenuti mediante il campionamento in laboratorio di un volume cubico di 30 cm di lato, quest'ultimo prelevato a basso grado di disturbo mediante infissione di una scatola metallica su un monolite di terra, preventivamente isolato in sito mediante scavo manuale. Il prelievo dei campioni in maniera poco disturbata è stato favorito in questo tipo di terra dall'esistenza di una coesione non trascurabile.

Per la determinazione delle caratteristiche fisico-volumetriche dei terreni piroclastici (Tab. 1) sono stati prelevati sette campioni all'interno della successione stratigrafica affiorante nella cava che sono stati sottoposti a prove standard ASTM e BS: ASTM D421,

Member B can be distinguished from member A by the greater dimensions of the pumiceous fraction, which is characterised by a light grey colour, and by a subrounded shape and immersed in a fine ash matrix. This member presents in the area surrounding Giugliano in Campania a thickness variable from 15 to 20 m.

ENGINEERING GEOLOGICAL IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF PYROCLASTIC SOILS

In order to identify and to classify pozzolan soil, a field survey finalised to soil sampling with low grade of disturbance (Q3÷Q5; AGI, 1977) was carried out on the cut slope identified as representative and logistically accessible for this study. The higher quality samples (Q5) were selected for the mechanical tests. These specimens have been obtained by the sampling in laboratory of a cubic volume, 30 cm side, that was extracted with a low disturbance grade by means of pushing a metallic box on a soil monolith, previously isolated in the field by manual digging. The undisturbed sampling is usually favoured by a not negligible cohesion in these soils.

For the determination of the physical properties of pyroclastic soil (Tab. 1), seven samples were collected in the series outcropping in the pit quarry. They were analysed using standard ASTM and BS laboratory tests: ASTM D421, ASTM

ASTM D2217 e ASTM D422 per le analisi granulometriche; ASTM D4318 e BS 1377 per le proprietà fisico-volumetriche ed indice; ASTM D2974 per il contenuto in materia organica; ASTM D3880 per le prove di taglio diretto. Un importante riferimento per il confronto dei risultati ottenuti è il lavoro riguardante le proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del Napoletano (PELLEGRINO, 1967), basato su un numero di campioni di pozzolana molto ampio ed effettuato su pozzolane in sede, rimaneggiate e dilavate. Nel caso specifico, i campioni analizzati corrisponderebbero alla categoria delle pozzolane in sede.

Tra le particolarità che caratterizzano i campioni analizzati spicca l'elevata porosità, variabile tra 54.4% e 68.2%, attribuibile soprattutto ai meati interparticellari. È infatti plausibile ritenere che la frazione passante al setaccio N. 200 ASTM, utilizzata per la stima del peso specifico delle particelle (GS), comprenda anche granuli con pori intraparticellari non comunicanti con l'esterno.

Per quanto concerne i limiti di Atterberg, il limite di liquidità (w_L) è risultato, per i diversi campioni, compreso tra 43.9 % e 51.8%, mentre il limite di plasticità (w_p), determinato col metodo delle resistenze non drenate (WROTH & WOOD, 1978), è risultato compreso tra 38.5% e 46.6 %. Da ciò deriva che l'indice di plasticità (IP) varia tra 3.5% e 7.4%, collocando la pozzolana oggetto di questo studio al limite tra le terre incoerenti e quelle coesive (IP > 5%). In base ai valori del contenuto d'acqua determinati in sito è quindi possibile attribuire alla pozzolana analizzata, sebbene in maniera incerta, una consistenza semisolida (significativa solo per IP > 5%). La scarsa plasticità dei campioni analizzati non ha consentito l'applicazione del metodo standard (dei bastoncini) per la determinazione del limite di plasticità.

D2217 and ASTM D422 for the grain size analyses; ASTM D4318 and BS 1377 for the physical and index properties; ASTM D2974 for the organic matter content; ASTM D3080 for the direct shear tests.

An important reference for the comparison of our results is a research paper regarding the physical and mechanical properties of Neapolitan volcanic deposits (PELLEGRINO, 1967), based on a high number of pozzolan samples which classified pozzolan as in original deposition, reworked and eluviated. In this case, the analysed samples correspond to the original deposition class.

Among the specific features that characterise this type of soil is its high porosity, which varies between 54.4% and 68.2%, attributable mainly to the interparticle voids. In fact, it is likely to observe that the fraction passing to the N. 200 ASTM utilised for the estimate of the specific gravity (GS), also includes particles with closed intraparticle voids.

As regards the Atterberg limits, the liquid limit (w_L) values fall between 43.9% and 51.8%, while the plastic limit (w_p), measured through the undrained strength method (WROTH & WOOD, 1978), ranges between 38.5% and 46.6%. Thus, the plasticity index (PI) varies from 3.5% to 7.4%, locating the pozzolan samples at the boundary between the non-cohesive and cohesive soils (PI > 5%). From water contents measured in the field it is possible, even uncertainly, attribute to the pozzolan samples a semi-solid consistence (significant for IP > 5%, only). The observed low plasticity does not allow the use of the standard method (soil threads), usually applied for the determination of the plasticity limit.

These findings match well with other experimental results known

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Depth from the original ground (m)	7	7	7	14	12	0.5	0.3 - 0.6
w (%)	19.3	32.3	15.9	21.9	21.9	30.3	45.2
G_s (kN/m ³)	24.52	25.11	23.73	24.03	25.20	23.63	24.42
γ_{dry} (kN/m ³)	9.35	9.35	9.35	8.01	8.01	8.37	10.42
γ_{nat} (kN/m ³)	11.49	11.49	11.49	10.79	10.79	10.93	15.13
γ_{sat} (kN/m ³)	15.42	15.50	15.29	14.54	14.69	14.71	16.05
n (%)	61.9	62.8	60.6	66.7	68.2	64.7	54.4
e (%)	162	169	154	200	215	182	134
D_r (%)	64.5	65.0	63.7	93.4	93.6	53.4	16.3
S_r (%)	29.7	49.0	25.0	26.8	26.2	40.2	83.9
Organic content (%)	4.33	4.48	4.81	4.51	3.78	3.57	4.04
w_L (%)	45.8	45.1	46.8	51.8	49.0	48.7	43.9
w_p (%)	38.5	39.2	41.5	46.6	44.1	45.2	40.3
I_p (%)	7.3	5.9	5.3	5.2	4.9	3.5	3.6

Tab. 1 - Principali proprietà fisico-volumetriche ed indice dei campioni di pozzolana analizzati
- *Main physical and index properties*

	This paper	Pellegrino (1967) Average values
Specific gravity G_s (kN/m ³)	23.63 - 25.20	21.57 - 24.52
Porosity n (%)	54.4 - 68.2	45.0 - 65.0
Dry unit weight γ_{dry} (kN/m ³)	8.01 - 10.42	6.37 - 12.74
Water content w (%)	19.3 - 45.2	15.0 - 40.0
Degree of saturation S_r (%)	25.0 - 83.9	20.0 - 80.0

Tab. 2 - Confronto con i valori noti in letteratura (Pellegrino, 1967)
- Comparison with the values known in literature (PELLEGRINO, 1967)

I risultati ottenuti sono in buon accordo con altri noti in letteratura (Tab. 2) per le pozzolane in sede (PELLEGRINO, 1967).

La granulometria dei campioni varia in un campo piuttosto ristretto (Fig. 4), caratterizzandosi con un passante al setaccio N. 200 ASTM generalmente inferiore al 50% ed una prevalenza della frazione sabbiosa. I dati ottenuti sono compresi nel fuso granulometrico proposto da PELLEGRINO (1967) per le pozzolane in sede. L'analisi delle proprietà di plasticità mediante la carta di plasticità di Casagrande (Fig. 5) evidenzia la collocazione dei punti rappresentativi dei campioni al di sotto della retta A e, quasi per tutti i casi, il valore $w_L < 50\%$ consente di caratterizzare la frazione fine dei campioni come equivalente ad un limo inorganico di modesta plasticità (ML). Nel caso specifico, per la determinazione dell'indice di plasticità, è stato adottato un metodo sperimentale basato sulle resistenze non drenate (ESPOSITO & DI CLEMENTE, 2003) derivato dal metodo di WROTH & WOOD (1978). Questa caratterizzazione non trova riscontro nelle analisi effettuate da PELLEGRINO (1967) per le pozzolane in sede, per le quali viene genericamente riconosciuta una difficile formabilità, mentre è in buon accordo con quelli proposti da PELLEGRINO (1967) per le pozzolane rimaneggiate (Fig. 5).

