

# Il tufo giallo napoletano: permeabilità ed impregnabilità con monomeri acrilici

S. AURISICCHIO \*, A. EVANGELISTA \*\*, P. MASI \*\*\*

**SOMMARIO:** La formazione del tufo giallo presente nella città di Napoli è spesso interessata da dissesti sia all'interno delle numerose cavità presenti, sia sui fronti di scavo e pendii all'aperto.

È apparso di grande interesse prendere in esame la possibilità di trattare il tufo mediante impregnazione profonda con monomeri acrilici in sostituzione dei normali interventi di consolidamento.

A tal fine è stato condotto uno studio preliminare, che forma oggetto della presente nota, sulla permeabilità del tufo a liquidi con differenti valori della viscosità.

Nel presente lavoro vengono esposti e commentati i risultati di prove di permeabilità longitudinale, radiale e di iniezione condotte in laboratorio.

## 1. Premessa

Molte tra le opere che servono la città di Napoli sono state realizzate fin dall'antichità scavando la formazione tufacea che ne costituisce in gran parte il basamento. Le piscine dell'insediamento greco di Pizzofalcone, le gallerie dell'asse viario tra la città ed i porti di Pozzuoli e Cuma, i più recenti tunnels per il traffico automobilistico e ferroviario, la rete idrica di collegamento tra i vari serbatoi dell'acquedotto urbano e tutti i serbatoi dello stesso acquedotto, sono opere sotterranee realizzate in gran parte nel tufo.

Sono presenti inoltre nella formazione tufacea numerose cavità in gran parte abbandonate ed oblite: vecchie cave per l'estrazione del materiale, canali e pozzi del vecchio acquedotto.

Le proprietà fisico-meccaniche della roccia hanno formato oggetto di numerosi studi [PELLEGRINO, 1967, 1968, 1970, 1974; EVANGELISTA *et al.*, 1980; PAPARO, PELLEGRINO, 1980; EVANGELISTA, 1980].

I problemi geotecnici connessi con la presenza delle cavità sono stati anche essi analizzati [EVANGELISTA *et al.*, 1980].

\* Prof. Dott. SANDRO AURISICCHIO, Dir. Ric. C.N.R. - Istituto di Cibernetica, Arco Felice, Napoli.

\*\* Prof. Ing. ALDO EVANGELISTA, Associato di Opere di Sostegno e Costruzioni in Terra - Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

\*\*\* Ing. PAOLO MASI, Borsista Ass. Chimici - Istituto di Principi di Ingegneria Chimica, Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

Lavoro effettuato con il contributo del C.N.R. (CT 80.02665.07, responsabile scientifico prof. ing. Aldo Evangelista).

Molto spesso il tufo è interessato da dissesti sia all'interno delle opere sotterranee sia su pendii e fronti all'aperto; a questi si dà riparo attraverso la realizzazione di sostegni e pilastri, il rinforzo dei rivestimenti delle gallerie, la cucitura della roccia con micropali. Detti interventi sono spesso insoddisfacenti e di elevato costo. È apparso allora di grande interesse prendere in esame la possibilità di consolidare il tufo mediante impregnazione profonda di polimeri.

In precedenti contributi [AURISICCHIO *et al.*, 1981, 1982] è stata esposta dagli scriventi una tecnica di impregnazione del tufo con miscele di monometilmetacrilato, (MMA) che, polimerizzando a basse temperature, dà origine ad un materiale composito dalle nuove e migliori proprietà meccaniche.

Alla base di tale processo è l'immissione della fase liquida reattiva all'interno del reticolo di capillari della matrice della roccia. Poiché la viscosità del liquido di impregnazione è funzione crescente del tempo, durante il fenomeno di reticolazione, diviene prioritario lo studio della dipendenza della permeabilità del tufo dalla viscosità del liquido iniettato.

Nel tufo le fratture sono infrequenti e comunque tali da non condizionare il moto del fluido. In ogni caso, poiché si vuole ottenere con l'impregnazione un miglioramento delle caratteristiche meccaniche della roccia integra, è stata indagata la permeabilità della roccia non interessata da fratture.

