

# Comportamento meccanico del tufo trattato con polimeri

S. AURISICCHIO \*, A. EVANGELISTA \*\*, L. NICOLAIS \*\*\*

**SOMMARIO:** La città di Napoli si è insediata fin dall'antichità sulla formazione del tufo giallo e la roccia è stata utilizzata per la costruzione degli edifici del centro antico e dei monumenti. Molte cavità sono state scavate nella formazione del tufo, per l'estrazione del materiale e per la realizzazione di infrastrutture. Gli edifici, le cavità ed anche i fronti di scavo all'aperto in tufo soffrono di frequenti dissesti per differenti cause ed è stata presa in esame la possibilità di trattare il tufo mediante impregnazione profonda di polimeri, in alternativa agli usuali interventi.

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati di una ricerca sulla impregnazione del tufo con il monomero acrilico metilmetacrilato di metile (MMA). Sono discussi i risultati della impregnazione ed è riportata la caratterizzazione meccanica del tufo trattato. Su di questo sono state condotte prove di compressione monoassiale e triassiale, prove di trazione monoassiale e prove di permeabilità.

## 1. Premesse

In ampie zone del sottosuolo della città di Napoli, si rinviene la formazione del « tufo giallo », a volte affiorante, a volte ricoperta da una coltre di rocce sciolte costituita da pozzolane, pomici, lapilli lapidei. Come è noto, il tufo è una roccia lapidea tenera che si è formata a partire da prodotti piroclastici di origine flegrea che hanno generato i materiali del sottosuolo napoletano fra cui le pozzolane incoerenti; a differenza di quest'ultime il tufo ha subito un fenomeno di autopneumatolisi che ne ha determinato la cementazione. Quest'ultima risulta variabile da zona a zona e va riducendosi man mano che ci si allontana dai Campi Flegrei, tanto che in zone abbastanza lontane, il tufo giallo sfuma nelle pozzolane incoerenti.

Nel napoletano non è l'unico tufo presente: infatti al confine della città si rinviene il tufo campano; anch'esso di origine flegrea, ma generato a seguito di una precedente fase eruttiva. Nella città stessa, al di sotto del tufo giallo, si rinvengono il tufo campano e tufi più antichi.

Fin dai suoi primi insediamenti, la città di Napoli si è sviluppata sulla formazione tufacea utilizzando la roccia come materiale da costruzione.

Il tufo giallo, facilmente cavabile e lavorabile, si presenta generalmente con buone carat-

teristiche meccaniche e con un elevato rapporto resistenza-peso dell'unità di volume, caratteristiche che ne hanno favorito la secolare utilizzazione nelle costruzioni dell'intera città.

Questo materiale, che ha permesso l'edificazione di tutta la Napoli antica con fabbricati alti quattro, cinque piani e spesso addossati fra loro e degli edifici monumentali della città, proveniva dalle numerose cave presenti nella zona collinare della città, quando non veniva prelevato nell'area della costruzione stessa, cioè nel cortile dell'edificio in costruzione da un pozzo che veniva scavato nel sottosuolo e successivamente utilizzato come cisterna.

La coltivazione delle grosse cave sotterranee, condotta in modo disordinato senza piani precisi, era affidata all'intuito statico dei cavaatori che scavavano il materiale giungendo a volte fino ai limiti del dissesto della cava. Si ha inoltre esempio di cave abbandonate nelle quali successivi ed incauti utilizzatori hanno estratto altro materiale, creando nicchie nei preesistenti pilastri e perciò nuove occasioni di futuri dissesti.

L'individuazione e il censimento delle cavità è attualmente affidata all'Ufficio Tecnico Centrale del sottosuolo di Napoli, che ne esegue il rilevamento e redige i progetti di consolidamento. Le cave fino ad ora individuate sono un centinaio oltre alla fitta rete di cavità che costituivano gli antichi acquedotti.

Molte di queste cave sono abbandonate; talune sono utilizzate da privati come depositi, autorimesse o piccoli laboratori artigianali. La geometria delle cave, i tipi di dissesto verificatisi e lo stato di sollecitazione nei pilastri sono stati analizzati da alcuni degli scriventi [EVANGELISTA *et al.*, 1980].