In base ai caratteri granulometrici ed alle caratteristiche di plasticità della frazione più fine (passante al N. 200 ASTM) (Fig. 5), i campioni sono omogeneamente classificabili nel sistema USCS come sabbia con limo (SM).

in literature (Tab. 2) for the pozzolan soil in the original deposition (PELLEGRINO, 1967).

The grain size of the analysed samples varies in a narrow range (Fig. 4) having a passing to the N. 200 ASTM sieve generally lower than 50% and a prevailing sandy fraction. These data match those observed by PELLEGRINO (1967) for pozzolan soil in the original deposition. The analysis of the plasticity properties by means of Casagrande's plasticity chart (Fig. 5) indicates the position of the points, almost for all cases, below the A-line and with $w_L < 50\%$ allowing the characterisation of the finer fraction as equivalent to low plasticity inorganic silts (ML). In this case we used an experimental method based on the undrained strength (ESPOSITO & DI CLEMENTE, 2003), derived from the WROTH & WOOD method (1978). This kind of characterisation is not verified for the estimation of the plasticity limit by PELLEGRINO (1967) for the pozzolan in the original deposition, for which the Author recognised a scarce formability, instead these results match those proposed by the same Author for the reworked pozzolan (Fig. 5).

From the grain size and plasticity data of the finer fraction (passing to No 200 ASTM) (Fig. 5), the samples result homogeneously classifiable in the USCS system as sand with silt (SM).

The mechanical tests for the determination of the shear strength parameters were carried out on undisturbed samples (Q5; AGI,

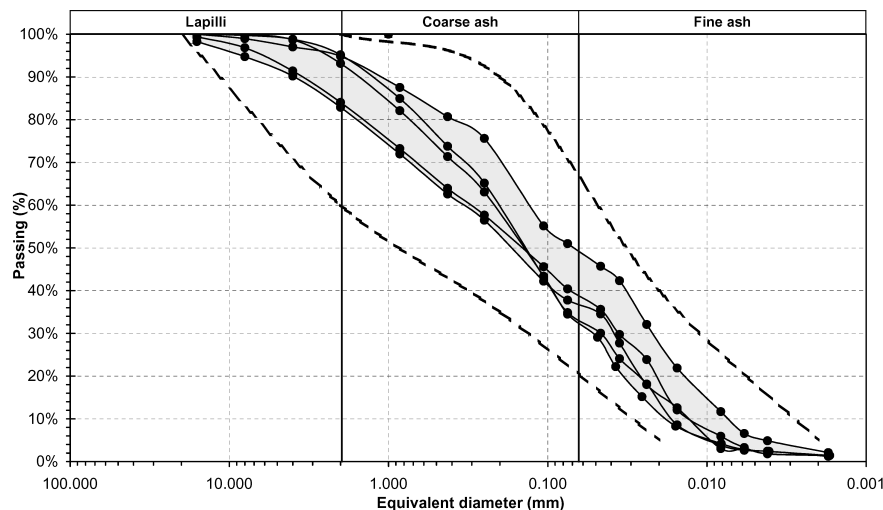


Fig. 4 - Fuso granulometrico determinato sulla base dei campioni analizzati. Le curve tratteggiate rappresentano i limiti inferiore e superiore del fuso granulometrico delle pozzolane in sede da dati di letteratura (PELLEGRINO, 1967)
- Grain size envelope determined by the analysed samples. The dashed curves represent the lower and the upper boundaries of grain size envelope known from the literature for the pozzolan soil in original deposition (PELLEGRINO, 1967)

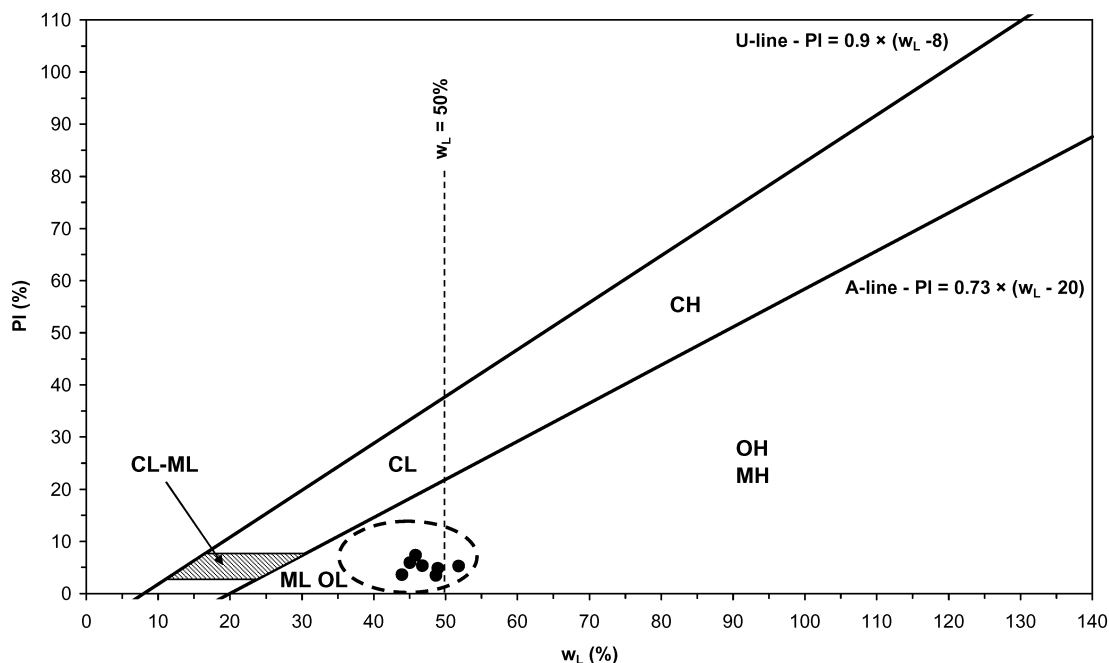


Fig. 5 - Carta di plasticità di Casagrande. L'ellisse tratteggiata rappresenta il campo di variazione per la frazione fine delle pozzolane rimaneggiate, da dati di letteratura (PELEGRINO, 1967) - Casagrande's plasticity chart. The dashed ellipse represents the range for the finer fraction of the reworked pozzolan known from the literature (PELEGRINO, 1967)

Sample	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	U.S.C.S. Classification	A.G.I. Classification
C1	5	60	33	2	SM	Sand with silt slightly gravelly
C2	10	60	28	2	SM	Sand with silt slightly gravelly
C3	9	53	26	2	SM	Sand with silt slightly gravelly
C4	15	47	36	2	SM	Gravelly sand with silt
C5	17	46	35	2	SM	Gravelly sand with silt
C6	5	62	32	1	SM	Sand with silt slightly gravelly
C7	5	48	45	2	SM	Sand with silt slightly gravelly

Tab. 3 - Identificazione granulometrica e classifiche dei campioni analizzati - Grain size identification and classifications of the analysed samples

Le prove di taglio diretto per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio sono state effettuate su provini indisturbati (Q5; AGI, 1977), campionati in laboratorio a partire dai campioni cubici di lato 30 cm. Esse hanno investigato il campo di tensioni normali compreso tra 40 e 250 kPa, approssimativamente corrispondente a quello cui sono sottoposti i terreni piroclastici in corrispondenza di un fronte di scavo alto fino a 20 m. Nell'intervallo di tensione sperimentato, la relazione tra sforzo di taglio a rottura (τ) e tensione normale efficace (σ') è risultata lineare con coesione (c'), variabile tra 14.7 e 46.1 kPa, ed angolo di resistenza al taglio (ϕ') compreso tra 27.0° e 38.5° (Tab. 4). Detti parametri sono ovviamente rappresentativi solo della condizione di saturazione (prova standard) poiché in condizioni di parziale saturazione essi subiscono una significativa variazione, in particolare riguardante la coesione, così come evidenziato da PELLEGRINO (1967).

