

CARATTERISTICHE DINAMICHE E DI COMPRESSIBILITÀ DI UNA POZZOLANA DEBOLMENTE CEMENTATA ALLA SCALA DEL LABORATORIO

Luca Verrucci, Tatiana Rotonda
DISG - Sapienza Università di Roma
luca.verrucci@uniroma1.it, tatiana.rotonda@uniroma1.it

Paolo Tommasi
IGAG - Consiglio Nazionale delle Ricerche
paolo.tommasi@uniroma1.it

Sommario

La pozzolana rappresenta, insieme al tufo litoide, uno dei due litotipi di cui è costituita la piastra piroclastica su cui sorge la città di Orvieto. Questo materiale è caratterizzato da una porosità particolarmente elevata e da una microstruttura continua. Nella nota sono descritte, alla scala del laboratorio, le caratteristiche dinamiche da misure di velocità di propagazione di onde elastiche su provini, e le caratteristiche di compressibilità, da prove edometriche e di compressione isotropa. Vengono evidenziate in particolare la relazione inversa tra moduli elastici dinamici e porosità, e gli effetti che la struttura del materiale e la sua graduale distruzione producono sulla compressibilità.

1. Introduzione

La piastra tufacea su cui sorge la città di Orvieto è costituita interamente dai prodotti piroclastici della formazione del Tufo di Orvieto e Bagnoregio (Fig.1), denominato in passato Tufo Rosso a Scorie Nere (Auct.). La formazione si è depositata circa 330000 anni fa al termine dell'evoluzione della caldera di Bolsena, a seguito di una o più violente eruzioni. I prodotti dell'eruzione hanno coperto un'area di circa 200 km², spingendosi ad Est fino alla Valle del Tevere.

Dal punto di vista geotecnico, la rupe è costituita da una facies litoide, il vero e proprio tufo oggetto in passato di diverse indagini geotecniche di laboratorio ed in sito (Manfredini et al. 1980, Barla et al. 1991, Tommasi e Ribacchi 1998), e da una facies debolmente coerente denominata pozzolana, il cui studio da parte di questo gruppo di ricerca è iniziato solo più di recente (Rotonda et al. 2002, Tommasi et al. 2006). Entrambi i materiali si trovano in condizioni di parziale saturazione, ad eccezione del letto della formazione, lambito da una falda residente nei depositi fluvio-lacustri che la separano dal basamento argilloso (Fig. 1).

I rapporti stratigrafici tra le due principali facies piroclastiche presentano sensibili variazioni

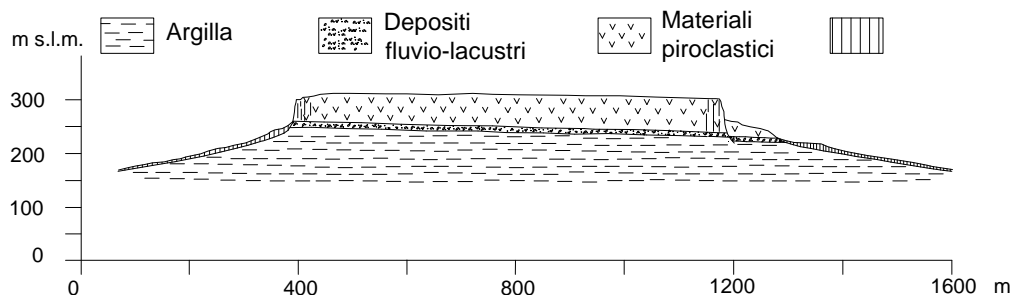


Figura 1. Sezione geologica N-S del colle di Orvieto (Manfredini et al. 1980, mod.)