Nella formazione del tufo sono stati eseguiti

\* 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.

\*\*\* Prof. Ing. LUIGI NICOLAIS, Ordinario di Tecnologia dei Polimeri - Facoltà di Ingegneria, Università di Napoli.

Lavoro effettuato con i contratti del M.P.I. (60%) 1982/1983. Responsabile scientifico: Prof. Ing. ALDO EVANGELISTA.

numerosi altri scavi per la realizzazione di infrastrutture. I serbatoi dell'Acquedotto sono in prevalenza realizzati in caverna e la rete di distribuzione è in parte costituita da canali a pelo libero scavati nel tufo. Numerose sono inoltre le gallerie stradali e ferroviarie realizzate nella formazione tufacea nonché i collettori fognari.

Nuovi scavi sono attualmente in corso o in programma per la costruzione della metropolitana collinare e di nuovi canali e nuove gallerie di adduzione ai serbatoi dell'acquedotto.

Questo vasto patrimonio di opere sia superficiali che sotterranee realizzato con il tufo e nel tufo richiede continui interventi di manutenzione.

Inoltre nella città spesso è necessario intervenire anche sulla roccia in corrispondenza di pendii naturali e di fronti di scavo verticali che a volte incombono su edifici ed opere di notevole importanza.

A tali esigenze gli ambienti tecnici rispondono con progetti ed opere di tipo tradizionale.

Per quanto riguarda gli edifici si interviene attraverso la sostituzione della muratura di tufo lesionata con mattoni di cotto o l'esecuzione di iniezioni di malta cementizia; a volte nei fori di cementazione vengono collocate armature metalliche di cucitura.

Le iniezioni di malta sono state largamente impiegate nel consolidamento degli edifici danneggiati dal terremoto del novembre '80.

Con tale metodo si raggiunge lo scopo di intasare le discontinuità presenti nella muratura, senza tuttavia determinare alcun consolidamento dei blocchi di tufo.

Gli interventi di carattere geotecnico effettuati all'interno delle cavità e sui pendii naturali e fronti di scavo consistono nella realizzazione di strutture di sostegno rigide e nella cucitura della roccia attraverso ancoraggi passivi, in prevalenza micropali.

Il primo tipo di intervento, apparentemente più semplice, si presenta problematico nel caso del suo impiego all'interno di cavità poiché il pavimento di queste è costituito dai materiali di risulta della coltivazione della cava aventi spessori che possono raggiungere alcuni metri e caratteristiche di tale precarietà che in alcuni casi risulta necessario fondare le strutture di sostegno su pali. Alcuni esempi di interventi realizzati sono riportati nella nota [EVANGELISTA *et al.*, 1983].

Le notevoli complessità progettuali ed esecutive degli interventi prima descritti, nonché

l'elevato costo degli stessi, hanno indirizzato l'interesse degli scriventi verso un tipo di intervento del tutto differente basato sulla modifica delle caratteristiche meccaniche del tufo e sul ripristino della sua continuità dove fosse interessato da fratture. È stata intrapresa una ricerca sistematica per il trattamento della roccia con opportune miscele reattive di monomeri la cui composizione è stata studiata con il duplice obiettivo di permettere il consolidamento in profondità di grossi volumi di tufo e di ottenere il rispetto dei valori estetici della roccia qualora il trattamento venisse impiegato per la conservazione dei beni culturali.

Si ritiene che il trattamento sperimentato con successo sul tufo giallo possa essere impiegato, dopo le necessarie verifiche, anche su altri tipi di tufi e, più in generale, sulle rocce lapidee porose.

In precedenti contributi [AURISICCHIO *et al.*, 1981, 1982; EVANGELISTA *et al.*, 1983] sono stati esposti alcuni risultati della ricerca in oggetto; nel presente lavoro vengono richiamati i risultati già ottenuti, con particolare riguardo agli aspetti geotecnici, ed illustrati alcuni approfondimenti ed i nuovi dati sulla caratterizzazione meccanica del tufo consolidato.