Vengono esposti e discussi, in questo lavoro, i risultati di alcune misure di permeabilità del tufo giallo napoletano effettuate presso il laboratorio di Geotecnica di Napoli.

## 2. Materiali e metodi

È stata studiata la permeabilità del tufo a liquidi differenti e precisamente: acqua, acetone, monometilmetracrilato (MMA), alcool etilico, olio minerale, olio di paraffina, dimetilpolisilossano (DMPS); si tratta di liquidi di differente viscosità e polarità molecolare.

Il tufo sottoposto a prova proviene dalla cava San Rocco di Capodimonte nella città di Napoli, esso presenta in media le seguenti caratteristiche fisico-meccaniche:

$$\gamma_d = 1,11 \text{ ton m}^{-3}; \quad n = 0,58; \quad \sigma_c = 440 \text{ ton m}^{-2}$$

Sono state eseguite prove di permeabilità longitudinale e radiale e prove di iniezione.

Le prove di permeabilità longitudinale sono state eseguite, solo con l'acqua, su provini cilindrici di tufo (diametro  $d = 8$  cm, altezza  $h = 12,5$  cm) montati in permeametri cilindrici ( $d = 10$  cm) nei quali il campione è stato bloccato mediante un anello di resina epossidica; l'intercapedine è stata riempita con paraffina fusa (v. fig. 1).

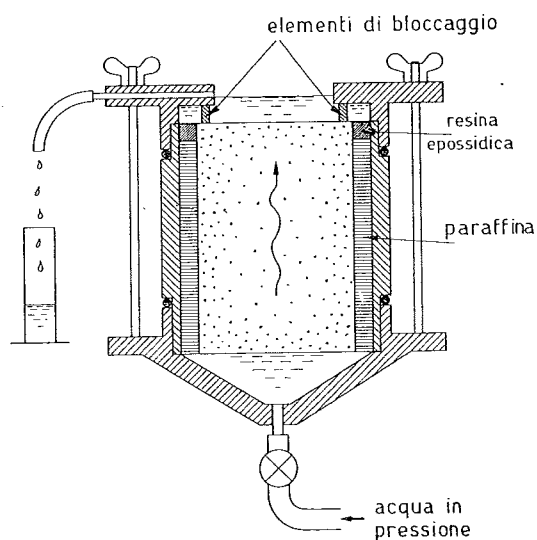


Fig. 1. - Permeametro impiegato nelle prove di permeabilità longitudinale

Per ottenere campioni con elevato grado di saturazione, questi, dopo l'inserimento nel permeametro, sono stati privati dell'aria contenuta nei capillari ed immersi in acqua per 24 ore. Nelle prove il campione è sottoposto ad un flusso d'acqua mantenuta a pressione costante mediante il sistema di fig. 2.

Le pressioni adottate variano fra 0,25 e 3  $\text{kg cm}^{-2}$ , con una cadente idraulica nel campione compresa tra 20 e 260.

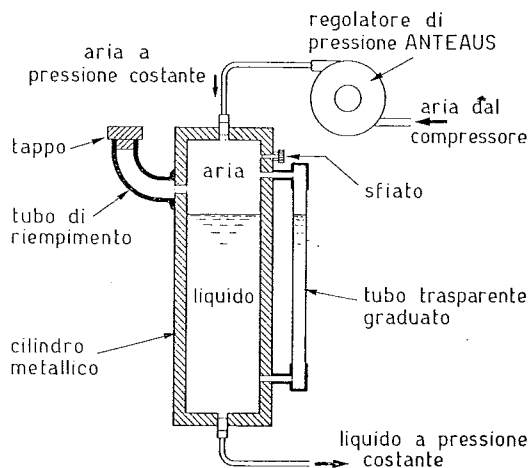


Fig. 2. - Serbatoio del liquido in pressione impiegato in tutti e tre tipi di prova

Le prove di permeabilità radiale sono state condotte, impiegando differenti liquidi, su campioni cilindrici (diametro  $d = 20$  cm, altezza  $h = 10$  cm, con un foro centrale di diametro  $d_0 = 1,5$  cm) sigillati con resina epossidica tra due piastre metalliche una delle quali, in corrispondenza del foro del campione, è connessa al serbatoio graduato del liquido da immettere sotto pressione.