1977) sampled in laboratory from a cubic sample 30 cm length side. Direct shear tests investigated the normal stress range from 40 to 250 kPa, approximately corresponding to the stress level acting in the pyroclastic soils are subjected in correspondence to the cut slope, as high up as 20 m. In the experimented stress range, the relationship between shear strength (τ) and the normal effective stress (σ') is linear, with a cohesion (c') value ranging from 14.7 to 46.1 kPa, and a friction angle which goes from 27° to 38.5° (Tab. 4). Such parameters must obviously be considered representative of the saturated condition only, because in unsaturated conditions they undergo a significant variation, especially for the cohesion, as already observed by PELLEGRINO (1967).

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
c' (kPa)	27.4	44.5	14.7	45.8	46.1	-	-
(φ) (°)	30.7	27.0	38.5	33.0	33.0	-	-

Tab. 4 - Parametri della resistenza al taglio della pozzolana ottenuti mediante prove di taglio diretto in condizioni di saturazione (prova standard)
 - *Shear strength parameters of the pozzolan obtained by means of direct shear tests in saturated conditions*

RITENZIONE IDRICA DELLE POZZOLANE

Nell'area flegrea le cave a fossa sono localizzate in aree dove la soggiacenza della falda è generalmente elevata, anche durante la massima escursione piezometrica stagionale. Infatti, in questo distretto vulcanico la circolazione idrica sotterranea avviene, a grande scala, con una falda di base unica che raggiunge la quota massima di circa 22 m s.l.m., in corrispondenza della zona centrale dei Campi Flegrei (CELICO *et alii*, 1991), e ha di norma una soggiacenza di alcune decine di metri, tranne che nella zona costiera occidentale dove raggiunge il piano campagna (Bonifica di Licola). Da ciò consegue che le aree di cava rientrano ampiamente nell'ambito della zona vadosa, nella quale le terre piroclastiche raggiungono solo occasionalmente ed in maniera transitoria condizioni prossime alla saturazione. In queste condizioni le terre, soprattutto a componente limosa, hanno un comportamento meccanico sensibilmente influenzato dal contenuto d'acqua e quindi dalle dinamiche idrologiche. Pertanto, al fine di comprendere l'influenza di queste ultime sulla stabilità dei fronti di scavo, è stata effettuata la caratterizzazione idraulica della pozzolana per ciò che attiene alle proprietà del materiale parzialmente saturo, con prove sperimentali di campo e di laboratorio.

Com'è noto, i terreni non saturi sono caratterizzati da una pressione dell'acqua interstiziale, inferiore a quella atmosferica, definita suzione. L'insorgere di tale pressione negativa deriva dalle forze di tensione superficiale e di adsorbimento, mediante le quali le molecole d'acqua sono trattenute alle particelle solide del terreno. Una molecola d'acqua in un terreno non saturo, in seguito all'attrazione delle altre molecole di acqua e delle superfici solide, tende a formare dei menischi attorno ai granuli del terreno. La tensione superficiale generata dai menischi capillari rende il comportamento dell'interfaccia acqua-aria assimilabile ad una membrana elastica in contrazione. Da ciò deriva una componente di reciproca attrazione tra i granuli che aumenta la resistenza al taglio del terreno e si esplica mediante un incremento della coesione, nota come coesione apparente.

Una molecola di acqua è sottoposta nel terreno a campi di forze, per ciascuno dei quali è possibile definire un potenziale, il complesso dei quali costituisce il potenziale idrico totale (Ψ) (ISSS, 1976):

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_a + \Psi_s$$

dove:

- Ψ_g = potenziale gravitazionale (legato alla sola forza di gravità);
- Ψ_m = potenziale matriciale o capillare (dipende dalle forze di attrazione esistenti tra le particelle di terreno e di acqua);
- Ψ_o = potenziale osmotico (deriva dalle attrazioni intermolecolari fra molecole d'acqua e molecole o ioni disciolti);

WATER RETENTION OF POZZOLAN SOIL

In the Phlegraean area, pit quarries are localised in zones where the water table depth is generally very high even during the maximum seasonal piezometric range. In fact, in this volcanic district the groundwater flow globally occurs as a unique basal flow that reaches maximum altitude at about 22 m a.s.l., in correspondence to the central part of the Phlegraean Fields (CELICO *et alii*, 1991) and generally has a depth below ground of several tens of meters, except in the western coastal strip where it reaches the ground surface (Licola's Drainage). From this condition it derives that quarrying areas are largely located in the vadose zone in which pyroclastic soils, especially with silty grain size component reach conditions close to saturation only occasionally and temporarily. They have mechanical behaviour noticeably influenced by water content and therefore by soil hydrological dynamics. Therefore, aiming to understand the influence of the latter on the mechanical behaviour of the pyroclastic soil, and therefore on the cut slope stability, pozzolan unsaturated hydraulic characterisation was carried out by means of field and laboratory experimental tests.

Unsaturated soils are characterised by a pore pressure, lower than the atmospheric one, that is called *suction*. This negative pressure derives from water surface tension and adsorption forces that bond the water molecules to the solid soil particles. A water molecule in an unsaturated soil, following the attraction of the other molecules and of the solid surfaces, which tends to form menisci that surround solid soil particles. The surface tension generated by capillary menisci gives to the water-air interface a behaviour similar to that of a contracting elastic membrane that causes a reciprocal attraction among the solid soil particles. This one, in turn, increases the shear strength by means of the enhancement of the soil cohesion, the additional term being called *apparent cohesion*.

A water molecule in the soil is subject to force fields, for each a potential can be defined. The sum of the different types of potentials (ISSS, 1976) constitutes the total hydraulic potential (Ψ):

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_a + \Psi_s$$

where:

- Ψ_g = gravitational potential (due to gravity force);
- Ψ_m = matric or capillary potential (depending on the attraction forces existing among soil particles and water molecules);
- Ψ_o = osmotic potential (deriving from intermolecular attraction forces among water molecules and dissolved ions);

Ψ_a = potenziale pneumatico (relativo alle variazioni di pressione atmosferica rispetto a quella standard);

Ψ_s = potenziale di sovraccarico (legato al trasferimento di carico litostatico dalle particelle di solido alle acque di ritenzione).

In terreni saturi, il potenziale totale (Ψ) può essere approssimato al potenziale gravitazionale (Ψ_g); invece, per i terreni insaturi esso può essere approssimato al potenziale matriciale (Ψ_m). Il potenziale matriciale si può esprimere con qualsiasi unità di pressione ed ha segno negativo, quindi inferiore alla pressione atmosferica: esso assume pertanto il significato di suzione. Ad una diminuzione del contenuto d'acqua del terreno corrisponde una diminuzione del potenziale matriciale, quindi un aumento della suzione ovvero un aumento della forza di legame tra le molecole d'acqua e le particelle solide. Nella pratica, il potenziale matriciale è considerato convenzionalmente positivo.

Per meglio comprendere gli effetti delle acque meteoriche sulla stabilità dei fronti di scavo della cava in esame, è stato effettuato un monitoraggio delle variazioni di suzione e contenuto in acqua dei terreni mediante l'installazione di tre tensiometri (Jetfill della Soilmoisture) alle profondità di 30, 60 e 90 cm, con disposizione ortogonale al piano del pendio. Il monitoraggio è durato otto mesi (da novembre 2005 a luglio 2006) ed ha permesso di abbinare i valori di suzione ai relativi contenuti in acqua della terra, determinati in laboratorio su campioni prelevati alle profondità di interesse. L'escursione massima della suzione è risultata compresa tra 12 kPa e 32 kPa, cui è associabile una corrispondente escursione del contenuto d'acqua tra il 37% ed il 19%, in relazione alle dinamiche idrologiche (Fig. 6).

Ψ_a = pneumatic potential (related to the variation or atmospheric pressure);

Ψ_s = load potential (connected to the transfer of the load from solid particles to the water molecules when saturated soils are subjected to compression).