## 2. Porosità e permeabilità del tufo

Numerose determinazioni effettuate su campioni di tufo giallo prelevati in più punti della città hanno evidenziato che la porosità  $n$  della roccia risulta sempre molto elevata e compresa tra il 50 ed il 60%.

Come è noto, la determinazione di  $n$  viene normalmente effettuata a partire dalla valutazione del peso secco dell'unità di volume  $\gamma_d$  e del peso specifico  $s$  della sostanza solida determinato, a sua volta, sulla roccia polverizzata ed impiegando il picnometro ad acqua. Così operando si perviene alla misura della porosità totale, mentre non è possibile determinare quanto di detta porosità sia occlusa e quanto derivi invece dai pori fra loro interconnessi e comunicanti con l'esterno.

È stata allora effettuata una serie di prove, impiegando il porosimetro ad aria che permette la sola misura della porosità  $n^*$  comunicante con l'esterno.

I risultati hanno mostrato che  $n^*$  è molto prossima alla porosità totale e che cioè l'intera porosità può essere in pratica impegnata se si effettua un trattamento con liquidi reattivi di adeguata viscosità.

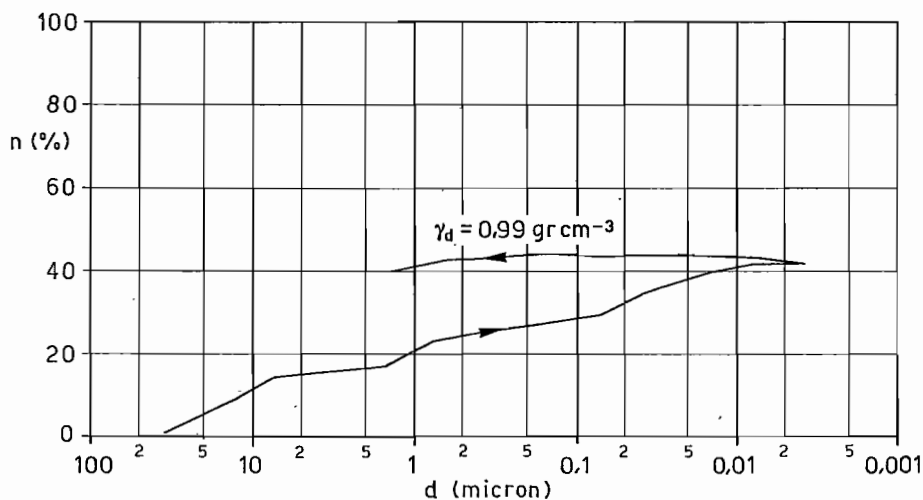


Fig. 1. - Porosità del tufo: prova al porosimetro a mercurio.  $d$  è la dimensione dei pori calcolata a partire dalla pressione di intrusione;  $n$  la porosità dei pori con dimensioni uguali o maggiori di  $d$ , calcolata a partire dal volume di mercurio intruso.

A tal fine risulta di particolare importanza la determinazione delle dimensioni dei pori. Sono state perciò effettuate prove con il porosimetro a mercurio. Come è noto attraverso questa prova possono essere determinati i volumi occupati dai pori di dimensioni capillari attraverso la misura dei volumi di mercurio intrusi nella roccia.

L'apparecchiatura utilizzata permette l'applicazione di una pressione massima sul mercurio pari a 2000 atmosfere, il che permette di misurare dimensioni dei pori fino a  $3,2 \times 10^{-3}$  micron.

I risultati della prova sono riportati in fig. 1; essi mostrano come le dimensioni dei pori siano molto variabili e come vi sia un'elevata percentuale di pori con dimensioni inferiori al decimo di micron. Dalla porosità  $n$  restano esclusi i pori di dimensioni non capillari che occupano circa il 10% del volume del provino.