L'intero campione è tenuto in un bagno del liquido di prova (v. fig. 3).

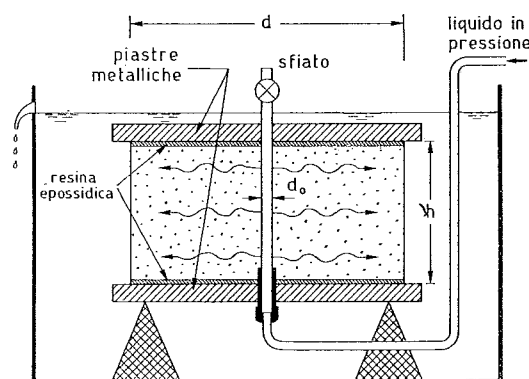


Fig. 3. - Schema della prova di permeabilità radiale

Le prove di iniezione sono state condotte su blocchi di tufo asciutto aventi grado di saturazione  $S_r$  compreso fra 8 e 10%.

Il liquido contenuto nel serbatoio in pressione di fig. 2 è stato iniettato mediante un apposito sistema a tenuta collegato al campione (v. fig. 4).

Sono stati misurati i tempi necessari per l'iniezione di volumi non superiori a 50  $\text{cm}^3$  sotto pressioni differenti. Il volume interessato è sempre stato tale da non interferire con le superfici esterne dei campioni.

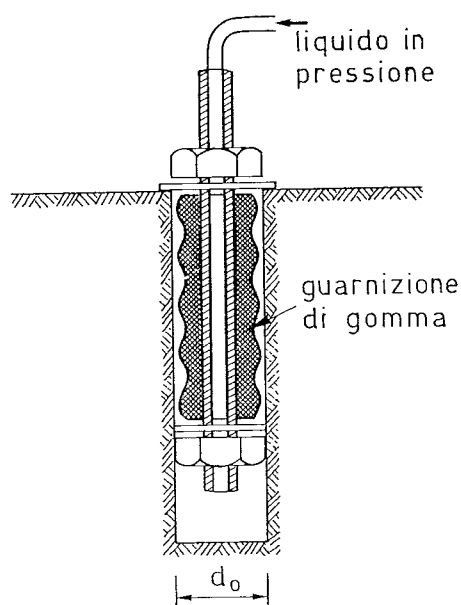


Fig. 4. - Iniettore a tenuta collegato al campione per la immissione del liquido in pressione

### 3. Risultati sperimentali

#### 3.1. Permeabilità longitudinale

Le prove di permeabilità longitudinale all'acqua hanno condotto alla determinazione di valori del coefficiente di permeabilità  $k$  compresi tra  $1,5 \cdot 10^{-5}$  e  $6,4 \cdot 10^{-5}$  cm. sec.<sup>-1</sup>. I risultati riportati in fig. 5, nell'approssimazione che qui ci interessa, mostrano che la permeabilità non è influenzata dalla pressione di immissione.

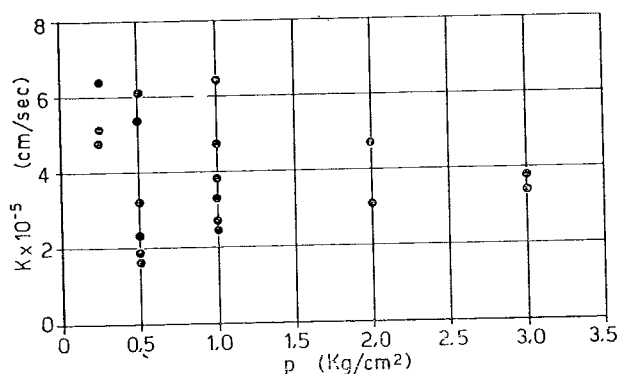


Fig. 5. - Risultati delle prove di permeabilità all'acqua effettuate nel permeametro di fig. 1; il coefficiente di permeabilità è diagrammato in funzione della pressione di immissione

L'indipendenza dei valori della permeabilità dalla pressione dimostra che, nell'ambito dei valori di prova, non si determinano rotture nelle pareti dei vacuoli non comunicanti con l'esterno, presenti nel tufo, con la conseguente creazione di nuove vie di efflusso del liquido permeante.