In saturated soils the total hydraulic potential (Ψ) can be approximated to the gravitational potential (Ψ_g), instead, for unsaturated soils, the matric potential (Ψ_m) can be approximated. The matric potential can be expressed with many pressure units and it has a negative sign. A decrease of the water content in the soil induces a decrease of the matric potential, therefore an increase of the suction as well as of the bonding force among water molecules and solid particles. In practice, the matric potential conventionally assumes positive values.

In order to better comprehend the effects of the precipitations on the stability of cut slopes, an hydrologic monitoring focused on the soil water content and suction measurements through tensiometers (Soilmoisture Jetfill) inserted orthogonally to the slope at the depth of 30, 60 and 90 cm was effected. The monitoring was carried out for about eight months (from November 2005 to July 2006) and permitted to combine soil suction measurement to relative water contents, estimated in the laboratory, on samples taken at the depth interested. The suction varied in the range between 12 kPa and 32 kPa, in which a variation of the water content between 37% to 19% was associated (Fig. 6).

Water retention curve has been reconstructed by means of the

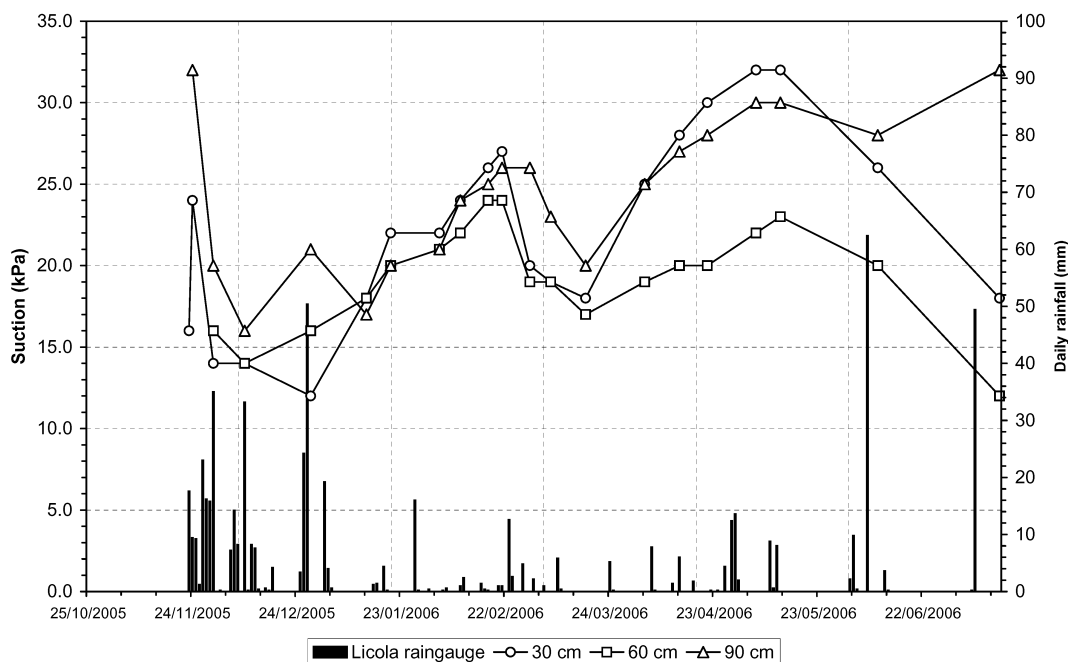


Fig. 6 - Monitoraggio della suzione nei tensiometri (Jetfill della Soilmoisture) installati sul fronte di scavo della cava. In sovrapposizione, i dati di pioggia registrati dalla stazione pluviometrica di Cuma-Licola
- Suction monitoring in tensiometers (Soilmoisture Jetfill) installed on the quarry cut slope. In overlap are rainfall data recorded by the Cuma-Licola rain-gauge station

Da un campione indisturbato è stata ricostruita una curva di ritenzione idrica mediante il metodo dell'evaporazione (WIND, 1968; SCHINDLER, 1980) (Fig. 7). Il metodo utilizzato consiste nel sottoporre ad evaporazione un campione di terra con contenuto d'acqua iniziale corrispondente alla saturazione (θ_s) e nella misura simultanea, in più step successivi, del peso del campione e della suzione mediante una coppia di minitensimetri (Soilmoisture) inseriti al suo interno. Le condizioni di flusso insaturo sono state semplificativamente assunte come stazionarie in corrispondenza di ciascuno step. La prova è terminata quando è stata raggiunta la portata massima dei minitensimetri (85 kPa). Successivamente, il campione è stato essiccato in stufa di laboratorio; quindi sono stati determinati il contenuto d'acqua residuo e quello a saturazione (rispettivamente θ_r e θ_s) ed, infine, trasformate le misure di peso registrate nei vari step in valori di contenuto d'acqua volumetrico (θ). Per interpolare i dati sperimentali è stato adottato il modello di VAN GENUCHTEN (1980) per il quale, a partire dalle coppie di h e θ sono stati ricavati i parametri (α , n ed $m = 1 - 1/n$) del modello, mediante una procedura di ottimizzazione statistica (minimizzazione dello scarto quadratico medio):

$$\theta = \theta_r + \theta_s - \theta_r / (1 + |\alpha h|^n)^m$$

Nel dettaglio, il campione indisturbato è stato prelevato in situ mediante l'infissione di una fustella metallica a sezione quadrata, microforata sui lati per consentire l'evaporazione dell'acqua dal terreno. Si è poi proceduto alla saturazione del campione mediante immersione della fustella in acqua. Dopo che il terreno è giunto a saturazione (minitensimetri al valore 0 kPa), si è proceduto alla prova di drenaggio a gravità che ha permesso di stimare la porosità efficace, pari a 1.7%, ed il coefficiente di ritenzione, pari al 52.9% ($\Theta_s = 54.6\%$). Terminata la prova di drenaggio a gravità, per i 25 giorni successivi, sono state effettuate letture giornaliere di suzione e di peso della fustella. E' stato così possibile calcolare i valori del contenuto in acqua del terreno (θ) nei vari step, essendo noti i pesi della fustella e dei minitensimetri in essa inseriti.

evaporation method (WIND, 1968; SCHINDLER, 1980) (Fig. 7), applied to an undisturbed sample. The method consists in monitoring water evaporation from a soil with a water content corresponding to the saturation (θ_s) and in the simultaneous measurement, in several successive steps, of the sample weight and of the suction (by means of a pair of minitensimeters (Soilmoisture) inserted into it. The condition of unsaturated flux are simplifyingly assumed to be as stationary in correspondence to each step. The test ends when the maximum range of tensiometers is reached (85 kPa). After the sample oven-drying the residual and saturation water contents (θ_r and θ_s) are estimated and, finally, from each weight measurement, the volumetric water content (θ) is calculated. By means of a statistically optimisation procedure (minimization of the standard deviation) from the coupled values h and θ the parameters (α , n and $m = 1 - 1/n$) were estimated for which the VAN GENUCHTEN model (1980) better interpolates the experimental data (Tab. 5):

$$\theta = \theta_r + \theta_s - \theta_r / (1 + |\alpha h|^n)^m$$

In this case, an undisturbed soil sample was gathered in the field by pushing metallic tube with square cross-section that was perforated to allow water evaporation from the sample. The sample was saturated by immersion in water. After the soil reached the saturation (minitensimeters to the value of 0 kPa), then free drainage test allowed the estimation of an effective porosity 1.7% and of a retention coefficient equal to 52.9% ($\Theta_s = 54.6\%$). Following the free drainage test, during the successive 25 days, simultaneous measurements of soil suction and metallic tube weight were carried out. It was possible to calculate the values of the soil water content (θ) in the various steps, being known the weight of the inserted minitensimeters.