Sulla base di queste misure ed in funzione di osservazioni sperimentali effettuate nel corso di prove di risalita capillare, di cui non si riferisce in questa sede, si può ritenere che questi pori di così differenti dimensioni formino attraverso la loro interconnessione più reti di canali.

Operando una grossolana distinzione si individua una prima rete formata dai pori più grossi che condizionano i fenomeni di filtrazione dei liquidi nella massa rocciosa ed una seconda costituita da pori più piccoli a cui sono attribuibili fenomeni capillari di notevole intensità, attese le dimensioni molto ridotte degli stessi.

Per quanto riguarda la permeabilità del tufo, un'approfondita indagine in precedenza effettuata [AURISICCHIO *et al.*, 1982], ha permesso la determinazione del coefficiente di permeabilità assoluta  $K_0$  che è risultato pari a  $1,1 \times 10^{-10}$   $\text{cm}^2$ .

In generale  $K$  risulta basso in accordo con quanto determinato sulle dimensioni dei pori. La ridotta permeabilità rende tecnicamente impossibile l'impiego di liquidi consolidanti di elevata viscosità ed è stato perciò necessario rivolgere l'attenzione a miscele reagenti molto fluide ed in particolare a miscele monomeriche che risultano più fluide dell'acqua.

### 3. Caratteristiche della miscela reagente e sua polimerizzazione

Il liquido reattivo impiegato è il metilmetacrilato di metile (metilmetacrilato MMA) che è un monomero acrilico avente a 25° peso specifico pari a  $0,935 \text{ gr cm}^{-3}$  e viscosità pari a 0,57 cps; risulta quindi meno viscoso dell'acqua a cui compete un valore di 1 cps.

In occasione della già citata sperimentazione sulla permeabilità del tufo fu mostrato che  $K$  assume valori compresi tra  $4,4 \times 10^{-5} \div 1,7 \times 10^{-4} \text{ cm sec}^{-1}$  per il MMA contro  $1,5 \times 10^{-5} \div 6,4 \times 10^{-5} \text{ cm sec}^{-1}$  per l'acqua.

Il monomero è un liquido con elevata tensione superficiale e di elevata volatilità; trattato chimicamente, diventa un solido polimerico, di alta resistenza; alcune caratteristiche meccaniche tratte dal Modern Plastic Encyclopedia - 1977/78 sono di seguito riportate:

— peso specifico	1,10 grcm <sup>-3</sup>
— resistenza a compressione	1100 kgcm <sup>-2</sup>
— resistenza a trazione	690 kgcm <sup>-2</sup>
— modulo elastico a compressione	6 × 10 <sup>4</sup> Kgcm <sup>-2</sup>
— modulo elastico a trazione	3 × 10 <sup>4</sup> Kgcm <sup>-2</sup>

La resistenza del polimetilmetacrilato (PMMA) risulta circa 100 volte più elevata del tufo, mentre la deformabilità è dello stesso ordine di grandezza.

Il metilmetacrilato viene normalmente impiegato in stabilimento per il trattamento di piccoli manufatti in conglomerato cementizio ed in cantiere per il consolidamento o la protezione delle pavimentazioni di ponti e strade.

La superficie che si intende trattare viene portata a contatto con il MMA che penetra nel materiale per capillarità. Il fenomeno di polimerizzazione viene innescato operando il riscaldamento della superficie stessa che viene investita da un flusso di aria o acqua calda.

Una siffatta tecnica di impregnazione e conseguente processo di polimerizzazione non si adatta all'obiettivo preposto e cioè al trattamento profondo di grossi volumi di tufo.

È stata allora preliminarmente studiata una miscela capace di polimerizzare spontaneamente; essa è composta da 86,5 parti di monomero a cui vengono aggiunte 2 parti di trimetilolpropanetrimetacrilato (MPTMA), 1 parte di benzilperossido e 0,5 parti di N-N-dimetil-p-toluidina (DMPT).

L'effetto della temperatura esterna sulla velocità di polimerizzazione del MMA all'interno del tufo e del calore prodotto durante la polimerizzazione stessa, è stato studiato nella nota [AURISICCHIO *et al.*, 1982].