#### 3.2. Permeabilità radiale

Nelle prove di permeabilità radiale sono stati impiegati liquidi di diversa viscosità. La permeabilità è stata determinata attraverso l'espressione

$$Q = \frac{2 \pi H h k}{1 n (d/d_0)}$$

che lega la portata  $Q$  allo spessore  $h$  del campione, al suo diametro  $d$  ed al diametro  $d_0$  del foro centrale, alla pressione di immissione  $H$  espressa in colonna d'acqua, al coefficiente di permeabilità  $k$  del materiale.

I risultati sperimentali sono sintetizzati in tab. 1 dove sono riportati i liquidi utilizzati ed il relativo rapporto fra peso specifico e viscosità, le pressioni di immissione, i valori del coefficiente di permeabilità.

TABELLA 1

RISULTATI DELLE PROVE DI PERMEABILITÀ RADIALE

Liquido	$\gamma/\mu$ (cm <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup> )	Pressione di immissione (kg cm <sup>-2</sup> )	Coefficiente di permeabilità $k$ (cm sec <sup>-1</sup> )
Acetone	$3,1 \cdot 10^5$	0,25	$1,2 \cdot 10^{-4}$
		0,50	$1,4 \cdot 10^{-4}$
		1,00	$1,0 \cdot 10^{-4}$
MMA	$2,0 \cdot 10^5$	0,25	$1,5 \cdot 10^{-4}$
		0,50	$7,0 \cdot 10^{-5}$
		1,00	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Acqua	$1,0 \cdot 10^5$	0,5	$1,4 \cdot 10^{-5}$
		1,0	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Alcool etilico	$6,4 \cdot 10^4$	0,25	$3,9 \cdot 10^{-5}$
		0,50	$3,0 \cdot 10^{-5}$
		1,00	$3,2 \cdot 10^{-5}$
Olio minerale	$5,8 \cdot 10^2$	1,00	$2,9 \cdot 10^{-7}$

$\gamma$  = peso specifico;  $\mu$  = coefficiente di viscosità

#### 3.3. Iniezione

La prova viene interpretata adottando ipotesi semplificative che consistono nel:

- assimilare il problema ad un fenomeno avente simmetria sferica (v. fig. 6);
- ritenere che il liquido saturi completamente i canalicoli intercomunicanti del tufo nel quale viene iniettato;
- trascurare l'effetto delle tensioni capillari.

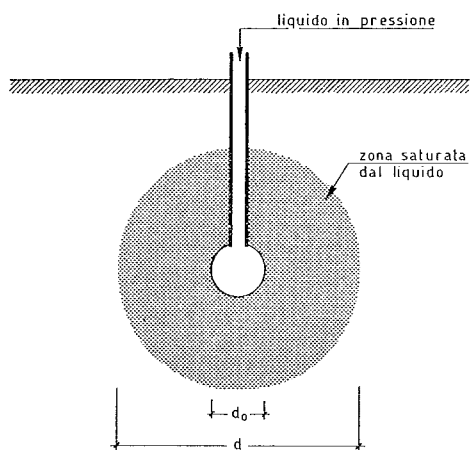


Fig. 6. - Prova di iniezione: zona di diffusione del liquido assunta nella interpretazione teorica del fenomeno.