The soil water retention curve was obtained for water contents ranging from 50.4% and 15.1% to which suction values of about 0 kPa and 81 kPa (the last is very close to the maximum range of ten-

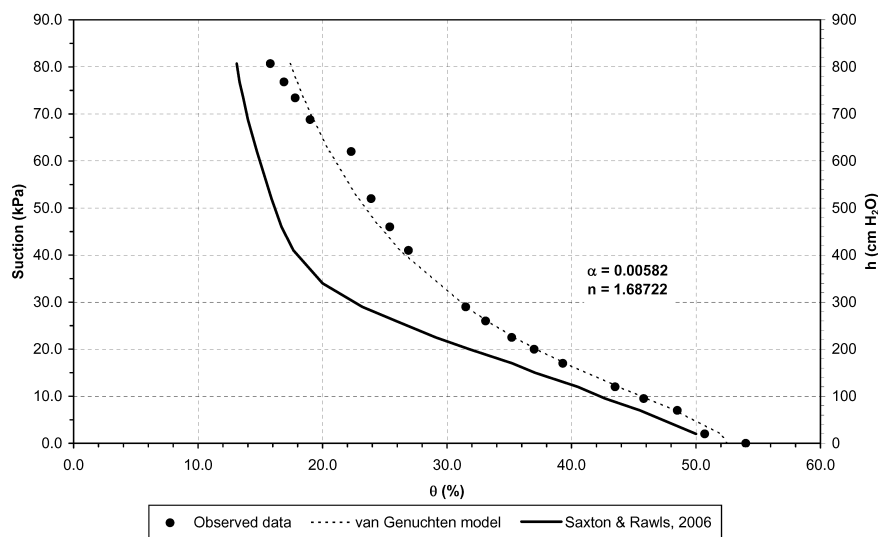


Fig. 7 - Dati sperimentali ottenuti con il metodo dell'evaporazione e modello di VAN GENUCHTEN (1980) interpolante ($\alpha=0.00582$ e $n=1.68722$). È inoltre evidenziata la curva di ritenzione ottenuta a partire da una granulometria equivalente (USDA sandy loam) mediante l'applicazione di formule empiriche (SAXTON *et alii*, 2006). La suzione è espressa sia in termini di pressione (kPa) che in termini di altezza di colonna d'acqua equivalente (cm H₂O)

- Experimental data obtained by means of the evaporation method and interpolating VAN GENUCHTEN model (1980) ($\alpha=0.00582$ and $n=1.68722$). The retention curve obtained from equivalent grain size data (USDA sandy loam) by means of the application of empirical formulas (SAXTON *et alii*, 2006). Suction is expressed both in term of pressure (kPa) and in term of water column height (cm H₂O)

Variable	Value	Standard Error	T-value	Lower	Upper
θ_s	0.52541	0.00637	82.46	0.5118	0.5390
α	0.00582	0.00040	14.73	0.0050	0.0067
n	1.68722	0.03295	51.21	1.6170	1.7575

Tab. 5 - Significatività statistica dei parametri θ_s , α e n e stima dell'intervallo di confidenza (95%)- Statistical significance of the van Genuchten's model parameters θ_s , α and n and confidence interval (95%) estimation

La curva di ritenzione è stata ricostruita nell'intervallo di contenuto d'acqua compreso tra 50.4% e 15.1%, cui rispettivamente corrispondono valori di suzione di circa 0 kPa e 81 kPa (quest'ultimo prossimo alla limite di portata dei tensiometri). Questo intervallo di valori è stato ritenuto significativo, considerando che i valori di suzione osservati in campo (Fig. 6) hanno subito variazioni intorno a valori compresi tra 12 kPa e 32 kPa e che a maggiori profondità, nel versante, le escursioni di suzione sono progressivamente più limitate verso i valori più piccoli.

Anche per ciò che attiene alle proprietà di ritenzione idrica, la pozzolana, come più in generale si verifica per i terreni piroclastici, appare avere caratteristiche del tutto peculiari, mostrando capacità di ritenzione superiori a quelle di un terreno non piroclastico di pari granulometria, così come è ben evidenziato dal confronto (Fig. 7) con la curva di ritenzione calcolata da formule empiriche basate sulla tessitura (USDA), grado di addensamento, contenuto in materia organica ed salinità (SAXTON *et alii*, 2006).

EFFETTI DELLA SUZIONE SULLA RESISTENZA AL TAGLIO DELLA POZZOLANA

Successivamente alla caratterizzazione delle proprietà di ritenzione idrica mediante la ricostruzione della curva di ritenzione, sono stati analizzati gli effetti della suzione sulla resistenza al taglio della pozzolana. Infatti, la presenza di acqua interstiziale, soprattutto all'interno di un terreno a granulometria fine, influisce sulla resistenza al taglio in quanto l'incremento della suzione ha effetti sullo stato tensionale del terreno, provocando una crescita delle tensioni efficaci, dovuta all'attrazione reciproca tra i granuli, esercitata dai menischi capillari. Da ciò consegue, per la legge di Mohr-Coulomb, l'aumento della resistenza al taglio della terra. È per questo motivo che l'approccio più diffuso nello studio della resistenza al taglio di un terreno non saturo consiste nel modellare l'effetto della suzione con l'introduzione di un contributo aggiuntivo, noto come coesione apparente (c_a) che è funzione dalla suzione stessa. A tale scopo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb modificato, tiene conto dell'incremento delle tensioni efficaci dovuto alla suzione (FREDLUND *et alii*, 1978):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u) \tan \phi^b$$

dove:

 τ = resistenza al taglio; c' = coesione efficace; σ = tensione normale al piano di taglio; u_a = pressione atmosferica (convenzionalmente considerata pari a 0); ϕ' = angolo di resistenza a taglio del terreno; u = pressione dell'acqua;

siometers) respectively correspond. This range was considered significant for the experimentation, by considering that the suction values we measured in the field ranged between 12 kPa and 32 kPa and that the variations of soil suction are progressively limited in lower values to higher depths.

Furthermore as concerns the water retention properties, pozzolan soil, as other pyroclastic soils, appears to be very peculiar, showing a water retention capacity greater to that one corresponding to a non-pyroclastic equal grain size soil, as it is clearly showed by the comparison (Fig. 7) with the soil water retention curve obtained by means of empirical formulas based on soil texture (USDA), compaction grade, organic matter content and salinity (SAXTON *et alii*, 2006).

EFFECTS OF THE SUCTION ON THE POZZOLAN SOIL SHEAR STRENGTH

Following the characterisation of soil water retention properties by means of the soil water retention curve reconstruction, the effects of the suction on the pozzolan shear strength have been analysed. In fact, pore water conditions shear strength of a fine grain size soil and therefore the stability of slopes constituted by these soils. A suction increase modifies the stress state of the soil, specifically it increases the effective stress, due to the reciprocal attraction among solid soil particle acted by capillary menisci. It follows for the Mohr-Coulomb model, the increase of shear strength. For this reason, the more diffused approach models the effect of the suction as an additional contribution to the shear strength, well known as apparent cohesion (c_a) that depends on the suction itself. With this aim we applied the modified Mohr-Coulomb shear strength model that considers the increase in effective stress due to the suction (FREDLUND *et alii*, 1978):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u) \tan \phi^b$$

where:

 τ = soil shear strength; c' = effective cohesion; σ = normal tension; u_a = atmospheric pressure; ϕ' = effective soil friction angle; u = water pressure;

ϕ^b = angolo d'attrito rappresentativo dell'incremento di resistenza al taglio prodotto dalla suzione.

Tramite la formula precedente è possibile definire la coesione apparente (c_a) come:

$$c_a = (u_a - u) \tan \phi^b$$

L'applicazione della suzione derivata dalla curva di ritenzione alla precedente relazione ha consentito di esprimerne la coesione apparente (c_a) in funzione del contenuto d'acqua (θ) (Fig. 8). In questo caso, il valore di ϕ^b è stato posto uguale a 20° , come proposto in letteratura per i terreni piroclastici (CASCINI *et alii*, 2005).

Per meglio comprendere l'influenza della coesione apparente sulla resistenza al taglio della pozzolana, sono state effettuate, oltre alle prove di taglio standard (in condizioni di saturazione), anche prove di taglio diretto in condizioni di sottosaturazione. Dette prove non sono state effettuate con il controllo della suzione esistente nei provini, così come hanno sperimentato numerosi autori (DONALD, 1956; GAN *et alii*, 1988); questa variabile è stata stimata sulla base del contenuto d'acqua, esistente dopo la prova di rottura. In particolare, per ciascuna prova sono stati utilizzati tre provini indisturbati, collocati in tre differenti macchine per la prova di taglio diretto. La fase di compressione è avvenuta senza l'immissione di acqua nelle vaschette, dove sono alloggiati i telai della scatola di taglio. I provini sono stati così mantenuti per un numero di giorni sufficiente a far variare significativamente il contenuto d'acqua, a partire da quello originario. Ciò è stato considerato accettabile in considerazione della climatizzazione del laboratorio, che ha reso l'evaporazione dai tre provini costante nel tempo. La prova di taglio diretto è stata fatta iniziare simultaneamente

ϕ^b = soil friction angle due to the suction.

