

Geologia. — *Caratteri fisico-meccanici del Tufo Giallo della Via Tiberina (Roma)*. Nota di GIANCARLO DE CASA e GIANNI LOMBARDI, presentata (*) dal Socio A. Mottana.

ABSTRACT. — *Physico-mechanical characteristics of the Via Tiberina Yellow Tuff (Rome)*. This tuff (TGVT) is a product of the Sabatini Quaternary Volcanic District outcropping just North of Rome. The TGVT was used in many monumental structures of Ancient Rome and nowadays large volumes are extracted from quarries located in the Riano area. This work discusses the results of physico-mechanical analyses (density, porosity, imbibition, elastic waves velocity, uniaxial, compressive, tensile and flexural strength) carried out on a series of blocks from quarries. The range of the data obtained in natural, saturated and freezing conditions allowed assessing the influence of environmental conditions on the TGVT. Among volcanic tuffs, the TGVT shows good mechanical properties wholly adequate for its use in the building industry.

KEY WORDS: Rome; Sabatini volcano; Tuff; Rock mechanics.

RIASSUNTO. — Il Tufo Giallo della Via Tiberina (TGVT) è un prodotto del Distretto Vulcanico Quaternario dei Sabatini affiorante poco a nord di Roma. È stato utilizzato sin dall'antichità nelle strutture di monumenti Romani ed attualmente importanti volumi sono estratti da numerose cave nell'area di Riano. Si presentano i risultati di una serie di analisi fisico-meccaniche (densità, porosità, imbibizione, velocità onde elastiche, resistenza a compressione uniassiale, a flessione e a trazione) ottenute da un'estesa campionatura di blocchetti da cave. La determinazione del campo di variabilità dei risultati in condizioni naturali, di saturazione in acqua e di gelività ha permesso di valutare la dipendenza del TGVT dalle condizioni ambientali. Tra i tufi vulcanici, il TGVT ha mostrato avere buone proprietà meccaniche del tutto adeguate per il suo impiego come materiale da costruzione.

INTRODUZIONE

Roma ed i suoi dintorni sono caratterizzati dalla presenza di affioramenti di vulcaniti quaternarie tra le quali predominano rocce piroclastiche legate all'attività del Vulcano dei Colli Albani (in riva sinistra del Tevere ed a sud) e del Distretto Vulcanico dei Sabatini (verso nord). Oltre a facies incoerenti, tra le quali rientra la pozzolana, sono presenti anche importanti formazioni di tufi litoidi che sono utilizzati come pietre da costruzione sin dai tempi dei primi insediamenti umani. Nelle strutture dei monumenti dell'antica Roma sono presenti tufi diversi per struttura, colore e caratteristiche fisico-meccaniche, in massima parte riferibili a sei tipi principali, quattro da formazioni dei Colli Albani (Tufo Grigio Granulare o Tufo del Palatino o «Cappellaccio»; Tufo Lionato; Pietra Gabina; Peperino di Albano) due dai Sabatini (Tufo Giallo della Via Tiberina e Tufo Rosso a Scorie Nere). Uno schema della distribuzione degli affioramenti ove erano localizzate le cave romane di questi tufi ed una sintesi dei loro principali caratteri è nel lavoro di Jackson *et al.* (2005) e nei riferimenti bibliografici ivi contenuti.

I tufi portati a giorno durante scavi archeologici, per l'esposizione agli agenti atmosferici e antropici e per il cambiamento improvviso di condizioni ambientali, subiscono

(*) Nella seduta del 9 marzo 2007.

processi di alterazione superficiale di tipo principalmente fisico con fenomeni di scagliatura e fessurazione. In tempi recenti campioni da strutture monumentali di questi tufi sono stati oggetto di indagini finalizzate ad acquisire una conoscenza dettagliata dei loro caratteri strutturali e petrografici ed a esperimenti di trattamenti conservativi per prevenire e curare i processi di decadimento del materiale (Bianchetti *et al.*, 1994; De Casa *et al.*, 1994, 1999; Lombardi *et al.*, 1997).

Nonostante il loro largo utilizzo come materiale da costruzione, pochi sono i dati completi sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei «tufi» che sotto questo nome generico comprendono in realtà rocce strutturalmente molto varie in dipendenza delle diverse modalità di eruzione e di messa in posto. I primi dati sulla loro densità, carichi di rottura, porosità, assorbimento d'acqua e gelività sono riportati in Penta (1956) e riguardano prove eseguite dal Laboratorio Sperimentale delle Ferrovie dello Stato nel 1928 su oltre 40 campioni di varie facies di tufi del Lazio, ivi incluso il Tufo Giallo della Via Tiberina (TGVT). Dati più recenti sul TGVT sono in un lavoro di Nappi *et al.* (1979) che hanno analizzato i caratteri geomeccanici di campioni prelevati in cave attive.

Per quanto riguarda altri tufi del Vulcano dei Colli Albani e dei Sabatini, in Ventriglia (2002) sono riportati dati sulle caratteristiche fisico-meccaniche di varie facies della Provincia di Roma, eseguite su campioni sia da affioramenti sia da sondaggi. Dati su alcuni campioni di Tufo Lionato sono nelle note illustrative (Camponeschi *et al.*, 1982) di un rilevamento geologico-tecnico dell'area di Ardea (a sud di Roma). Nell'ambito di uno studio riguardante anche i caratteri petrografici ed i trattamenti conservativi, De Casa *et al.* (1999) riportano i risultati delle analisi fisico-meccaniche di Tufo Lionato da monumenti e da cave abbandonate. In un recente lavoro, unitamente ad una caratterizzazione petrografica, Jackson *et al.* (2005) hanno presentato i risultati di analisi fisico-meccaniche su alcuni campioni dei diversi tipi di tufo dei Colli Albani e dei Sabatini utilizzati in monumenti Romani.

Attualmente le uniche cave di tufo attive sono localizzate nell'area di Riano, circa 15 km a nord di Roma in riva destra del Tevere, impostate nel TGVT, una formazione vulcanica di età compresa tra 561.000 e 548.000 anni prodotta dall'attività del Distretto Vulcanico Sabatino. La distribuzione degli affioramenti è presentata in Mattias e Ventriglia (1970), nei Fogli 143 Bracciano (Bertini *et al.*, 1971) e 150 Roma (Lipparini *et al.*, 1967) della Carta Geologica d'Italia, nella carta geologica schematica di Nappi *et al.* (1979) e in De Rita *et al.* (1993).

Dal III sec. a.C. il TGVT è stato utilizzato nelle strutture di numerosi importanti monumenti romani ed in un recente lavoro di Lombardi e Meucci (2006) è riportato un inquadramento geologico-storico e archeologico relativamente al suo uso ed i risultati di analisi petrografiche e chimiche eseguite su campioni sia da monumenti sia da cave in attività. A completamento di questo lavoro, constatata la mancanza di dati fisico-meccanici sui tufi ottenuti da una campionatura di entità adeguata a rappresentare la loro variabilità, stimolati dall'interesse del locale Consorzio tra i produttori, è stata eseguita una serie di analisi secondo le moderne procedure internazionali partendo da 75 blocchetti di TGVT prelevati a vari livelli in cinque cave dell'area di Riano (Roma).

LE CAVE DI TGVT

Nell'area romana, quasi in modo continuo e in tutti i periodi nei quali era richiesto materiale da costruzione, il tufo litoide fu un materiale privilegiato per la facilità di taglio e lavorazione, per la bassa densità, per le buone caratteristiche meccaniche. Enormi volumi di tufi sono ora compresi nella cinta urbana, nascosti da intonaci o in fondazioni di palazzi, chiese, monumenti e fabbricati di abitazione che caratterizzano la lunga vita dell'Urbe. Numerose cave in diverse formazioni vulcaniche furono aperte nell'immediata periferia romana, in particolare nel Tufo Lionato dei Colli Albani.

Gli Etruschi furono i primi ad estrarre blocchi di TGVT ed i Romani, dopo la conquista dei territori a nord di Roma nel 396 a.C., inizialmente impiegarono la stessa manodopera che lavorava negli impianti d'escavazione esistenti. Le cave erano localizzate soprattutto nella Valle Lunga, al km 13 della Via Tiberina, nell'area di Grotta Oscura già territorio di Veio. Da questa area, oltre che con i carri, un affluente del Tevere consentiva il trasporto dei blocchi per via d'acqua fino al centro di Roma. Attualmente l'affluente (torrente) ha una portata molto limitata ed è a malapena riconoscibile.