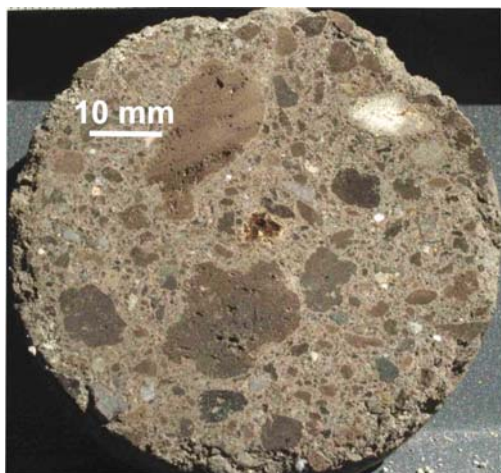


Figura 2. Macrofotografia della pozzolana SP: le pomici (nere o rossastre) ed i frammenti litici (grigi) spiccano sulla massa di fondo

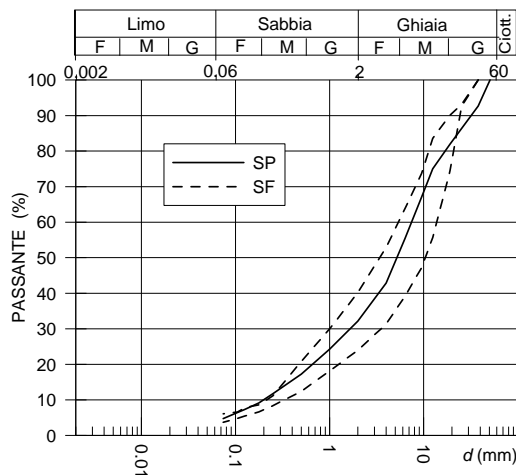


Figura 3. Distribuzione granulometrica della pozzolana

da una zona all'altra della piastra. Queste variazioni sono ben visibili nei due siti di prelievo, denominati SF e SP, entrambi situati sul fianco meridionale del colle. Nel sito di prelievo SF, sottostante la chiesa di S. Francesco, la parete è quasi interamente costituita da pozzolana, nella quale si distingue una porzione superiore più tenera (SF-H) che passa senza soluzione di continuità ad una più consistente (SF-L), ricca in grandi scorie; alla base della parete si osserva un banco di tufo litoide rosso spesso alcuni metri. Al margine della rupe è stato eseguito un sondaggio verticale a carotaggio continuo e sono stati prelevati alcuni blocchi dalle pareti di vicine cavità scavate nella pozzolana.

Nel sito SP, sotto il monastero di S. Paolo, la pozzolana, qui piuttosto tenera, si estende, per un breve tratto di rupe, fino alla base della parete. Il materiale utilizzato nella caratterizzazione geotecnica proviene in questo caso da un sondaggio sub-orizzontale eseguito nel corso dei lavori di consolidamento della rupe.

2. Caratteristiche microstrutturali e fisiche

La Pozzolana di Orvieto è formata da pomici, frammenti litici e fenocristalli (sanidino, pirosseno e leucite, spesso alterata) immersi in una matrice di fondo grigia (Fig. 2). Le dimensioni delle pomici variano da pochi millimetri ad alcuni centimetri, ma all'interno del deposito si riscontrano anche livelli ricchi di grandi pomici (fino a 100-200 mm). I frammenti litici raramente superano i 20-30 mm.

Le analisi SEM (Tommasi et al. 2006) mostrano che la massa di fondo, seppur molto porosa, è costituita da particelle vetrose di forma irregolare saldate tra loro in maniera da formare una struttura con una marcata continuità. Anche tra matrice di fondo e clasti si riscontra una decisa continuità. Generalmente la pozzolana SP presenta una struttura più aperta rispetto a quella SF. Le analisi a raggi X (Rotonda et al. 2002) indicano l'assenza di minerali zeolitici, dei quali è ricca invece la facies litoide (tufo) (Tommasi e Ribacchi 1998).