Taking into account the previous formula, the apparent cohesion (c_a) is thus defined as follows:

$$c_a = (u_a - u) \tan \phi^b$$

The application of the suction derived from the soil water retention curve to the apparent cohesion formula allowed to express its variation in relationship with the water content (θ) (Fig. 8). In this case, the value of ϕ^b was fixed equal to 20° , as proposed in literature for pyroclastic soils (CASCINI *et alii*, 2005).

In order to comprehend the influence of the apparent cohesion, we also carried out direct shear tests in unsaturated conditions, as well as the standard direct shear tests. Such tests were not effected by means of the soil suction control (DONALD, 1956; GAN *et alii*, 1988), but the suction was determined through the water content after each test. In particular, three undisturbed samples were set in three different direct shear test machines. The initial compression phase was carried out without the introduction of water in the tank where the direct shear box frames were positioned. The samples were kept for a number of days sufficient to allow the variation of the water content from the original one. This was considered acceptable if we consider that the air-conditioning of the laboratory allowed a constant evaporation from the samples. The three direct shear tests simultaneously initiated. After the sample failure (about 30 minutes after the start) the water content of soil samples has been determined by means of the thermogravimetric method.

From these tests, the relation between σ' and τ , for different

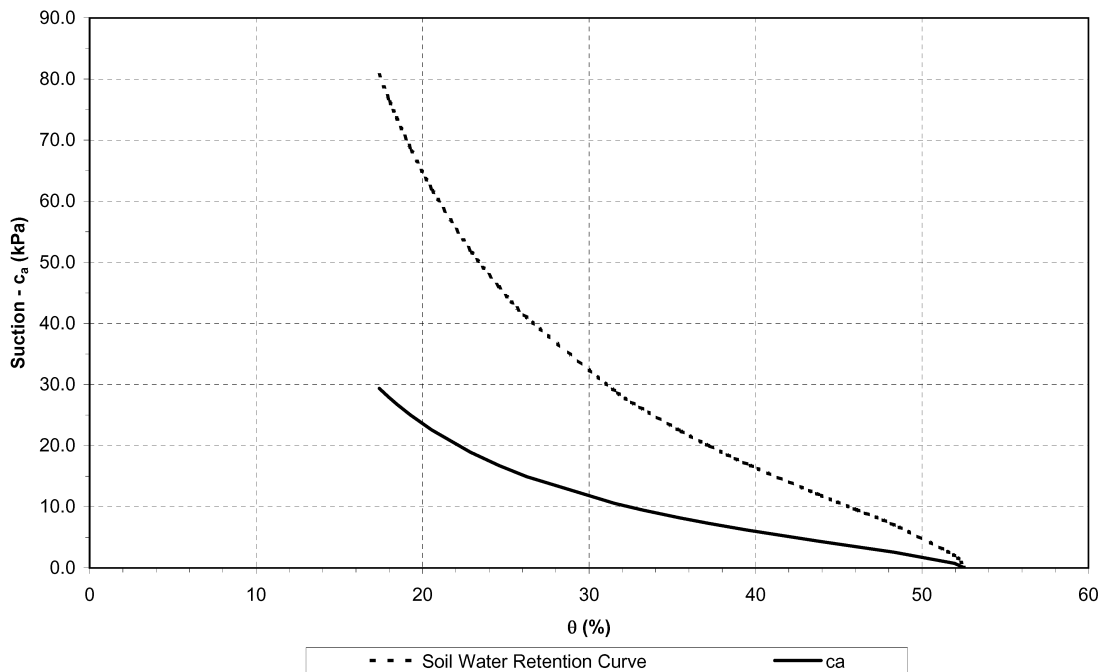
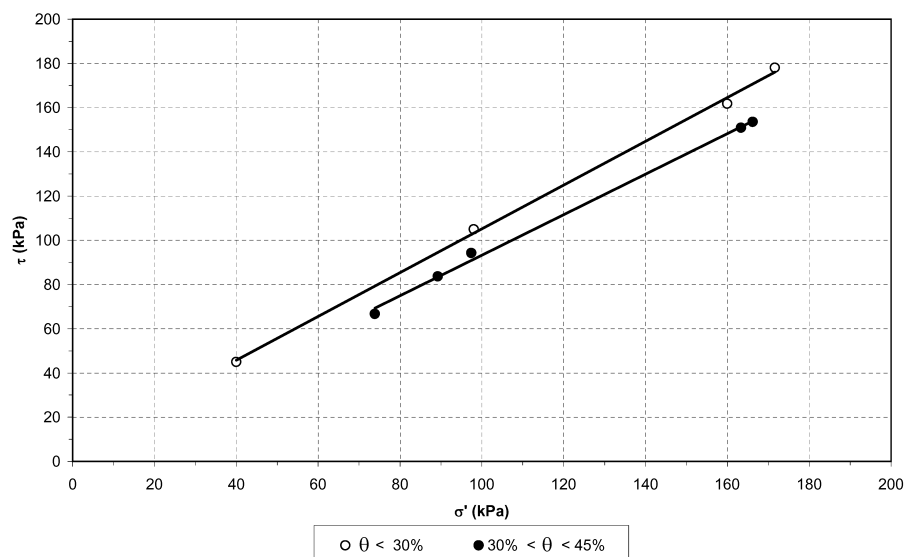


Fig. 8 - Relazione tra coesione apparente, calcolata col metodo proposto da FREDLUND *et alii* (1978), e contenuto in acqua (θ)
 - Relationship between apparent cohesion estimated by means of the FREDLUND *et alii* (1978) method and water content (θ)

Fig. 9 - Risultati delle prove di taglio diretto in condizioni di parziale saturazione, aggregati per contenuti in acqua minori del 30% e per contenuti in acqua compresi tra 30% e 45%
 - Results of the direct shear tests in unsaturated conditions, aggregated for water contents lower than 30% and water contents ranging from 30% and 45%



te su tutte e tre le scatole di taglio. Dopo la rottura dei campioni (avvenuta entro 30 minuti dall'inizio) è stato determinato il contenuto in acqua dei provini, mediante il metodo termogravimetrico.

Da queste prove è stato possibile ricostruire le relazioni esistenti tra σ' e τ corrispondenti a differenti contenuti d'acqua (Fig. 9), per valori aggregati per contenuti in acqua inferiori al 30% e per contenuti in acqua compresi tra 30% e 45%. Per le due famiglie di dati è stata verificata una correlazione di tipo lineare: le due rette interpolanti sono all'incirca parallele, ma il valore dell'intercetta, è maggiore per contenuti in acqua minori del 30% e minore per contenuti in acqua compresi tra 30% e 45%. Il valore medio della differenza tra le due rette interpolanti è circa 9.80 kPa, all'incirca corrispondente al valore della coesione apparente stimabile dalla relazione di FREDLUND *et alii* (1978), considerando un contenuto d'acqua del 25% e del 40% (Fig. 8).

ALTEZZA CRITICA DEI FRONTI DI SCAVO

L'analisi delle altezze critiche dei fronti di scavo è stata ritenuta di interessante valutazione poiché all'interno della cava, nonostante le elevate pendenze dei fronti che la costituiscono, generalmente maggiori di 85° e con altezze fino a 15 m, non sono stati osservati fenomeni di dissesto, se non limitatamente alla parte più superficiale, maggiormente alterata. Già ad una prima valutazione è apparso che le generali condizioni di stabilità potessero essere attribuite all'esistenza, oltre che della coesione efficace, al contributo aggiuntivo dovuto alla coesione apparente. A tale scopo, sulla base dei valori minimi e massimi dei parametri geomeccanici c' e ϕ' (rispettivamente: $c' = 15.0$ kPa e $\phi' = 27.0^\circ$; $c' = 45.8$ kPa e $\phi' = 38.5^\circ$), e considerando il contributo aggiuntivo della coesione apparente (c_a), è stata stimata l'altezza critica delle scarpate (H_c) mediante le relazioni classiche proposte da TAYLOR (1937) e TERZAGHI & PECK (1948).