Con la decadenza della Roma imperiale, dal VI sec. d.C. l'attività edilizia si ridusse drasticamente e per molti secoli il TGVT fu utilizzato solo localmente. Quando con il tardo Medioevo e, con maggior vigore, nel Rinascimento riprese l'attività costruttiva si

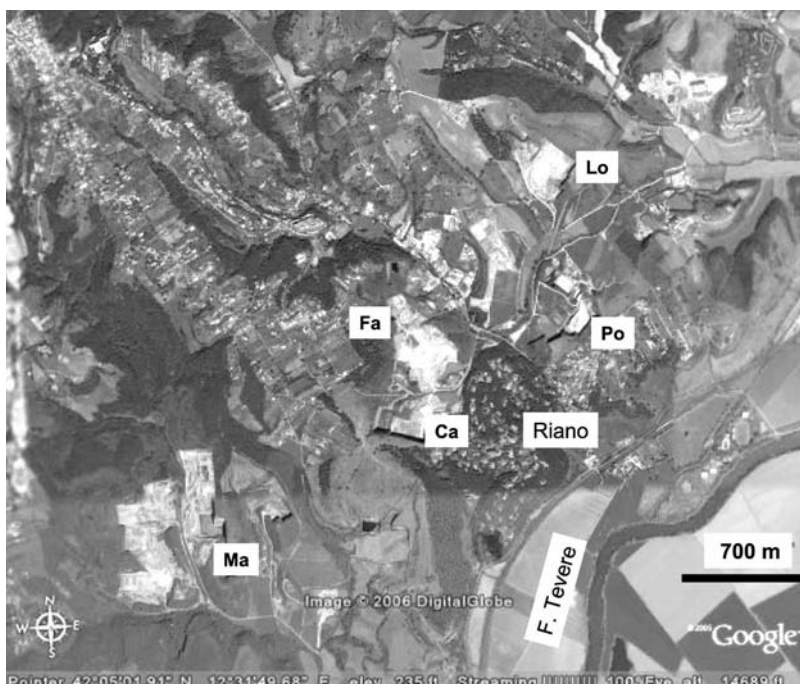


Fig. 1. – Foto aerea dell'area delle cave attive di Riano. Le aree di colore più chiare corrispondono agli scavi delle cave, tra le quali le cinque campionate per questo lavoro. Ca = Cannetaccio; Fa = Favari; Lo = Lodolina; Ma = Mandroni; Po = Pozzuolo.

utilizzò principalmente il Tufo Lionato estratto dalle cave lungo la Valle dell'Aniene ed il Peperino dei Colli Albani. Entro formazioni del Distretto Vulcanico Sabatino, cave di tufo operarono a nord di Roma lungo la Via Flaminia e la Via Tiberina ed anche nel TGVT. Clerici (1894a) riporta che «*varie cave si trovano lungo la Via Tiberina e lungo la diramazione per Riano*», ed in un altro lavoro (Clerici, 1894b) segnala una diffusa attività di estrazione in loco. Penta (1956) in un lavoro sui materiali da costruzione del Lazio, riguardo agli impianti estrattivi nell'area di affioramento del TGVT, scriveva: «... *dopo Prima Porta sulla sinistra da Roma verso il 15° km esiste una cava di tufo litoide chiaro ricco in pomici rossastre*».

Il grande sviluppo del TGVT iniziò quando le cave di Tufo Lionato alla fine degli anni '60 dovettero cessare l'attività perché ormai all'interno di aree urbanizzate. Si aprirono numerose cave principalmente nel territorio di Riano, a nord delle cave romane di Grotta Oscura, ove il TGVT raggiunge i massimi spessori entro paleovalli riempite dalla coltre vulcanica. Attualmente è presente un importante polo industriale con alcune decine di cave concentrate su circa 32 ettari (fig. 1).

Osservato sulla parete verticale delle cave in attività, il TGVT nella sua facies più caratteristica si presenta massivo, coerente, con caratteri relativamente omogenei su grandi volumi. In alcune aree mostra accenni di stratificazione. I blocchi di TGVT sono compatti, nella massima parte degli affioramenti di colore giallo chiaro quando asciutti, molto più scuri quando bagnati; esistono anche alcune facies di colore rossastro o grigio. Macroscopicamente si presenta come un aggregato di pomici, le più frequenti di colore dal giallo all'aranciato, ma anche grigie e nerastre, di dimensioni normalmente centimetriche, a volte decimetriche. Nella massa spiccano inclusi litici sedimentari, principalmente di colore chiaro, carbonatici, e vulcanici nerastri, oltre a cristalli neri di pirosseno, lamelle di biotite e aggregati tondeggianti bianchi di leucite analcimizzata. Dati petrografici e chimici completi sono nel lavoro di Lombardi e Meucci (2006) al quale si rimanda anche per i dati bibliografici e storico-archeologici.

Nappi *et al.* nel 1979 hanno studiato le caratteristiche del TGVT nell'area delle cave di Riano, presentando una carta geologica con dati sulle cave, la composizione dei vari livelli della formazione e i caratteri fisico-meccanici del tufo. Indicano in circa 50 milioni di metri cubi la quantità complessiva di tufo cavato a Riano. Non sono disponibili statistiche aggiornate sulla produzione. L'Ispettorato di Polizia Mineraria della Regione Lazio ha recentemente iniziato a richiedere alle singole imprese dati sull'attività di estrazione. Per quanto riguarda le cave di Riano (*comunicazione personale*) dalle dichiarazioni di 5 delle 9 imprese operanti in loco risulterebbe per il 2004 una produzione annuale complessiva di circa 300.000 tonnellate (corrispondenti a circa 200.000 mc di tufo da taglio, prevalentemente blocchetti) e 600.000 tonnellate di pezzame. Con le odierne lavorazioni, molto meccanizzate, l'escavazione del materiale procede comunque con gran velocità ed i piani delle cave si abbassano al ritmo anche di 10 m l'anno (fig. 2). Ciò provoca non pochi problemi ambientali, *in primis* lo sconvolgimento del sistema acquifero locale, dato che il materiale è estratto fino a quote sotto il livello della falda freatica, utilizzando pompe per mantenere asciutte le aree di scavo.



Fig. 2. – Panoramica della cava Lodolina.

Lo sfruttamento è facilitato da condizioni particolarmente favorevoli: area con relativamente poche abitazioni, formazioni di copertura a spessore limitato; materiale omogeneo su vaste aree e per spessori anche di decine di metri; struttura della formazione che consente di lasciare nelle cave pareti stabili quasi verticali alte anche

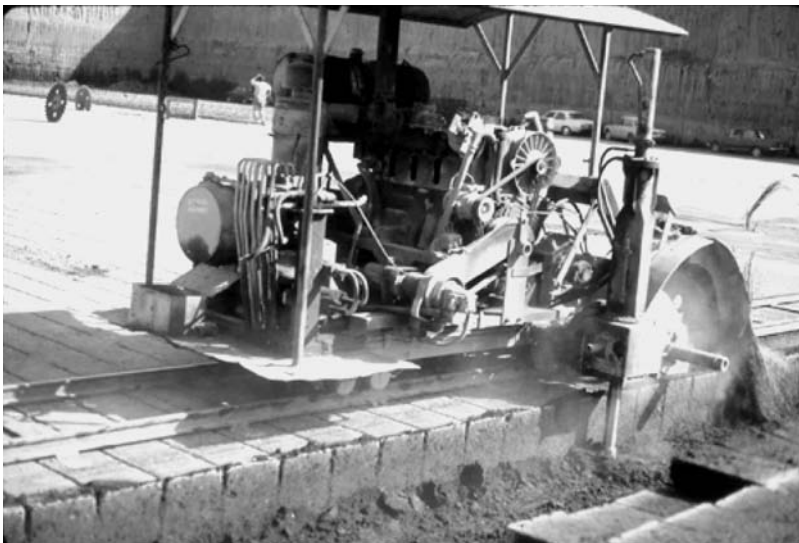


Fig. 3. – Una delle macchine segatrici utilizzate per il taglio dei blocchetti sul piazzale di una cava di TGVT di Riano.

oltre 30 m; roccia con durezza modesta che facilita le operazioni di formatura dei blocchi.