A queste condizioni la relazione che lega il tempo  $t$  di iniezione al diametro  $d$  della sfera saturata dal liquido è:

$$t = \frac{n}{4 H d_0 k} \left[ \frac{d^3}{3} - \frac{d^2 d_0}{2} + \frac{d_0^3}{6} \right];$$

il volume  $V$  iniettato è espresso dalla relazione:

$$V = \frac{\pi n}{6} (d^3 - d_0^3)$$

dove  $d_0$  è il diametro del foro di iniezione,  $k$  il coefficiente di permeabilità,  $H$  la pressione di iniezione espressa in colonna d'acqua,  $n$  la porosità efficace ai fini della filtrazione. Quest'ultima è funzione della rete di pori che vengono attraversati dal liquido in movimento e, nel nostro caso, essa può essere assunta pari al 30%; la porosità complessiva è invece più alta e raggiunge almeno il 50%.

Assegnando quindi alla porosità efficace un valore pari al 30%, prova per prova, è stata

determinata la permeabilità per la quale si ha il migliore accordo tra dati teorici e sperimentali. In fig. 7 sono riportati i risultati relativi alle prove di iniezione di DMPS.

In tutte le prove lo scarto tra valori teorici e valori sperimentali è compreso nei limiti degli errori e le curve teoriche si approssimano a una retta. I valori del coefficiente di permeabilità  $k$  sono riportati in tab. 2.

La limitata dipendenza di  $k$  dalla pressione di iniezione, almeno nell'ambito delle pressioni di prova, lascia pensare che l'influenza della capillarità sui fenomeni indagati sia scarsa.

TABELLA 2

RISULTATI DELLE PROVE DI INIEZIONE

Liquido	$\gamma/\mu$ ( $\text{cm}^{-1} \text{sec}^{-1}$ )	Pressione di immissione ( $\text{kg cm}^{-2}$ )	Coefficiente di permeabilità $k$ ( $\text{cm sec}^{-1}$ )
MMA	$2,0 \cdot 10^5$	1,00	$1,7 \cdot 10^{-4}$
		2,00	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Alcool etilico	$6,4 \cdot 10^4$	1,00	$6,3 \cdot 10^{-5}$
		2,00	$5,2 \cdot 10^{-5}$
DMPS	$5,0 \cdot 10^3$	1,00	$9,5 \cdot 10^{-6}$
		2,00	$1,0 \cdot 10^{-5}$
		3,00	$1,3 \cdot 10^{-5}$
		4,00	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Paraffina	$1,2 \cdot 10^3$	2,00	$1,5 \cdot 10^{-6}$

$\gamma$  = peso specifico;  $\mu$  = coefficiente di viscosità

### 3.4. Discussioni

I risultati ottenuti sono sintetizzati in fig. 8 dove sono stati riportati, in funzione del rapporto  $\gamma/\mu$ , i valori medi della permeabilità dedotti con le varie prove.

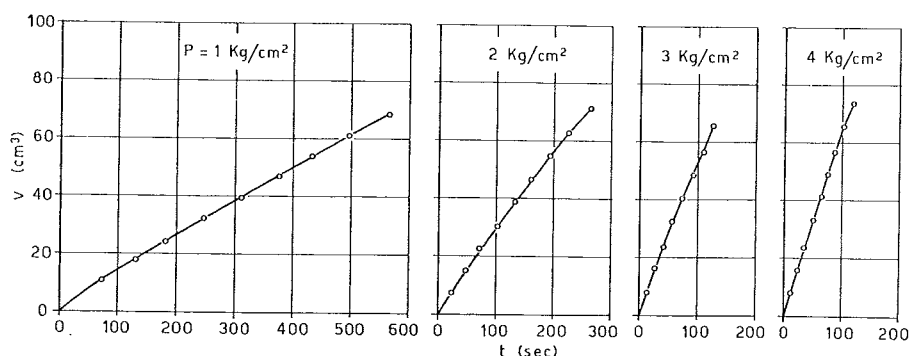


Fig. 7. - Risultati delle prove di iniezione;  $p$  è la pressione di iniezione,  $V$  il volume iniettato,  $t$  il tempo di iniezione. In figura sono riportati i risultati sperimentali e le curve teoriche interpolate relative al DMPS.