Com'è noto, per altezza critica di un pendio si intende la massima altezza alla quale una scarpata naturale o artificiale, verticale o molto

water contents (Fig. 9), which were aggregated for water contents lower than 30% and water contents ranging from 30% to 45%, was reconstructed. A linear correlation for the two different groups was observed. The two interpolating lines are approximately parallel, but the value of the intercept is greater for water contents lower than 30% and lower for water contents between 30% and 45%. The mean difference between the two linear correlations is about 9.80 kPa, that approximately corresponds to the apparent cohesion value, estimable by means of the FREDLUND *et alii* (1978) equation, if a water content ranging from 25% and 40% is considered (Fig. 8).

CRITICAL HEIGHT OF CUT SLOPES

The analysis of the critical height of cut slopes is very interesting because the studied quarry cut slopes with a slope angle greater than 85° and with height up to 15 m are characterized by stable conditions except for occasionally small soil slips in the surficial weathered zones. It appeared that the general stability condition could be attributed, as well as the effective cohesion, to the additional contribution of the apparent cohesion. To a such purpose, on the base of the minimum and maximum values of shear strength parameters c' and ϕ' derived from standard shear box tests (respectively: $c' = 15$ kPa and $\phi' = 27.0^\circ$; $c' = 45.8$ kPa and $\phi' = 38.5^\circ$) and considering the additional contribution of the apparent cohesion (c TAYLOR), the critical height of cut slopes (H_c) was calculated by means of the classical formulas proposed by TAYLOR (1937) and TERZAGHI & PECK (1948).

As it is known, the critical height of a cut slope is defined as the maximum height to which a vertical or inclined cut slope is stable with-

inclinata, è stabile senza sostegno. Ciò è ovviamente possibile solo in terreni dotati di coesione e generalmente è riferita al caso più semplice in cui esiste una morfologia pianeggiante al disopra della scarpata. Detta condizione è propriamente rappresentata dai fronti di cava in pozzolana. In entrambe le citate relazioni, l'altezza critica dipende dalla coesione totale del materiale che, nel caso in esame, è stata calcolata in funzione della coesione apparente per contenuti in acqua variabili tra il 20% ed il 50%.

La prima relazione, proposta da TAYLOR (1937), viene utilizzata per il calcolo dell'altezza critica di una scarpata con superficie di rottura passante per il piede della stessa (circolo di piede). Tale equazione consente di determinare l'altezza critica, utilizzando il fattore di stabilità N_s determinato dall'angolo di resistenza a taglio (ϕ') del materiale e dall'inclinazione media della scarpata (TAYLOR, 1937), considerata in questo caso pari a 90° :

$$H_c = N_s (c / \gamma)$$

L'equazione dipende dalla coesione totale (c) e dal peso di volume della terra (γ).

La seconda delle due relazioni utilizzate è quella proposta da TERZAGHI & PECK (1948), che definisce l'altezza critica in funzione della coesione totale (c), del peso di volume della terra (γ) e dell'angolo di resistenza a taglio (ϕ):

$$H_c = (4c / \gamma) \tan [45^\circ + (\phi/2)]$$

Con riferimento all'intervallo di contenuto in acqua osservato in sito, e quindi di coesione totale, ed ai valori minimi e massimi dei parametri di resistenza al taglio (c' e ϕ'), i metodi di TAYLOR e di TERZAGHI & PECK consentono di stimare valori di altezza critica (H_c) compresi tra 20 m e 45 m ($\theta = 20\%$) e tra 10 m e 33 m ($\theta = 35\%$) (Fig. 10). In questi casi, l'elevata altezza critica delle scarpate è senz'altro favorita anche dal modesto peso di volume delle terre piroclastiche.

out supports. It is obviously possible only in soils with cohesion and it is generally referred to the simpler case in which there is a flat morphology above the slope. This condition is properly represented by the cut slopes in pozzolan soil quarries. In both the above mentioned formulas, the critical cut slope height depends on the total cohesion of the soil which, in the examined case, was calculated by including the apparent cohesion for water contents ranging from 20% to 50%.

First formula, proposed by TAYLOR (1937) is usually applied to estimate the critical cut slope height referred to a failure surface passing through the foot slope (foot circular failure surface). Such an equation allows the determination of the critical cut slope height through the stability factor N_s this one depending upon the soil friction angle ϕ' and on the mean slope angle of the slope, in this case equal to 90° (TAYLOR, 1937), as it follows:

$$H_c = N_s (c / \gamma)$$

The equation depends on the total cohesion (c') and the soil unit weight (γ).

The second formula is proposed by TERZAGHI & PECK (1948): the critical height of a cut slope depends on the total cohesion (c), the unit weight (γ) and the friction angle (ϕ):

$$H_c = (4c / \gamma) \tan [45^\circ + (\phi/2)]$$

By considering the water content range observed in the field and therefore the related total cohesion as well as the minimum and maximum values of shear strength parameters (c' and ϕ'), the TAYLOR and TERZAGHI & PECK methods estimate values of critical height of cut slopes (H_c) ranging from 20 m to 45 m ($\theta = 20\%$) and from 10 m to 33 m ($\theta = 35\%$) (Fig. 10). In the observed cases, the high cut slope height is additionally favoured by the low unit weight of the pyroclastic soils.

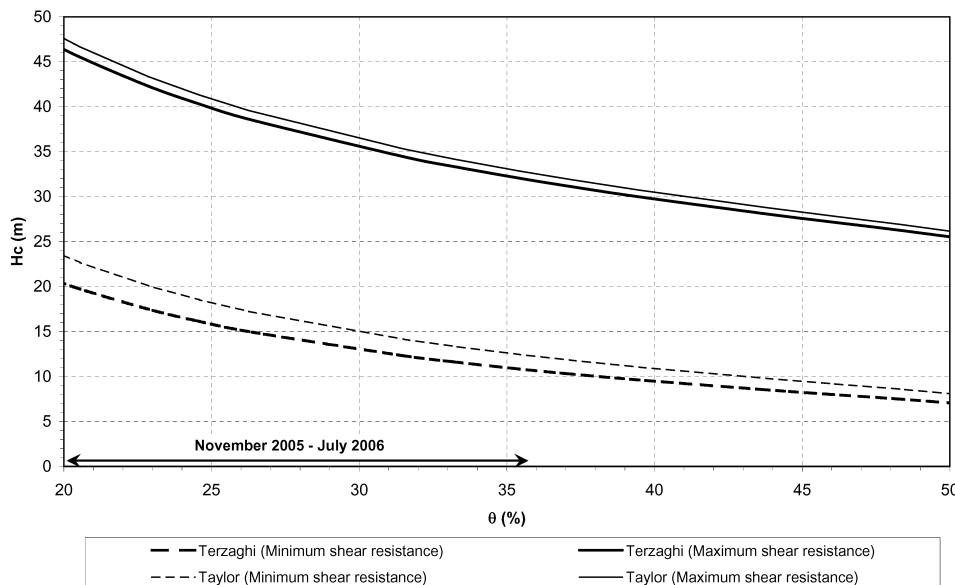


Fig. 10 - Relazione intercorrente tra altezza critica dei fronti di scavo (H_c) e contenuto in acqua volumetrico del terreno (θ)
 - Relationship existing between the critical height of cut slopes (H_c) and soil water content (θ)

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti evidenziano come la pozzolana flegrea sia un materiale geologico dotato di proprietà fisico-volumetriche ed indice del tutto peculiari che la contraddistinguono come una terra ad elevato potere di ritenzione idrica, ben superiore a quello tipico di una terra non piroclastica di equivalente granulometria. Infatti, le elevate porosità e superficie specifica rendono i materiali piroclastici particolari per ciò che attiene alla capacità di interazione tra la fase solida e quella liquida. Dette proprietà idrologiche, che si esaltano nelle terre piroclastiche a granulometria sabbioso-limosa, esercitano un ruolo non trascurabile nell'incremento della resistenza al taglio dei terreni, in condizione di parziale saturazione. Questo comportamento è stato investigato nella sperimentazione discussa in questo lavoro che, sebbene limitata ad un'area campione, ha consentito la caratterizzazione delle condizioni più tipiche della pozzolana flegrea.