La composizione granulometrica (Fig. 3), determinata per setacciatura sul materiale disgregato manualmente, è sostanzialmente indifferenziata per i campioni SF e SP, e permette di classificare la pozzolana come una ghiaia con sabbia ($D_{50}=6.0$ mm, $U=D_{60}/D_{10}=23$). Il materiale ricostituito destinato a prove edometriche è stato preparato, con $D_{100}=1$ mm, sulla base di una curva granulometrica parallela a quella naturale.

Dati il forte contrasto di resistenza al carotaggio tra clasti e massa di fondo e la necessità di preservare la delicata struttura, i provini di laboratorio sono stati ricavati da blocchi e carote preventivamente imbibiti e congelati. Le basi dei provini sottoposti a compressione edometrica e triassiale sono state regolarizzate mediante sottili strati di gesso. Tutte le prove

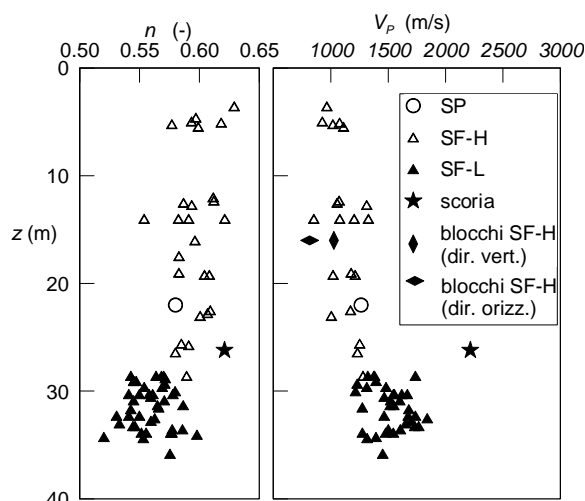


Figura 4. Profili della porosità e della velocità delle onde longitudinali determinate su provini e su blocchi

sono state eseguite in condizioni asciutte, su provini essiccati in forno a 50°C. Le misure di porosità sui provini dal sondaggio verticale del sito SF hanno confermato la presenza di due diverse facies di pozzolana sovrapposte, SF-H e SF-L (Fig. 4). Nonostante la parte inferiore sia più ricca in scorie, caratterizzate da elevata porosità, l'unità inferiore presenta una minore porosità, presumibilmente legata ad un maggiore addensamento della massa di fondo. Le caratteristiche fisiche dei provini ottenuti dai blocchi, prelevati dalle pareti delle cavità, sono del tutto assimilabili a quelle dell'unità superiore (SF-H) del vicino sondaggio. Anche la pozzolana del sondaggio orizzontale del sito SP presenta porosità e velocità delle onde longitudinali analoghe all'unità SF-H. Nella Tabella 1 sono riportati i valori medi determinati per le diverse unità.

	γ_s kN/m ³	γ_d kN/m ³	n -	V_p m/s	V_s m/s	G_{dyn} MPa	K_{dyn} MPa
SF-H	25.9	10.6	0.59	1049	518	296	779
SF-L	25.8	11.3	0.56	1515	747	663	1809
SP	24.9	10.9	0.58	1134	683	539	773

Tabella 1. Caratteristiche fisiche e dinamiche medie delle unità geotecniche

3. Caratteristiche dinamiche

Le misure della velocità di propagazione delle onde elastiche sono state eseguite mediante trasduttori piatti (diametro $\phi=12.7$ mm, frequenza di risonanza $f_0=1$ MHz), applicati alle facce dei provini essiccati, con una forza di contatto di circa 30 N ed un accoppiante acustico interposto.