I maggiori volumi di produzione riguardano blocchi squadrati ottenuti con macchine semoventi dotate di una o più seghe circolari di diametro superiore al metro, a denti rinforzati con piastrine di metallo duro (fig. 3). I blocchi più richiesti hanno dimensioni $37 \times 25 \times 11$ cm circa e sono venduti sia sfusi sia in *pallets* da 90-100 pezzi. Per i suoi caratteri di resistenza all'alterazione meccanica e chimica e di isolamento termico è molto adatto come materiale da costruzione e vi è una forte richiesta locale dato che, dopo la chiusura delle altre cave, l'area di Riano è l'unica di una certa dimensione rimasta in attività nei dintorni di Roma.

Negli ultimi anni i proprietari delle cave si sono uniti in un consorzio per la valorizzazione del TGVT e l'offerta si è diversificata creando una gamma di prodotti per l'arredo urbano e dei giardini, con pezzi speciali per pavimentazioni e rivestimenti di interni, blocchi di varie dimensioni anche per sculture e attenzione al design. Notevoli quantitativi di TGVT sono ora commercializzati anche in Italia settentrionale e vi è un indotto notevole di artigiani che costruiscono ed esportano macchinari ed accessori per il taglio e la lavorazione del tufo.

LA CAMPIONATURA ED I PROVINI PER LE ANALISI

I dati fisico-meccanici disponibili in letteratura sui tufi sono pochi e basati sull'analisi di un limitato numero di campioni. In realtà anche la sola osservazione macroscopica evidenzia che nell'ambito di formazioni piroclastiche come il TGVT, affioranti su grandi estensioni con spessori di decine di metri, si susseguono facies diverse per coerenza, presenza e tipo di fratture, assortimento granulometrico dei componenti che hanno ovviamente un'influenza sostanziale sul comportamento geomeccanico. Per il presente lavoro, con la collaborazione dell'Italtufo, il consorzio che riunisce i proprietari delle cave di Riano, si è cercato di stabilire la variabilità delle caratteristiche fisico-meccaniche del TGVT, partendo da una campionatura rappresentativa in termini di livelli della formazione e distribuzione areale, costituita da un insieme di 75 blocchetti di tufo prelevati in cinque delle maggiori cave attive della zona. L'utilizzo di materiale da cava ha garantito la freschezza del tufo e la disponibilità di campioni sottoposti a sollecitazioni meccaniche analoghe.

Per l'estrazione dei blocchetti dopo la scopertura del banco produttivo si preparano ampi piazzali perfettamente orizzontali sui quali una macchina speciale dotata di una grande sega circolare traccia dapprima una serie di tagli paralleli in una direzione. Una seconda macchina con due lame di sega regolabili disposte a 90° , procedendo in senso normale al primo taglio, ricava i blocchetti delle dimensioni richieste. Per questo lavoro è stato campionato il TGVT di piazzali posizionati a diversi livelli della formazione nelle cave, dalla quota più bassa, Mandrioni, Pozzuolo, Cannetaccio, Favari e Lodolina racchiuse entro un'area di circa 10 kmq in riva destra del Tevere poco lontano dalla Via Tiberina (fig. 1).

Su ciascun piazzale sono stati prelevati 15 blocchetti delle dimensioni di circa $37 \times 27 \times 11$ cm in punti di prelevamento distanziati tra loro da 10 a 20 m lungo l'asse

TABELLA I. – Quota, coordinate espresse in WGS84 del centro, orientamento e lunghezza degli allineamenti sui piazzali delle 5 cave ove sono stati campionati i blocchetti di TGVT utilizzati per le analisi.

Cava	Quota s.l.m.	Latitudine e Longitudine	Allineamento e lunghezza	Numero blocchetti
Lodolina	85	42° 04' 45,43" N 12° 30' 53,50" E	NE-SW 80 m	15
Favari	76	42° 05' 00,35" N 12° 31' 53,03" E	NW-SE 160 m	15
Cannetaccio	74	42° 04' 47,91" N 12° 31' 52,37" E	E-W 200 m	15
Pozzuolo	65	42° 05' 06,04" N 12° 32' 37,64" E	NE-SW 80 m	15
Mandroni	55	42° 04' 29,42" N 12° 30' 33,22" E	N-S 50 m	15

di maggiore sviluppo della cava. In tab. I è riportata la distribuzione della campionatura che aveva un volume finale di circa 0,8 mc.

Per le analisi, secondo le normative del documento ASTM D4543-85 (1991), sono stati ricavati da un blocchetto (fig. 4) 6 provini cilindrici allungati (diametro di 7,42 cm ed altezza di 15 cm) ed un provino parallelepipedo (24 × 11 × 6 cm) e da un altro ancora 6 provini cilindrici allungati e 9 cilindrici tozzi (diametro 7,42 cm con altezza di 3,7 cm). Tutti i provini sono stati realizzati in modo da ottenere perfetta planarità e parallelismo

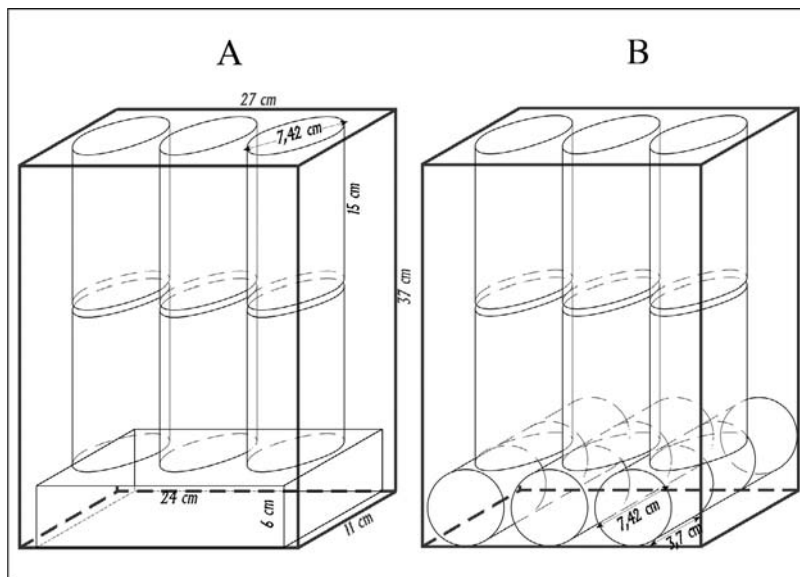


Fig. 4. – Le prove fisico-meccaniche sono state eseguite su provini di forma parallelepidea, cilindrica allungata e tozza ricavati dai blocchetti di TGVT.

delle facce. Le dimensioni sono state rilevate con calibro ventesimale ed i pesi con bilancia tecnica al centesimo di grammo.

Le prove sono state eseguite nel Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma «La Sapienza». Dalle analisi è emerso che sussistono differenze nei caratteri del TGVT prelevato su piazzali di cava situati a quote diverse e quindi nella presentazione sono stati tenuti separati i dati relativi alle singole cave.

CARATTERISTICHE FISICHE

Densità.

La densità è stata calcolata sui provini cilindrici e parallelepipedi essiccati a 110°C

TABELLA II. – *Valori della densità (kN/m³) calcolata su: (a) provini cilindrici allungati; (b) provini cilindrici tozzi; (c) provini parallelepipedi.*

	Numero e tipo di provini	Densità		
		Media	Range	Deviazione standard
Campioni da 4 cave	n. 240 a	12,29	11,08-13,25	0,46
	n. 280 b	12,12	10,92-13,21	0,48
	n. 60 c	12,11	11,19-12,84	0,41
Cava Lodolina	n. 60 a	14,65	14,13-15,49	0,35
	n. 70 b	14,36	13,70-15,60	0,39
	n. 15 c	14,61	13,90-15,43	0,45

come rapporto massa/volume, secondo le procedure prescritte dall'ASTM Designation D854-83 (1991).