I risultati ottenuti consentono una migliore comprensione della stabilità dei fronti di scavo, che raggiungono altezze inaspettate per una terra da sciolta a pseudocoerente come quella in esame, favorita oltre che dalla coesione e dall'angolo di attrito anche dalla suzione e dal modesto peso di volume della pozzolana. Da ciò deriva un elevato fattore di sicurezza dei fronti di scavo anche quando questi risultano essere subverticali ed alti fino a 20 m, ovviamente nell'ipotesi di assenza di discontinuità strutturali o stratigrafiche.

L'approfondimento della conoscenza relativa all'influenza delle acque di ritenzione sulle caratteristiche meccaniche dei terreni a componente limosa, quali appunto la coesione totale e la resistenza al taglio, rappresenta un aspetto rilevante della ricerca nel campo della geologia applicata e della geotecnica, così come evidenziato in numerosi studi noti nella letteratura internazionale che hanno riguardato, per esempio, la stabilità di depositi eolici (loess) in altre aree del mondo, in condizione di sottosaturazione (HIGGINS & MODEER, 1996).

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il prof. Adriano Mazzarella ed il dr. Raffaele Viola per aver fornito i dati pluviometrici della stazione di Cuma-Licola ed il Sig. Sergio Astarita per aver collaborato nelle fasi di indagine in campo.

OPERE CITATE/REFERENCES

- ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA (1977) - *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*.
- CELICO P., DE VITA P., NIKZAD F., STANZIONE D. & VALLARIO A. (1991) - *Schema idrogeologico e idrogeochimico dei Campi Flegrei (NA)*. Atti I Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata Gargnano 22 e 23 ottobre 1991 Università degli studi di Milano Suppl. **93**: 287-296.
- SCARPATI C., COLE P. & PERROTTA A. (1993) - *The Neapolitan Yellow Tuff - A large volume multiphase eruption from Campi Flegrei, Southern Italy*. Bull. Volcanol., **55**: 343-356.
- COLE P.D. & SCARPATI C. (1993) - *A facies interpretation of eruption and emplacement mechanism of the upper part of the Neapolitan Yellow Tuff, Campi Flegrei, Southern Italy*. Bull. Volcanol., **55**: 311-326.
- DE GENNARO M., CAPPELLETTI P., LANGELLA A., PERROTTA A. & SCARPATI C. (2000) - *Genesis of zeolites in the Neapolitan Yellow Tuff: geological, volcanological and mineralogical evidence*. Contrib. Mineral. Petrol., **139**.
- DE LORENZO G. (1904) - *L'attività vulcanica dei Campi Flegrei*. Rend. Acc. Sc. Fis. Mat., Napoli, serie 5, **10**: 283-211.
- DONALD J.B. (1956) - *Shear strength measurements in unsaturated, non-cohesive soils with negative pore pressure*. Proceedings, 2nd Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering: 200-205.

CONCLUSIONS

The proposed results show that the Phlegraean pozzolan exhibits peculiar physical and index properties: specifically a high water retention capacity, greater than that one pertaining to typically a non-pyroclastic soil of equivalent grain size. In fact, high porosity and the specific surface area give to pyroclastic materials special properties as regard the interaction between solid and liquid phases. These hydrologic properties, that become stronger in pyroclastic soils with sandy and silty composition, play a not negligible role in the increase of shear strength, referring to unsaturated conditions. Such behaviour was analysed in the experiments discussed in this paper, even if limited to a sample area, it allowed the characterisation of the most typical conditions for the Phlegraean pozzolan soil.

Results explain the cut slopes stability even for heights unexpected if referred to an incoherent to pseudo-coherent soil, as that examined, favoured besides of the cohesion and by the friction angle, also by the suction and the lower unit weight. It derives a high value of the safety factor of cut slopes even if their height is greater than 20 m, in the hypothesis of lack of stratigraphic and structural discontinuities.

The deepening of knowledge on the role of retention water on the mechanical characteristics of soils with silty component, as the total cohesion and the shear strength, represent an important aspect of research in the engineering geology and geotechnics fields for fine grain size soils as evidenced in many studies of the international literature regarding, for instance, stability of unsaturated Aeolian (loess) deposits (HIGGINS & MODEER, 1996).

ACKNOWLEDGMENTS

We thank Prof. Adriano Mazzarella and Dr. Raffaele Viola for the rainfall data of Cuma Licola raingauge and Mr. Sergio Astarita for his collaboration in field activities.

- DI GIROLAMO P., GHIARA M.R., LIRER L., MUNNO R., ROLANDI G. & STANZIONE D. (1984) - *Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei*. Boll. Soc. Geol. It., **103**.
- ESPOSITO L. & DI CLEMENTE E. (2003) - *Proposta di una nuova procedura per la determinazione del limite di plasticità col cono penetrometrico*. Convegno internazionale di Geologia, Firenze 2004.
- FREDLUND D.G., MONGERNSTER N.R. & WIDGER R.A. (1978) - *The shear strength of unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal, **15** (3): 312-321.
- GAN J.K.M., FREDLUND D.G. & RAHARDJO H. (1988) - *Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test*. Canadian Geotechnical Journal, **25** (8): 500-510.
- D'INSINGA D., CALVERT A., D'ARGENIO B., FEDELE L., LAMPHERE M., MORRA V., PERROTTA A., SACCHI M. & SCARPATI C. (2004) - *⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Neapolitan Yellow Tuff eruption (Campi Flegrei, southern Italy): volcanological and chronostratigraphic implications*. EGU Assembly, Nice 2004.
- HIGGINS J.D. & MODEER V.A. (1996) - *Loess*. In: *Landslide*. TURNER A.K. & SCHSTER R.L. editors, Transportation Research Board - National Research Council: 585-606.
- INTERNATIONAL SOIL SCIENCE SOCIETY (ISSS) (1976) - *Soil Physics Terminology*. Bull. Int. Soc. Soil, **49**: 26-36.
- LIRER L. & MUNNO R. (1975) - *Il Tufo Giallo Napoletano*. Periodico di Mineral., **44**.
- PELLEGRINO A. (1967) - *Proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del Napoletano*. Associazione Geotecnica Italiana (AGI). Atti del VII Convegno di Geotecnica. Cagliari 6-7 febbraio 1967: 113-145.
- RITTMANN A. (1950a) - *Sintesi geologica dei Campi Flegrei*. Boll. Soc. Geol. It., **69**: 117-128.
- RITTMANN A. (1950b) - *Rilievo geologico dei Campi Flegrei*. Boll. Soc. Geol. It., **69**: 129-177.
- SAXTON K.E. & RAWLS W.J. (2006) - *Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions*. Soil Science Society of America Journal, **70**: 1569-1578 doi: 10.2136/sssaj2005.0117.
- SCHMIDT R. (1981) - *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the I.U.G.S. Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Geology, **9**: 41-43.
- SCHINDLER U. (1980) - *Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben*. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd, **24**: 1-7.
- SIMUNEK J., VAN GENUCHTEN M.T. & WENDROTH O. (1998) - *Parameter Estimation Analysis of the Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties*. Soil Sci Soc Am J, **62**: 894-905.
- TAYLOR D.W. (1937) - *Stability of Earth Slopes*. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, **24** (3): 197-247.
- TERZAGHI K. & PECK R.B. (1948) - *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley.
- VAN GENUCHTEN M.T. (1980) - *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Sci. Soc. Am. J., **44**: 892-898.
- VITRUVIO POLLIONE M. (27 - 23 d.C.) - *De Architettura*.
- WIND G.P. (1968) - *Capillary conductivity data estimated by a simple method*. In: P.E. RIJTEMA AND H. WASSINK (Eds.) *Water in the unsaturated zone*. Proc. Wageningen Symp. June 1966, 1, IASAH, Gentbrugge: 181-191.
- WROTH C.P. & WOOD D.M. (1978) - *The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils*. Canadian Geotechnical Journal, **15** (2): 137-145.

Received April 2008 - Accepted July 2008