In Figura 4 si riporta il profilo della velocità V_p lungo l'asse del sondaggio SF; nel grafico sono anche riportati i valori medi della velocità determinata sui provini SP e sui blocchi (quest'ultima misurata con trasduttori di diametro $\phi=50$ mm e frequenza $f_0=50$ kHz posti a distanza compresa tra 150 e 350 mm). Le misure su blocchi indicano che il materiale è anisotropo, con una velocità $V_{p,v}$ in direzione verticale superiore alla $V_{p,h}$ sul piano orizzontale, con elevata ripetibilità su 2 blocchi e 12 diverse basi di misura: $V_{p,v}=1026\pm 29$ m/s, $V_{p,h}=816\pm 50$ m/s. Il confronto delle velocità dei provini SP (carotati orizzontalmente) con i provini SF-L (carotati verticalmente) non conferma l'anisotropia, ma l'eterogeneità del materiale alla scala del laboratorio comporta un'elevata dispersione delle misure ($V_{p,v}=1049\pm 145$ m/s su 32 misure, $V_{p,h}=1134\pm 267$ m/s su 30 misure, Tab. 1).

Tutti i provini provenienti dal sondaggio verticale SF mantengono un coefficiente di Poisson dinamico (Fig. 5, Tab.1) relativamente costante ($\nu=0.34$) sull'intero intervallo di variazione delle velocità. Il tipo SP presenta invece un coefficiente medio $\nu=0.22$. Le misure di velocità confermano che il litotipo SP presenta caratteristiche di rigidità dinamica volumetrica (K_{dyn}) e tangenziale (G_{dyn}) analoghe al litotipo SF-H (Fig. 6). La porosità del materiale influenza la rigidità volumetrica e di taglio come prevedono modelli teorici di mezzi elastici in presenza di microfessure e pori aperti (Rotonda e Ribacchi 1995).

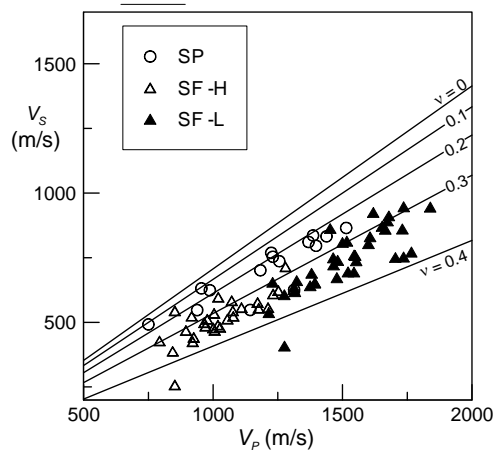


Figura 5. Velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali (V_p) e di taglio (V_s)

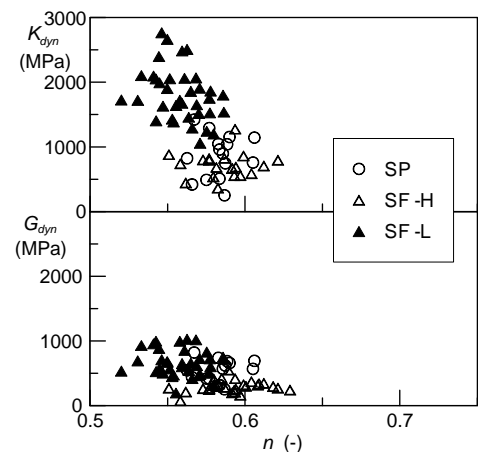


Figura 6. Relazione tra porosità e moduli di elasticità dinamici K_{dyn} e G_{dyn}

4. Caratteristiche di compressibilità

Le prove di compressione isotropa condotte in cella di Hoek su campioni SP e SF-L (Fig. 7), presentano un comportamento tipico delle rocce tenere (Pellegrino 1970), con una fase di elevata rigidità alla quale, dopo lo snervamento, segue una fase a maggiore compressibilità, simile a quella dei terreni sciolti. Dai rami di primo carico tracciati in scala semilogaritmica (Fig. 8) si osserva mediamente nei provini SF-L una rigidità ed una tensione di snervamento più elevate del litotipo SP, sebbene l'indice dei vuoti iniziale sia comparabile (Tab. 2). La differenza di comportamento potrebbe derivare dalla diversa struttura dei due materiali. In tutti i provini, compreso quello portato alla tensione massima $p'_{max}=23$ MPa, non è stato riscontrato, dopo lo snervamento, il comportamento che denota la perdita di struttura ed il cambiamento di concavità con successiva convergenza verso la curva di compressione lineare in scala semilogaritmica (Leroueil e Vaughan 1990).