I risultati per i campioni da 4 delle cave sono compresi entro un range ristretto (tab. II), con valori medi variabili tra 12,11 e 12,29 kN/m³, a seconda della morfologia del provino, e distribuzione dei valori relativamente uniforme (fig. 5). Il campo di variazione si può considerare modesto, tenendo conto del numero di misure effettuate (580), dello spessore ed estensione della formazione campionata, della notevole variabilità nella distribuzione del tipo e quantità di inclusi litici sedimentari e vulcanici e della presenza di occasionali stratificazioni. La densità media bassa rispetto a quella propria di altre rocce ignee o di arenarie e calcari è dovuta alla ricchezza in vetro vulcanico e in minerali con bassa densità quali le zeoliti, componenti principali della roccia.

I blocchetti del livello campionato nella cava Lodolina avevano una particolare ricchezza in frammenti litici sedimentari e lavici a densità più elevata della matrice pomicea del TGVT. Di conseguenza, le densità di questi campioni sono risultate nettamente maggiori di quelle misurate nelle altre cave, con medie comprese tra 14,36 e 14,65 kN/m³ e valori distribuiti in un istogramma con un elevato numero di classi (fig. 5).

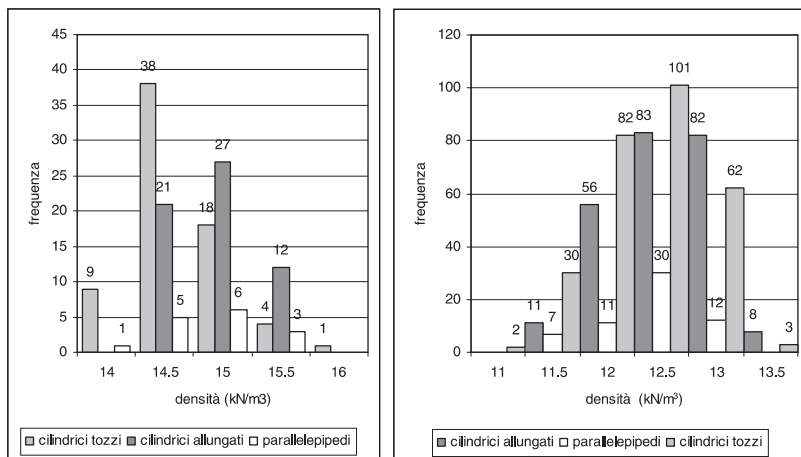


Fig. 5. – A sinistra, istogramma della distribuzione dei valori della densità del TGVT in 4 cave, calcolata su 580 provini di varia forma. A destra, i valori della densità del TGVT campionato nella cava Lodolina, calcolato su 70 provini.

Per la densità reale, da 8 blocchetti per ciascuna delle 5 cave è stato distaccato un frammento di circa 50 g. I frammenti sono stati macinati fino a renderli passanti al setaccio da 62 µm, quartati e la densità misurata sulle polveri come media di tre analisi con un picnometro ad elio.

I risultati sono compresi nel range 23,14-24,22 kN/m³ (tab. III) con valori rappresentanti una media tra i bassi valori del vetro vulcanico e quelli più alti dei frammenti litici e dei minerali dello scheletro. I valori più alti sono attribuibili al tufo della cava Lodolina.

TABELLA III. – Valori della densità reale (kN/m³) misurata su polveri con un picnometro ad elio.

	Numero provini	Media	Range	Deviazione standard
Media su 5 cave	40	23,44	23,14 – 24,22	0,006

Porosità e saturazione.

Un totale di 360 misure di porosità sono state eseguite su provini di forma diversa secondo le procedure prescritte dall’ASTM Designation D4404-84 (1991) e le raccomandazioni ISRM (1979a).

Come tutti i materiali piroclastici, anche il TGVT presenta una notevole porosità sia intergranulare, generalmente accessibile, sia intragranulare in gran parte chiusa. Per i campioni di 4 cave, il valore medio della porosità totale (tab. IV) è del 48,1% con un campo di variazione compreso tra il 41,8 e il 52,9%. Sono valori molto elevati in particolare per rocce coerenti con buone caratteristiche di resistenza meccanica, ma comunque riscontrati anche in altri tipi di tufi come ad esempio il Tufo Lionato (De Casa et al., 1999). La porosità chiusa dei campioni di 4 cave ha un valore medio di 22,8%, con

TABELLA IV. – *Valori della porosità e della saturazione.*

Cava	Quota s.l.m.	Numero provini	Porosità totale		Porosità chiusa		Saturazione	
			media (%)	range (%)	media (%)	range (%)	media (%)	range (%)
Lodolina	85	80	38,9	32,1-50,7	16,2	10,9-20,7	22,7	13,5-35,7
Favari	76	80	47,3	42,8-50,4	21,5	15,7-27,5	25,8	22,4-29,2
Cannetaccio	74	60	47,4	41,8-52,2	22,3	15,7-29,8	25,1	16,0-30,1
Pozzuolo	65	80	49,2	45,5-52,9	23,7	18,9-29,9	25,5	21,2-29,2
Mandroni	55	60	48,2	46,5-50,1	23,6	19,6-28,3	24,6	20,3-28,0
Media delle 4 cave		280	48,1	41,8-52,9	22,8	15,7-29,9	25,3	16,0-30,1

un campo di variazione compreso tra 15,7 e 29,9%. Non si osservano variazioni dei valori delle medie e dei range correlati con la quota del piano di cava.

Coerentemente con il loro maggiore contenuto in inclusi litici di elevata densità, per i campioni della cava Lodolina sono stati ottenuti valori nettamente minori, con una media della porosità totale (su 80 misure) di 38,9%, rispetto a 48,1% delle altre 4 cave, e della porosità chiusa di 16,2% rispetto a 22,8%.

La conoscenza della capacità di saturazione è importante perché costituisce un parametro che condiziona la penetrazione delle acque nel tufo e di conseguenza il procedere dei processi di alterazione e le modalità di intervento con trattamenti conservativi. È stata misurata seguendo le norme del Doc Normal 7/81 (1981), con immersione totale dei provini in acqua a pressione ordinaria per 72 ore, tempo necessario per la loro completa imbibizione.

Il valore medio della saturazione per i campioni da 4 cave (tab. IV) è del 25,3%, con variazioni comprese nell'intervallo 16,0-30,1%. Nei campioni dalla cava Lodolina il valore della saturazione è nettamente più basso (media 22,7%).

Considerando l'elevata porosità del TGVT, i valori della saturazione riscontrati sono relativamente bassi. Ciò è dovuto alla ricchezza in micropomici vetrose in buono stato di conservazione che sono fortemente porose, ma caratterizzate da un elevata percentuale di vuoti non comunicanti.

Coefficiente di assorbimento capillare.

Così come la capacità di saturazione, il valore di questo coefficiente è indicativo delle possibilità di assorbimento e scambio dell'acqua in superficie. La misura è stata realizzata secondo la normativa Doc Normal 11/82 (1982) su 20 provini cilindrici tozzi e su 20 parallelepipedici. Dato che i valori della velocità di assorbimento sono influenzati dalle condizioni ambientali nelle quali si effettuano le misurazioni, le prove sono state eseguite in un breve arco di giorni al fine di minimizzare le variazioni di temperatura, umidità e pressione atmosferica del laboratorio.

TABELLA V. – Risultati delle prove di risalita capillare effettuate su 5 provini cilindrici allungati e 5 parallelepipedi per ciascuna cava.

Cava	Quota s.l.m.	Numero provini	Coefficiente di assorbimento capillare ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$)	Velocità di risalita (mm/h)
Lodolina	85	10	$1,62 \cdot 10^{-2} - 5,33 \cdot 10^{-3}$	1,40-1,80
Favari	76	10	$0,49 \cdot 10^{-2} - 8,60 \cdot 10^{-2}$	0,50-4,58
Cannetaccio	74	10	$2,63 \cdot 10^{-3} - 8,17 \cdot 10^{-3}$	0,46-2,30
Pozzuolo	65	10	$2,39 \cdot 10^{-3} - 6,87 \cdot 10^{-3}$	0,65-1,67
Mandrioni	55	10	$2,89 \cdot 10^{-3} - 8,75 \cdot 10^{-3}$	0,51-0,89

Come si può osservare dai dati di tab. V, i coefficienti di assorbimento hanno un ampio campo di variabilità (un ordine di grandezza), da 10^{-2} a $10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$, così come le velocità di risalita capillare misurate lungo gli spigoli dei provini parallelepipedi, comprese tra 0,5 e 4,6 mm/h nelle 24 h. Ciò è giustificato dal fatto che la risalita capillare dell'acqua è un fenomeno complesso, condizionato da numerosi parametri che nei tufi sono fortemente variabili: forma, distribuzione ed accessibilità dei pori, anisotropia strutturale della distribuzione dei componenti quali pomici, inclusi litici e ceneri, grado di cementazione, andamento della diagenesi e dell'alterazione.