Si può affermare che:

a) esiste un buon accordo tra i valori di  $k$  determinati con i tre differenti tipi di prova;

b) la permeabilità non appare influenzata dalla polarità molecolare dei liquidi impiegati poiché i risultati relativi all'acqua ed all'alcool etilico sono coerenti con quelli relativi a liquidi non polari;

c) il coefficiente di permeabilità cresce all'aumentare del rapporto  $\gamma/\mu$  in accordo con la reazione di Kozeny-Carman secondo la quale  $k$  e  $\gamma/\mu$  sono linearmente correlati attraverso la relazione  $k = k_0 (\gamma/\mu)$  in cui il coefficiente  $k_0$  viene definito « permeabilità assoluta ».

Analizzando statisticamente i risultati esposti in fig. 8 è stato determinato il valore di  $k_0$  pari a  $1,1 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^2$ .

I dati sperimentali risultano però meglio interpolati da una funzione del tipo  $k = a (\gamma/\mu)^b$ . I valori di  $a$  e  $b$  che danno il minimo scarto risultano:  $a = 1,25 \cdot 10^{-8}$  e  $b = 0,706$ .

Sembra quindi che la permeabilità cresca meno che linearmente con il rapporto  $\gamma/\mu$ .

#### 4. Commenti

La permeabilità del tufo all'acqua può essere confrontata a quella dei terreni e delle rocce in genere.