	e_0	p'_{y} MPa	C_r	C_c	C_s
SF-L	1.2	5.7	0.0039	0.169	0.013
SP	1.21	4.5	0.0054	0.14	0.0069

Tabella 2. Valori medi dei parametri di compressibilità dei rami di ricarico (C_r), di compressione vergine (C_c) e di scarico (C_s) delle unità sottoposte a prove di compressione isotropa

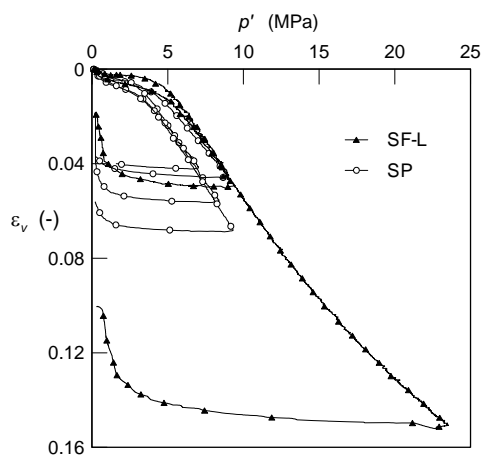


Figura 7. Tensione media (p') - deformazione volumetrica (ε_v) in prove di compressione isotropa

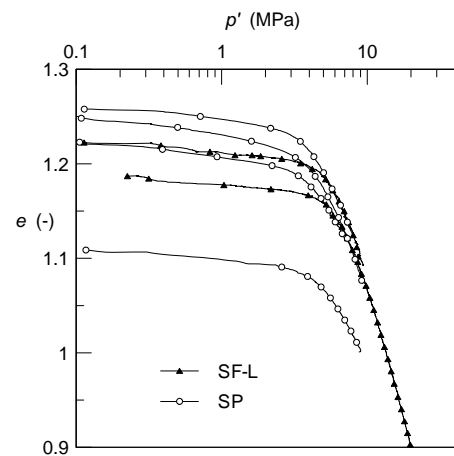


Figura 8. Prove di compressione isotropa; rami di carico nel piano semilogaritmico in termini di tensione media (p') ed indice dei vuoti (e)

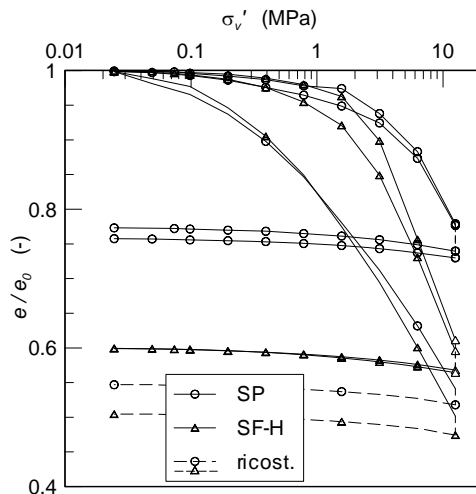


Figura 9. Curve edometriche (riferite ad un indice dei vuoti normalizzato e/e_0)

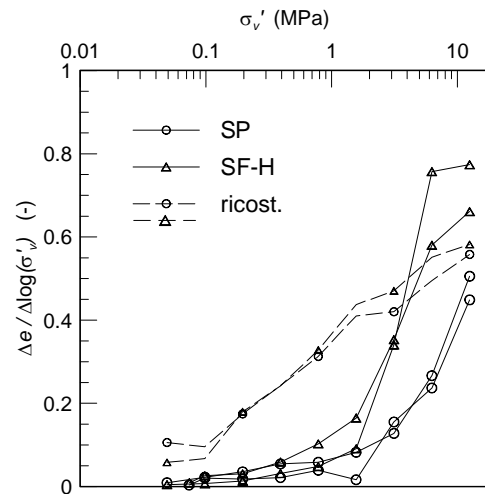


Figura 10. Andamento della compressibilità delle prove edometriche in funzione della tensione verticale σ'_v .