Velocità delle onde elastiche.

Le misure sono state eseguite su un totale di 300 provini cilindrici allungati, secondo le procedure prescritte dall'ASTM D2845-90 (1991) e le raccomandazioni ISRM (1978a). L'apparecchiatura è costituita da un generatore di onde, da trasduttori di onde P e S (queste ultime tra loro polarizzate su due piani ortogonali) con frequenza propria di 54 kHz, un oscilloscopio per la misura dei tempi di transito e per la visione delle forme d'onda. Tutte le misure sono state eseguite su provini orientati normalmente alla giacitura originaria dell'ammasso vulcanico e sottoposti ad un carico verticale di 1 MPa per assicurare la continuità fisica completa fra trasduttori e provini.

Si osservano significative diversità nel range e nei valori medi delle velocità sia delle onde P sia delle onde S, queste ultime come valore medio delle due componenti polarizzate a 90° : i valori delle velocità tendono ad essere man mano minori procedendo verso le quote più basse della formazione (tab. VI). Attraverso le relazioni che legano le velocità delle onde P e S con la densità dei materiali, è stato calcolato il modulo elastico dinamico. I valori variano tra 2,07 e 7,69 GPa con una media di 4,40 GPa.

La velocità delle onde elastiche è un parametro indicativo dello stato di conservazione di una pietra ed esistono apparecchiature portatili che consentono misure non distruttive *in situ*, molto utili per una prima valutazione della qualità di una pietra in un monumento. Una velocità elevata si ha, ad esempio, nel caso di una struttura integra senza effetti di microfratture od alterazioni.

I valori mediamente minori della velocità nei campioni da piazzali di cava situati a quote minori sembrano indicare una più bassa qualità del materiale, presumibilmente per un'incipiente azione di alterazione da parte della vicina falda freatica.

TABELLA VI. – *Velocità delle onde elastiche misurate su provini cilindrici allungati e modulo elastico dinamico.*

Cava	Quota s.l.m.	Numero provini	Velocità onde P		Velocità onde S		Modulo elastico dinamico	
			media (m/s)	range (m/s)	media (m/s)	range (m/s)	media (GPa)	range (GPa)
Media		300	2129	1514-2726	1132	810-1445	4,40	2,07-7,69
Lodolina	85	60	2435	2009-2726	1279	1158-1445	6,31	5,08-7,69
Favari	76	60	2253	2088-2470	1197	1072-1338	4,61	3,54-5,97
Cannetaccio	74	60	2261	2098-2588	1202	1097-1383	4,63	3,78-6,40
Pozzuolo	65	60	2151	1795-2427	1166	1017-1312	4,17	3,01-5,21
Mandroni	55	60	1663	1514-1867	884	810-1006	2,51	2,07-3,39

Anche i valori del modulo elastico dinamico, ottenuto dalla velocità delle onde elastiche, hanno una certa correlazione con la quota dei piazzali delle diverse cave, con valori maggiori a quote più alte e nell'insieme un ampio campo di variazione.

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Resistenza a compressione uniassiale.

Le misure sono state eseguite secondo le procedure prescritte dall'ASTM D2938-86 (1991) e le raccomandazioni ISRM (1979*b*) su 20 provini cilindrici allungati ($7,42 \times 14,80$ cm) per ciascuna cava, in condizioni naturali, di gelività e di saturazione d'acqua.

Il campo di variazione dei risultati (tab. VII) per i provini testati in condizioni naturali è piuttosto ampio, compreso tra 3,39 e 12,31 MPa, ma in realtà la distribuzione dei valori segue una stretta curva gaussiana simmetrica con la quasi totalità dei valori di rottura compresa nell'intervallo 6-9 MPa (fig. 6). Solo il 6% dei campioni rientra nel campo dei valori di rottura inferiori a 5 MPa e l'8% circa supera i 9 MPa. Molti dei valori estremi sono collegabili a campioni con caratteri particolari anche macroscopicamente rilevabili, quali presenza di venature, ricchezza in pomici di grosse dimensioni, zone friabili ecc. Le variazioni sono quindi limitate a volumi di materiale ridotto, un dato importante per la locale industria estrattiva.

Per quanto concerne le differenze tra i dati relativi a blocchetti prelevati in cave a diverse quote della formazione, si osserva che nell'insieme a quote più alte corrispondono valori della resistenza a compressione maggiori. Anche se l'andamento non è del tutto lineare, i valori medi più bassi sono relativi a campioni prelevati verso la base della formazione. Le analisi ottiche e diffrattometriche non hanno comunque rilevato differenze composizionali significative tra il TGVT delle cave di alta rispetto a quello di bassa quota (Lombardi e Meucci, 2006).

Per controllare gli effetti delle variazioni di temperatura sulla resistenza meccanica del tufo, i provini sono stati sottoposti a 10 cicli di gelo e disgelo così impostati: 12 ore a -30°C e 6 ore a 50°C . Rispetto ai valori di rottura medi misurati allo stato naturale, nei provini sottoposti a cicli di gelo e disgelo si riscontra un decadimento dei valori di rottura molto modesto, al massimo del 6%, il che pone il TGVT nella categoria dei materiali non gelivi.

TABELLA VII. – Resistenza alla compressione uniassiale misurata su provini cilindrici allungati ed espressa in MPa.

	Stato del provino	Numero provini	Media	Range	Deviazione standard
Media	naturale	100	7,41	3,39-12,31	1,79
	dopo gelività	100	7,15	4,15-12,06	1,66
	<i>saturo</i>	100	4,35	2,13-7,35	1,16
Lodolina 85 m	naturale	20	9,43	6,59-12,31	1,83
	dopo gelività	20	9,19	7,04 -12,06	1,36
	<i>saturo</i>	20	5,31	3,62-7,35	1,09
Favari 76 m	naturale	20	7,46	5,39-9,07	0,83
	dopo gelività	20	7,38	6,14-8,63	0,79
	<i>saturo</i>	20	4,12	2,69-5,62	0,74
Cannetaccio 74 m	naturale	20	8,06	6,53-9,98	0,97
	dopo gelività	20	7,56	5,51-10,07	0,34
	<i>saturo</i>	20	5,19	2,80-7,35	1,04
Pozzuolo 65 m	naturale	20	6,31	3,39-8,81	1,43
	dopo gelività	20	5,93	4,15-7,90	1,13
	<i>saturo</i>	20	3,89	2,49-6,20	0,87
Mandrioni 55 m	naturale	20	5,80	4,05-7,65	0,97
	dopo gelività	20	5,70	4,78-7,17	0,55
	<i>saturo</i>	20	3,22	3,22 -3,86	0,39

La normativa (UNI EN 12371, 2003), infatti, prevede che siano classificati gelivi quei materiali che, dopo i cicli di gelo-disgelo, presentino un decadimento della resistenza alla compressione uniassiale superiore al 20%. La distribuzione dei valori segue una curva gaussiana leggermente asimmetrica (fig. 6) con valore medio pari a 7,15 MPa. La quasi totalità dei valori di rottura rientra nell’intervallo 5-10 MPa; solo il 7% è inferiore a 5 MPa e il 5% supera i 9 MPa.

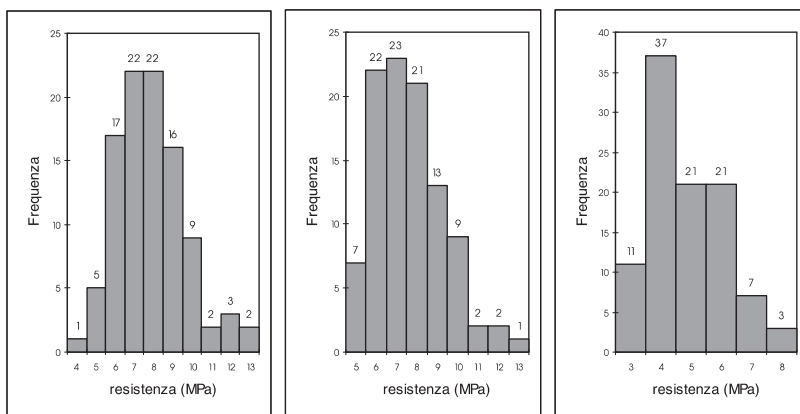


Fig. 6. – Istogramma della distribuzione dei valori della resistenza a compressione misurata su provini cilindrici allungati, allo stato naturale (a sinistra), dopo gelività (al centro), saturi d’acqua (a destra).