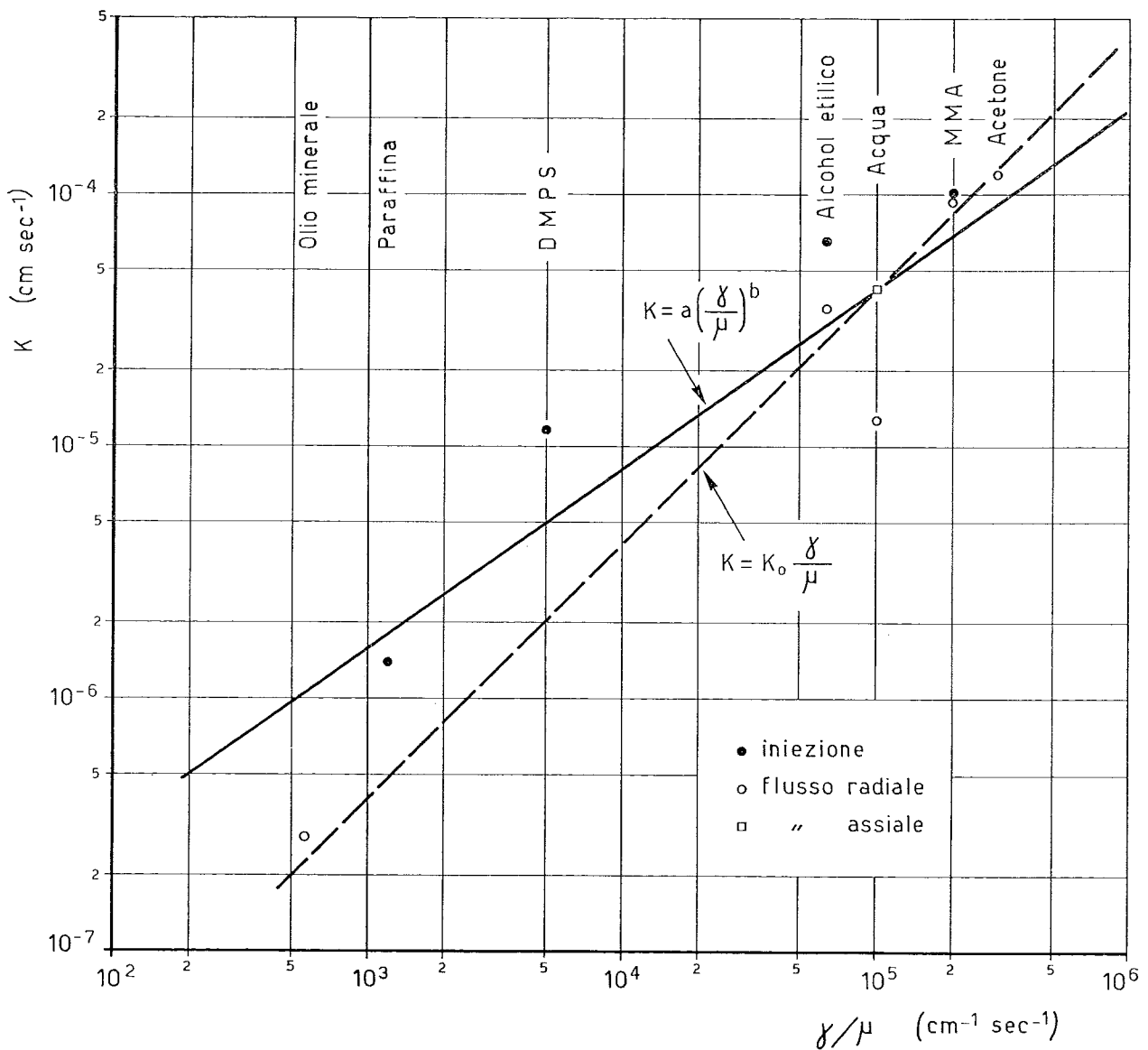


Fig. 8. - Permeabilità del tufo ai vari liquidi. In figura sono riportati i valori medi della permeabilità determinati con i tre tipi di prova in funzione del rapporto fra il peso specifico  $\gamma$  e la viscosità  $\mu$  del liquido. In figura sono ancora rappresentate la funzione di tipo lineare e non lineare che meglio correla  $k$  a  $\gamma/\mu$ .

Se si fa riferimento alla classifica relativa ai terreni, il tufo risulta compreso fra i terreni di bassa e molto bassa permeabilità.

Valori della permeabilità prossimi a quelli del tufo caratterizzano le pozzolane di Napoli [RIPPA, VINALE, 1982]; ciò dimostra che il tufo che, come già noto ha una porosità analoga a quella della roccia sciolta dalla quale ha avuto origine, ha conservato anche la stessa rete dei canalicoli.

Se ci si riferisce invece alle rocce lapidee, la permeabilità del tufo risulta fra le più elevate. Per le rocce lapidee intatte il coefficiente di permeabilità varia infatti fra  $10^{-10}$  e  $10^{-4}$  cm sec<sup>-1</sup> [BERNAIX, 1967; SERAFIM, 1968]; i valori più elevati sono relativi alle rocce più porose.

La permeabilità al monomero risulta più elevata che all'acqua; per il MMA il coefficiente di permeabilità è infatti pari circa a  $4,4 \times 10^{-5} \div 1,7 \times 10^{-4}$  cm sec<sup>-1</sup>, perciò quasi doppia della prima.

Se si fa riferimento alla classifica di CAMBEFORT [1977] relativa all'applicabilità dei principali tipi di miscele ai terreni ed alle rocce, si vede che, per le rocce porose, quali il tufo, e le rocce fratturate, sono impiegabili le sole resine organiche. Viene inoltre indicata, per l'impregnazione, quale permeabilità minima all'acqua il valore di  $10^{-4}$  cm sec<sup>-1</sup>. Detto valore minimo deve essere inteso pari a  $3 \div 5 \times 10^{-5}$  cm sec<sup>-1</sup> con riferimento alle resine usualmente impiegate e nelle normali diluizioni, avendo queste viscosità da due a tre volte maggiore di quella dell'acqua [TORNAGHI, 1978].

Poiché il coefficiente di permeabilità al monomero MMA risulta maggiore dei valori minimi sopra detti, si può affermare che, per quanto attiene l'impregnabilità, il liquido in esame è tecnicamente utilizzabile ai fini del consolidamento del tufo e sicuramente vantaggioso rispetto alle usuali resine più viscosi.