Le prove edometriche sono state eseguite su provini SP ed SF-H ($\phi=35.7$ mm), sia intatti sia ricostituiti, raggiungendo la tensione verticale massima di 12.8 MPa. Nella Figura 9 sono riportate le curve edometriche con gli indici dei vuoti corrispondenti ai cedimenti immediati. I provini intatti del tipo SP mostrano una pendenza gradualmente crescente al crescere della tensione verticale σ'_v , tanto che risulta difficile riconoscere una vera e propria soglia di snervamento σ'_y (Figg. 9 e 10). Sul litotipo SF-H, per il quale il cambiamento di compressibilità appare più netto, si riconosce un tratto finale al quale è associabile un indice di compressibilità C_c costante. Le curve edometriche del materiale ricostituito con il minimo stato si addensamento iniziale ($e_0=1.8 - 1.9$) risultano a tutti gli effetti coincidenti tra i due litotipi.

La rappresentazione del gradiente $\Delta e / \Delta \log(\sigma'_v)$ delle curve edometriche in funzione di σ'_v (Fig. 10) indica che la compressibilità di entrambi i materiali cresce con forte gradiente per carichi superiori a 1.6 MPa. Nel solo materiale SF-H questo processo sembra arrestarsi ad alti carichi (oltre 6.4 MPa). I provini ricostituiti presentano invece una compressibilità sempre crescente con gradienti progressivamente più bassi. Si può supporre che per tensioni più elevate il materiale ricostituito arrivi a valori di compressibilità stabili, analoghi a quelli dei materiali intatti.

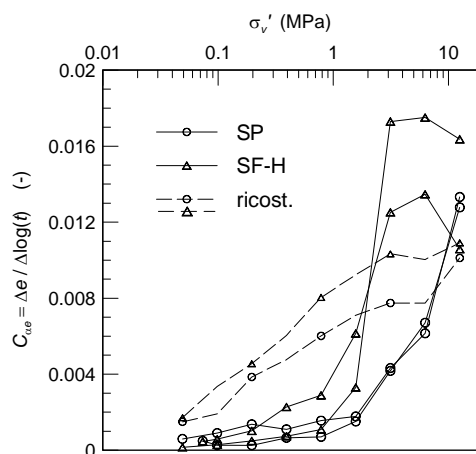


Figura 11. Andamento del coefficiente di compressibilità secondaria C_{ae} al crescere della tensione verticale σ'_v , nelle prove edometriche

Dalle prove edometriche è stato ricavato il coefficiente di compressibilità secondaria C_{ae} per ogni gradino di carico, nell'intervallo di tempo compreso tra 1' e 24 h, nel tratto delle curve $e-\log(t)$ marcatamente lineare. La variazione del coefficiente C_{ae} con la tensione verticale (Fig. 11) risulta del tutto analoga a quella del coefficiente di compressibilità. Anche in questo caso nel litotipo SP ai carichi più elevati il processo di deformazione è pienamente in atto, mentre nei provini SF-H si osserva la stabilizzazione, a partire da $\sigma'_v=3.2$ MPa, ed una successiva diminuzione della compressibilità secondaria.