Ben più marcata è la modifica delle caratteristiche di resistenza a compressione indotta dalla saturazione in acqua, raggiunta, come prevedono le norme ASTM, quando l'assorbimento di acqua nelle 24 h è inferiore all'1% della misura precedente (tab. VII). Il valore medio si riduce da 7,41 a 4,35 MPa con un decadimento delle caratteristiche meccaniche molto accentuato, pari ad oltre il 40% e la distribuzione dei valori diventa asimmetrica (fig. 6) con massimo compreso nell'intervallo di 3-6 MPa.

La riduzione della resistenza a compressione dei provini saturati in acqua si spiega con il fatto che le misure sono effettuate in condizioni non drenate, dato che le velocità di deformazione sono relativamente alte. Le condizioni sono non drenate perché le prove in oggetto sono state eseguite su provini non confinati, con velocità di deformazione assiale tali da non permettere il drenaggio dell'acqua contenuta nelle porosità capillari e nei pori saturi comunicanti con capillari. Le sovrappressioni accumulate nei pori saturi durante la fase di carico del provino si scaricano fratturando i sottili setti di materiale vetroso dei pori o allargando le microfessure presenti nella roccia, abbassando di conseguenza i valori della resistenza del materiale.

Dai valori della resistenza a compressione è stato ottenuto il modulo elastico tangente, calcolato nell'intervallo infinitesimo a cavallo del 50% della resistenza ultima, come rapporto dei valori di carico e di deformazione $\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_1$, secondo le procedure prescritte dall'ASTM D 3148-86 (1991). I risultati (tab. VIII) sono tipici di un

TABELLA VIII. – Modulo elastico tangente ricavato dai valori della resistenza a compressione uniaassiale ed espresso in GPa.

	Stato del provino	Numero provini	Media	Range	Deviazione standard
Media	naturale	100	3,60	1,31-6,18	0,86
	dopo gelività	100	3,22	1,83-4,74	0,56
	<i>saturo</i>	100	2,56	1,33-4,03	0,52
Lodolina 85 m	naturale	20	4,75	3,89-6,18	0,64
	dopo gelività	20	3,12	2,64-3,64	0,39
	<i>saturo</i>	20	2,36	1,40-3,00	0,49
Favari 76 m	naturale	20	3,74	2,73-5,49	0,62
	dopo gelività	20	3,30	2,68-3,91	0,37
	<i>saturo</i>	20	2,71	1,96-4,03	0,53
Cannetaccio 74 m	naturale	20	3,64	2,98-4,62	0,37
	dopo gelività	20	3,34	2,37-4,48	0,46
	<i>saturo</i>	20	3,16	2,39-3,93	0,34
Pozzuolo 65 m	naturale	20	3,26	2,33-4,13	0,48
	dopo gelività	20	2,93	1,83-4,33	0,51
	<i>saturo</i>	20	2,43	1,35-3,39	0,53
Mandrioni 55 m	naturale	20	2,69	1,31-3,75	0,66
	dopo gelività	20	2,72	2,30-3,20	0,31
	<i>saturo</i>	20	2,18	1,53-2,70	0,29

materiale con buone caratteristiche meccaniche, con chiaro andamento regolare verso valori minori del modulo nella parte bassa della serie del TGVT.

I dati relativi al modulo elastico dinamico riportati nella tab. V hanno valori compatibili con il modulo elastico tangente ottenuto da prove statiche distruttive quali la resistenza a compressione uniassiale (tab. VII). La discordanza di valori (tra statici e dinamici) è dovuta al fatto che per quanto riguarda i valori dei moduli statici sono stati riportati quelli corrispondenti al 50% del carico di rottura assiale. A carico prossimo allo zero moduli dinamici e statici hanno una quasi completa corrispondenza.

Resistenza a flessione.

Le misure sono state eseguite secondo le procedure prescritte dall'ASTM C880-89 (1991), su provini parallelepipedi con materiale sia asciutto (50 provini) sia saturo d'acqua (30 provini).

I risultati (tab. IX) evidenziano una risposta del TGVT a questo tipo di sollecitazione molto variabile, con un valore medio per provini asciutti di 1,90 MPa, ma un range tra 0,68 e 3,48 MPa ed un istogramma della distribuzione dei risultati con più massimi (fig. 7). Si ha anche qui una tendenza ad avere valori più bassi nei blocchetti delle quote inferiori della serie, ma gli andamenti sono irregolari.

I valori medi della resistenza a flessione risultano essere pari a circa $\frac{1}{4}$ della resistenza a compressione, malgrado che le prove siano state effettuate su parallelepipedi di piccole dimensioni. Il TGVT per la sua struttura interna si deforma in modo elastico e questo aumenta la resistenza alla flessione rispetto ad altre rocce che hanno rapporti resistenza alla compressione/resistenza alla flessione minori a causa delle loro struttura rigida.

TABELLA IX. – *Resistenza a flessione misurata su provini parallelepipedi ed espressa in MPa.*

	Stato del provino	Numero provini	Media	Range	Deviazione standard
Media	naturale	50	1,90	0,68-3,48	0,59
	<i>saturo</i>	30	<i>0,64</i>	<i>0,16-1,46</i>	<i>0,36</i>
Lodolina 85 m	naturale	10	2,31	1,47-3,48	0,63
	<i>saturo</i>	6	<i>0,33</i>	<i>0,16-0,61</i>	<i>0,15</i>
Favari 76 m	naturale	10	2,43	1,63-3,45	0,51
	<i>saturo</i>	6	<i>0,64</i>	<i>0,44-1,05</i>	<i>0,24</i>
Cannetaccio 74 m	naturale	10	1,66	1,14-2,24	0,18
	<i>saturo</i>	6	<i>1,14</i>	<i>0,78-1,46</i>	<i>0,17</i>
Pozzuolo 65 m	naturale	10	1,41	0,68-2,17	0,40
	<i>saturo</i>	6	<i>0,33</i>	<i>0,24-0,51</i>	<i>0,09</i>
Mandrioni 55 m	naturale	10	1,68	1,40-2,09	0,22
	<i>saturo</i>	6	<i>0,72</i>	<i>0,62-0,90</i>	<i>0,10</i>

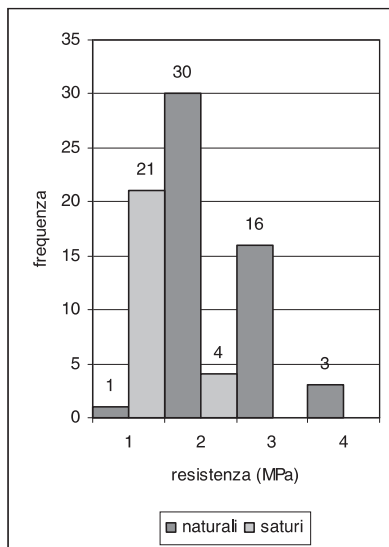


Fig. 7. – Istogramma della distribuzione dei valori della resistenza a flessione misurata su 15 provini per ciascuna delle 5 cave su campioni allo stato naturale e saturi d'acqua.

Nelle prove effettuate sul TGVT saturo in acqua il comportamento è stato analogo a quello riscontrato nelle prove di resistenza alla compressione, con una marcata diminuzione del valore medio (0,64 MPa contro 1,90 MPa per i provini asciutti) e la conferma della sensibilità del materiale alle condizioni ambientali.

Resistenza a trazione.

La resistenza a trazione è stata determinata, su provini cilindrici tozzi allo stato naturale, saturati in acqua e sottoposti a cicli di gelività, in modo indiretto (metodo Brasiliano) secondo le procedure prescritte dall'ASTM D3967-86 (1991) e le raccomandazioni ISRM (1978*b*). La media dei valori ottenuti sui provini asciutti (tab. X) è di 1,04 MPa, con un campo di variazione molto ampio (0,31-1,62 MPa). La distribuzione dei valori (fig. 8) mostra comunque che solo il 6% dei risultati non è compreso tra 0,6 a 1,5 MPa.