#### BIBLIOGRAFIA

- AURISICCHIO S., FINIZIO A., MAGLIO G., NICOLAIS L., PIERATINI G. (1981) - *Properties of polymer impregnated tuffs*. Composites.
- AURISICCHIO S., MASI P., NICOLAIS L., EVANGELISTA A., PELLEGRINO A. (1982) - *Polymer Impregnation of tuffs*. Polymer Composites.
- BERNAIX J. (1967) - *Etude géotechnique de la roche de Malpasset*. Dunod, Paris.
- CAMBEFORT H. (1977) - *Principes et applications de l'injection*. Ann. Inst. Techn. Bat. Trav. Publ., n. 253.
- EVANGELISTA A., LAPEGNA U., PELLEGRINO A. (1980) - *Problemi geotecnici nella città di Napoli per la presenza di cavità nella formazione del tufo*. XIV Convegno Naz. di Geotecnica, Firenze.
- EVANGELISTA A. (1980) - *Influenza del contenuto d'acqua sul comportamento del tufo giallo napoletano*. XIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Firenze.
- PAPARO FILOMARINO M., PELLEGRINO A. (1980) - *L'effetto dimensione nel tufo giallo napoletano*. XIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Firenze.
- PELLEGRINO A. (1967) - *Proprietà fisico-meccaniche dei terreni vulcanici del napoletano*. Atti VIII Convegno di Geotecnica, Cagliari, vol. 3, pag. 113.
- PELLEGRINO A. (1968) - *Compressibilità e resistenza a rottura del tufo giallo napoletano*. IX Convegno di Geotecnica, Genova.
- PELLEGRINO A. (1970) - *Mechanical behaviour of soft Rocks under high stresses*. II Cong. Int. Soc. Rock Mech., Belgrado.
- PELLEGRINO A. (1970) - *Le rocce lapidee tenere*. Ricerche in corso; risultati e linee di sviluppo del Gruppo di Ricerche Terreni e Strutture del CNR, Napoli.
- PELLEGRINO A. (1974) - *Surface footings on soft rocks*. III Congr. Int. Soc. Rock. Mech., Denver.
- RIPPA F., VINALE F. (1982) - *Experiences with CPT in Eastern Naples Area*. II European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam.
- SERAFIM J.L. (1968) - *Influence of interstitial water on the behaviour of rock masses*. Rock Mechanics in Engineering Practice by K.G. STAGG and O.C. ZIENKIEWICZ (Editors). London, Wiley.
- TORNAGHI R. (1978) - *Iniezioni*. Atti del seminario sul consolidamento di terre e rocce in posto nell'ingegneria civile, Stresa.

#### SUMMARY

##### Permeability and impregnability of the neapolitan yellow tuff

The yellow tuff formation, a soft rock of volcanic origin in the Neapolitan area, is liable to different deterioration phenomena. Cracks and separation of blocks along both new and pre-existing discontinuities often happen both underground, into the several cavities excavated since ancient times, both along natural and artificial steep slopes sometimes hanging over buildings. The possibility of improving tuff by means of polymer impregnation, in place of actual remedial measures, has been considered. The impregnability of tuff with methylmethacrylate (MMA) has been analyzed. The permeability to liquids with different viscosity recorded in tables I and II has been investigated. Longitudinal and radial tests together with injection tests have been carried out. Used equipments are shown in figures 1 to 4. In fig. 5 water permeability as function of the inlet pressure is plotted. In fig. 7 volume injected versus pressure and time is reported for DMPS liquid. Tab. I and II report permeability to different liquids determined out through radial permeability tests and injection tests respectively. The permeability coefficient  $k$  increases with decreasing liquid viscosity, as shown in fig. 8 where the average values are reported as function of specific gravity viscosity ratio ( $\gamma/\mu$ ), of the permeant liquids. The water permeability of tuff is low, if compared with values that characterize soils and high if compared with that of intact rocks. Moreover the permeability to MMA is high enough to allow the improvement of tuff by means of impregnation.