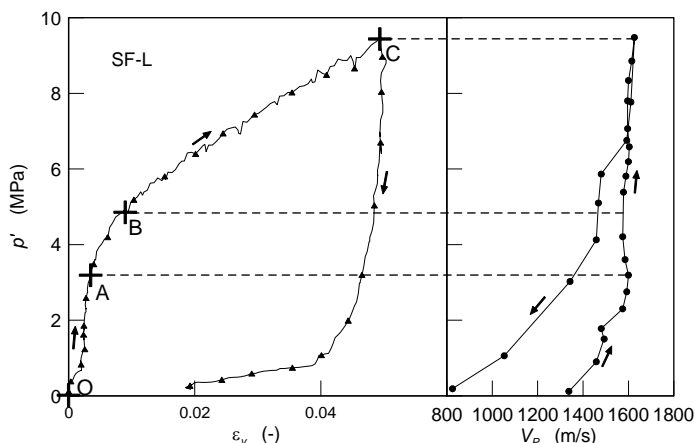


Figura 12. Curva di compressione isotropa sul materiale SF-L con evoluzione della velocità delle onde longitudinali V_p in funzione della pressione media (p')

fessure e pori) ed all'aumento dell'area di contatto tra le particelle; fenomeni che influiscono in maniera analoga sulle proprietà dinamiche e statiche del materiale.

In corrispondenza dello snervamento si registra una lieve, ma evidente, diminuzione della velocità (fase AB), per passare quindi ad una nuova fase di continuo incremento della stessa (fase BC) ($V_p=1626$ m/s per $p'_{max}=9.5$ MPa). Nel confronto con misure analoghe eseguite su rocce tenere (Rotonda 1998) si può osservare che il decadimento della velocità V_p nella pozzolana (fase AB) risulta di modesta entità (2% $V_{p,max}$) e strettamente limitato al campo tensionale dello snervamento. Al contrario, l'effetto di miglioramento delle caratteristiche dinamiche, esercitato dall'addensamento del materiale in fase di plasticizzazione, assume una maggiore importanza relativa. La modifica di struttura è confermata dalla importante riduzione di rigidità del provino al termine della prova.

L'andamento della velocità V_p con la tensione media (Fig. 12), misurata durante una prova di compressione isotropa su un provino SF-L, fornisce ulteriori elementi sui processi di deformazione al procedere del carico. La fase di incremento della velocità dal valore iniziale (1340 m/s) al valore massimo (1600 m/s) corrisponde all'irrigidimento volumetrico della curva sforzo-deformazione (fase OA "elastica") legato alla chiusura dei vuoti (micro

Bibliografia

- Barla G., Borri Brunetto M., Vai L. (1991). Studi sul consolidamento delle pareti tufacee della Rupe di Orvieto. *La meccanica delle rocce a piccola profondità*, Torino, 53-60
- Leroueil S., Vaughan P.R. (1990). The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40(3): 467-488
- Manfredini G., Martinetti S., Ribacchi R., Sciotti M. (1980). Problemi di stabilità della Rupe di Orvieto. *XIV Conv. Naz. di Geotecnica*, Firenze, 1 : 231-246
- Pellegrino A. (1970). Mechanical behaviour of soft rocks under high stresses. *2nd International Congress on Rock Mechanics*, Belgrade, 2: 173-180
- Rotonda T. (1998). The role of the dynamic measurements in characterizing the mechanical behaviour of a high porosity rock. *2nd International Symposium on Hard Soils and Soft Rocks*, Napoli, 2 : 805-815
- Rotonda T., Ribacchi R. (1995). *Caratteristiche dinamiche di rocce porose e fessurate*. Rivista Italiana di Geotecnica, 29 : 17-36
- Rotonda R., Tommasi P., Ribacchi R. (2002). Physical and mechanical characterization of the soft pyroclastic rocks forming the Orvieto cliff. *Eurock 2002 - Workshop on Volcanic Rocks*, Madeira, 137-146
- Tommasi P., Ribacchi R. (1998). Mechanical behaviour of the Orvieto tuff. *2nd International Symposium on Hard Soils and Soft Rocks*, Napoli, 2 : 901-909
- Tommasi P., Rotonda T., Ribacchi R., (2006). Caratterizzazione geotecnica della pozzolana di Orvieto. *Questioni di Ingegneria Geotecnica-II, Scritti in onore di Arturo Pellegrino*. A cura di G. Urciuoli. Hevelius Editore, Benevento