L'impatto dei cicli di gelività ha portato ad un valore medio della resistenza a flessione di 0,81 MPa, con un'incidenza ben maggiore che nelle prove di carico uniassiale. Ciò è probabilmente dovuto ad un fattore geometrico e dimensionale dato che per queste prove di trazione sono stati utilizzati cilindri di volume minore che nel caso delle prove uniassiali. Nel minore volume i primi cicli di gelività portano rapidamente alla saturazione del campione e quindi nei cicli successivi si ha sviluppo di microfratture ed indebolimento della struttura.

TABELLA X. – Resistenza a trazione misurata su provini cilindrici tozzi ed espressa in MPa.

	Stato del provino	Numero provini	Media	Range	Deviazione standard
Media	naturale	150	1,04	0,31-1,62	0,23
	dopo gelività	100	0,81	0,12-1,29	0,26
	saturo	100	0,55	0,20-1,00	0,16
Lodolina 85 m	naturale	30	1,13	0,83-1,35	0,22
	dopo gelività	20	0,94	0,66-1,41	0,25
	saturo	20	0,50	0,31-0,72	0,10
Favari 76 m	naturale	30	1,10	0,31-1,51	0,30
	dopo gelività	20	0,59	0,32-1,06	0,16
	saturo	20	0,71	0,56-0,93	0,11
Cannetaccio 74 m	naturale	30	1,03	0,52-1,41	0,20
	dopo gelività	20	1,07	0,74-1,38	0,17
	saturo	20	0,52	0,36-0,82	0,14
Pozzuolo 65 m	naturale	30	0,95	0,51-1,41	0,21
	dopo gelività	20	0,69	0,42-1,08	0,21
	saturo	20	0,55	0,40-0,74	0,10
Mandrioni 55 m	naturale	30	0,91	0,41-1,26	0,21
	dopo gelività	20	0,43	0,20-0,65	0,13
	saturo	20	0,80	0,45-1,18	0,17

Così come nelle prove di resistenza alla compressione uniassiale ed a flessione, anche qui nei provini saturi d'acqua si ha una rilevante riduzione dei valori (valore medio 0,55 rispetto a 1,04 MPa). Poco evidente è invece la diminuzione dei valori di resistenza a trazione procedendo verso le quote più basse della formazione.

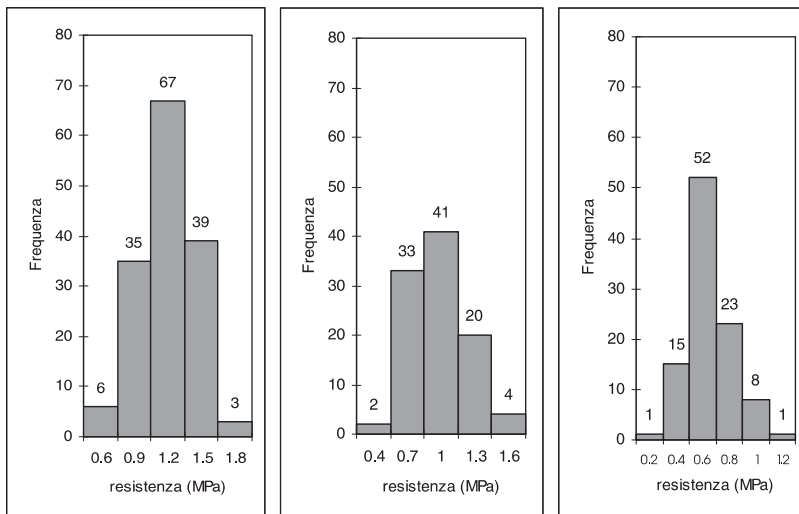


Fig. 8. – Istogramma della distribuzione dei valori della resistenza a trazione misurata su provini cilindrici tozzi, allo stato naturale (a sinistra), dopo gelività (al centro), saturi d'acqua (a destra).

Altre caratteristiche fisiche.

In tab. XI sono riportati alcuni parametri tecnologici del TGVT ottenuti da misure effettuate da un laboratorio per conto del Consorzio Cave Riunite di Riano⁽¹⁾. Anche se non è citato il numero di campioni analizzati e quindi non è possibile valutare la significatività dei dati, i valori dei parametri evidenziano le note, buone qualità generali del TGVT dal punto di vista dell'isolamento termico ed acustico.

TABELLA XI. – *Caratteristiche fisiche misurate sul TGVT* (da <http://www.caveriunite.com>).

Conducibilità termica	0,55 w/m °K	Coefficiente di abrasione (per un percorso di 1000 m)	38,8 mm
Calore specifico	0,29 wh/kg °K	Resistenza al fuoco (spessori di 15 cm)	REI 180
Capacità termica unitaria	433 wh/m ² °K	Potere fonoassorbente a 500 Hz	55dB/27 cm

CONCLUSIONI

Il TGVT fu utilizzato fin da epoche remote sia dagli Etruschi nei territori di loro pertinenza sia dai Romani che lo impiegarono nelle strutture di numerosi monumenti a partire dalla fine del III sec. a.C. Caduto l'Impero, per molti secoli l'uso del TGVT fu limitato, a parte che nelle aree prossime alle cave; solo nella metà del secolo scorso l'estrazione è ripresa a gran ritmo costituendo attualmente una materia prima di marcato interesse economico.

Le analisi oggetto del presente lavoro sono state eseguite su un numero rilevante di campioni provenienti da una vasta area e da diversi livelli della formazione. Non sorprende quindi che i campi di variazione dei risultati siano ampi, con notevole escursione dei valori. Comunque, per la maggior parte delle prove, si osserva una distribuzione dei dati su una curva gaussiana con code modeste, testimonianza di una discreta omogeneità generale di caratteri fisico-meccanici del TGVT, così come riscontrata anche dal punto di vista mineralogico e chimico (Lombardi e Meucci, 2006). Questi caratteri nell'insieme costituiscono una testimonianza di un basso grado di alterazione ed una generale integrità del litotipo.

Sussistono differenze significative di alcuni insiemi di dati tra campioni prelevati su piazzali di cava posizionati a quote diverse della formazione, con una generale tendenza verso valori più bassi dei diversi parametri di resistenza meccanica procedendo dalla parte superiore a quella inferiore della formazione. L'andamento di questa tendenza non è sempre regolare, ma è da tenere presente che, anche se sui fronti di estrazione la giacitura del TGVT appare in genere prossima all'orizzontale, le cave sono distribuite su un'area di circa 10 km² ed è quindi normale che nel complesso processo di messa in posto del TGVT si siano

⁽¹⁾ <http://www.caveriunite.com>

sviluppate differenze nelle dimensioni e caratteri delle pomici, nella ricchezza in inclusi lavici e sedimentari, nel grado di compattazione del tufo che influenzano i risultati delle analisi.

È inoltre da tenere presente che le caratteristiche geomeccaniche di un tufo dipendono da una molteplicità di fattori quali grado di cementazione, natura del legante, zeolitico o calcitico, porosità, forma e distribuzione dimensionale dei macro- e dei micropori, grado e tipo di alterazione; è quindi problematico correlare le caratteristiche fisiche con il comportamento meccanico di questi materiali.

L'elevata porosità del TGVT, dovuta sia a pori aperti sia, in prevalenza, ai pori chiusi delle pomici e micropomici costituenti essenziali della roccia, influenza in modo diverso la variazione delle caratteristiche meccaniche in condizioni di gelività e di saturazione d'acqua. Il comportamento dei provini assoggettati a cicli di gelo e disgelo ha mostrato un modesto decadimento dei valori della resistenza meccanica (a compressione da un valore medio di 7,41 a 7,15 MPa; a trazione da 1,04 a 0,81 MPa). Nei provini saturi d'acqua la variazione della resistenza è stata molto maggiore (a compressione da 7,41 a 4,35 MPa; a flessione da 1,90 a 0,64 MPa; a trazione da 1,04 a 0,55 MPa). Questo comportamento è legato alla struttura del TGVT costituito da un aggregato di pomici e micropomici responsabili dell'elevata porosità (media su 4 cave del 48,1%) e capacità di saturazione (media su 4 cave 25,3%) del TGVT. L'applicazione di una pressione durante le prove di resistenza porta alla rottura dei setti delle microcavità delle pomici ed a conseguente decadimento della resistenza del tufo.

Nell'insieme, il TGVT allo stato naturale ha una bassa densità, un'elevata porosità e buone caratteristiche meccaniche che, unitamente a bassa conducibilità termica e forte potere fonoassorbente, lo rendono molto valido come pietra da costruzione. Nei campioni saturi d'acqua si è costantemente osservato un marcato decadimento delle qualità meccaniche del TGVT, con variazioni anche superiori al 40%. Va dato atto che questo comportamento, qui quantificato con le moderne tecniche di analisi, era stato osservato già dagli antichi Romani, che consigliavano un invecchiamento e quindi essiccamento del tufo prima della messa in opera. Vitruvio nel Libro secondo del *De Architectura* (Gros, 1997) a proposito dei blocchi di tufo scrive: «*Cum aedificandum fuerit, ante biennium ea saxa non hieme, sed aestate eximantur, et iacentia permaneant in locis potentibus. Quae autem eo biennio a tempestatibus tacta laesa fuerint, ea in fundamenta coiciantur*» [Dovendo costruire, siano estratte quelle pietre (i tufi) non d'inverno ma d'estate prima dell'ultimo biennio, e le pietre accumulate rimangano in luoghi all'aperto, e quelle che durante tale biennio colpite dalle intemperie siano danneggiate, siano gettate nelle fondamenta].

Un riferimento dovuto ad un vero ingegnere della Roma antica, primo conoscitore approfondito delle qualità di quei tufi che, in massima parte coperti da intonaci e rivestimenti, sono in realtà l'umile, silenziosa struttura portante di tantissime costruzioni e monumenti della Roma antica e moderna.

RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato eseguito con un contributo (G. Lombardi) di L. 1.500.000 del MIUR 60%. Gli Autori ringraziano l'Italtufo per l'accesso alle cave.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM DESIGNATION C880-89, 1991. *Standard test method for flexural strength of dimensional stone*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 58-59.
- ASTM DESIGNATION D854-83, 1991. *Standard test method for specific gravity of soils*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 170-172.
- ASTM DESIGNATION D2845-90, 1991. *Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 345-349.
- ASTM DESIGNATION D2938-86, 1991. *Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 375-376.
- ASTM DESIGNATION D3148-86, 1991. *Standard test method for elastic moduli of intact rock core specimen in uniaxial compression*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 411-414.
- ASTM DESIGNATION D3967-86, 1991. *Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 534-536.
- ASTM DESIGNATION D4404-84, 1991. *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 673-677.
- ASTM DESIGNATION D4543-85, 1991. *Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances*. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, vol. 04.08: 766-769.
- BERTINI M., D'AMICO C., DERIU M., TAGLIAVINI S., VERNIA L., 1971. *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 143 Bracciano*. Serv. Geol. d'It., 69 pp.
- BIANCHETTI P.L., LOMBARDI G., MARINI S., MEUCCI C., 1994. *The volcanic rocks of the Monuments of the Forum and Palatine (Rome): characterization, alterations and results of chemical treatments*. In: A.E. CHAROLA, R.J. KOESTLER, G. LOMBARDI (eds.), *Proc. Int. Meet. Lavas and Volcanic tuffs* (Easter Island, Chile, 25-31 oct. 1990). ICCROM: 83-105.
- CAMPONESCHI B., DE CASA G., GIGLIO G., VOLPONI E., 1982. *Studio geologico-tecnico delle Tavole Ardea e Torre San Lorenzo. Foglio 158 della Carta d'Italia - IV NO - IV SO*. Rassegna dei Lavori Pubblici, 4: 151-180.
- CLERICI E., 1894a. *Notizie intorno ai tufi vulcanici della via Flaminia dalla valle del Vescovo a Prima Porta*. Rend. Reale Acc. Lincei, 3: 89-97.
- CLERICI E., 1894b. *Considerazioni sopra i tufi vulcanici a nord di Roma, tra il Fosso della Crescenza e quello della Torraccia*. Rend. Reale Acc. Lincei, 3: 343-351.
- DE CASA G., GIGLIO G., LOMBARDI G., MARIOTTINI M., 1994. *Characterization and state of decay of the volcanic tuff of the Tabularium in the Roman Forum, Italy*. In: A.E. CHAROLA, R.J. KOESTLER, G. LOMBARDI (eds.), *Proc. Int. Meet. Lavas and Volcanic tuffs* (Easter Island, Chile, 25-31 oct. 1990). ICCROM: 107-128.
- DE CASA G., LOMBARDI G., MEUCCI C., GALLONI R., VITALI P., 1999. *Il Tufo Lionato dei monumenti romani: caratteri petrografici, geomeccanici e trattamenti conservativi*. Geologica Romana, 35: 1-25.
- DE RITA D., DI FILIPPO M., FUNICIELLO R., PAROTTO M., SPOSATO A., 1993. *Carta geologica del Complesso Vulcanico Sabatino*. In: M. DI FILIPPO (ed.), *Sabatini Volcanic Complex*. CNR, Quaderni de La Ricerca Scientifica, 114, 110 pp.
- DOC NORMAL 7/81, 1981. *Assorbimento d'acqua per immersione totale e capacità di imbibizione*. CNR - ICR, Roma, 5 pp.
- DOC NORMAL 11/82, 1982. *Assorbimento d'acqua per capillarità. Coefficiente di assorbimento capillare*. CNR - ICR, Roma, 6 pp.
- GROS P. (a cura di), 1997. *Vitruvio De Architectura*. Libro I, Einaudi ed., 796 pp.
- ISRM, 1978a. *Suggested Methods for Determining Sound Velocity*. Int. J. of Rock Mechanics, 15 (2): 53-58.
- ISRM, 1978b. *Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials*. Int. J. of Rock Mechanics, 15 (3): 99-103.
- ISRM, 1979a. *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties*. Int. J. of Rock Mechanics, 16(2): 141-156.
- ISRM, 1979b. *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. Int. J. of Rock Mechanics, 16 (2): 135-140.

- JACKSON M.D., MARRA F., HAY R.L., CAWOOD C., WINKLER E.M., 2005. *The judicious selection and preservation of tuff and travertine building stone in ancient Rome*. *Archaeometry*, 47 (3): 485-510.
- LIPPARINI T., SCHERILLO A., FORNASERI M., TILIA A., 1967. *Carta Geologica d'Italia (II edizione) alla scala 1:100.000 Foglio 150 Roma*. Serv. Geol. d'It.
- LOMBARDI G., MEUCCI C., COCCO P., 1997. *The tuffs of the XIII Altars of Lavinium (Rome, Italy): Conservation treatments*. In: A. MOROPOULOU, F. ZEZZA, E. KOLLIAS., I. PAPACHRISTODOULOU (eds.), *Proc. IVth Int. Symp. on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin* (Rhodes, 6-11 May 1997): 167-176.
- LOMBARDI G., MEUCCI C., 2006. *Il Tufo Giallo della Via Tiberina (Roma) utilizzato nei Monumenti Romani*. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, s. 9, v. 17: 263-287.
- MATTIAS P.P., VENTRIGLIA U., 1970. *La regione vulcanica dei monti Sabatini e Cimini*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 9: 331-384.
- NAPPI G., DE CASA G., VOLPONI E., 1979. *Geologia e caratteristiche tecniche del «Tufo Giallo della Via Tiberina»*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 98: 431-445.
- PENTA F., 1956. *I materiali da costruzione del Lazio*. *La Ric. Scientifica*, 26, Suppl., 202 pp.
- UNI EN 12371, 2003. *Metodi di prova per pietre naturali. Determinazione della resistenza al gelo*. 14 pp.
- VENTRIGLIA U., 2002. *Geologia del territorio del Comune di Roma*. *Ammin. Prov. di Roma*, 810 pp.

Pervenuta il 16 maggio 2006,
in forma definitiva il 31 gennaio 2007.

G. De Casa:
Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade
Università degli Studi di Roma «La Sapienza»
Via Eudossiana, 18 - 00184 ROMA
giancarlo.decasa@uniroma1.it

G. Lombardi:
Dipartimento di Scienze della Terra
Università degli Studi di Roma «La Sapienza»
Piazzale A. Moro, 5 - 00185 ROMA
gianni.lombardi@uniroma1.it