#### 4. Tecniche di impregnazione ed intensità del trattamento

Nell'ambito della ricerca, ci si è limitati alla sola sperimentazione in laboratorio dove sono state impiegate due differenti tecniche di impregnazione: l'impregnazione per iniezione, che simula il processo in sito, e, per confronto, l'impregnazione per immersione.

Nell'impregnazione per iniezione, la miscela reattiva in precedenza descritta, tenuta alla temperatura di 5°, è stata immessa già in fase

attiva in blocchi di tufo aventi volume pari a circa 20 litri. I quantitativi di liquido sono sempre stati inferiori ad un litro; la pressione di immissione non ha superato le 4 atmosfere. La composizione della miscela è tale che i tempi di reazione risultano molto superiori a quelli di iniezione; la tecnica è descritta in dettaglio nella nota [EVANGELISTA *et al.*, 1983].

I volumi di miscela sono sempre stati inferiori al volume dei pori presenti nel blocco di roccia che, per le caratteristiche medie del tufo su cui si è condotto la sperimentazione, è pari circa a 12 litri. La reazione si è sviluppata dopo qualche ora ed il giorno successivo sono stati prelevati dal blocco trattato, mediante carotaggio, campioni cilindrici con diametro  $d = 8$  cm ed altezza  $h = 16$  cm nella zona interessata dal trattamento ed esternamente ad essa.

Nell'impregnazione per immersione, i provini di tufo aventi ancora diametro  $d = 8$  cm ed altezza  $h = 16$  cm sono stati tenuti immersi in bagno di miscela reattiva in un contenitore tenuto in depressione permettendo ai provini di assorbire liberamente il monomero. La reazione è avvenuta invece fuori del bagno in ambiente a pressione atmosferica.

A partire dal peso secco dei provini trattati è stato possibile effettuare una valutazione indiretta del contenuto di polimero nei campioni e cioè dell'intensità del trattamento ottenuta con le due tecniche di impregnazione.

Se si definiscono con:

- $\gamma_d$  il peso dell'unità di volume del materiale secco comprensivo del polimero (tufo + polimero);
- $\gamma_{dT}$  il valor medio del peso secco dell'unità di volume del tufo impiegato nella sperimentazione;
- $s_p$  il peso specifico del polimero;
- $V_p$  la percentuale in volume di polimero (volume polimero/volume totale);
- $W_{tp}$  la percentuale in peso del polimero (peso polimero/peso totale);
- $n$  la porosità residua dopo il trattamento;
- $n_T$  il valor medio della porosità del tufo sottoposto a trattamento;

facendo riferimento ai valori medi della porosità e del peso secco del tufo sottoposto a trattamento, in via approssimata può porsi:

- $W_{tp} = (\gamma_d - \gamma_{dT})/\gamma_d$ ;
- $V = (\gamma_d - \gamma_{dT})/s_p$ ;
- $n = n_T - V_p$ .

Il tufo sul quale è stata condotta la sperimentazione ha presentato:

$$\gamma_{dT} = 0,96 \text{ grcm}^{-3} \quad n_T = 60,8\%.$$

Il peso specifico del polimetilmetacrilato è pari a:

$$s_p = 1,19 \text{ grcm}^{-3}.$$

È risultato che:

— l'impregnazione per immersione ha dato luogo ad un « trattamento intenso » caratterizzato da valori  $\gamma_d$  compresi tra 1,30 ed 1,47  $\text{grcm}^{-3}$  e di conseguenza

$$W_{tp} = 26 \div 35\%; \quad V_p = 28 \div 43\%; \quad n = 32 \div 18\%;$$

la percentuale dei pori impregnati, espressa da  $V_p/n_T$  è uguale al  $47 \div 70\%$ ;

— l'impregnazione per iniezione ha dato luogo ad un « trattamento medio » di intensità variabile, caratterizzato dai seguenti valori medi:

$$\gamma_d = 1,2 \text{ grcm}^{-3}; \quad W_{tp} = 20\%;$$

$$V = 20\%; \quad n = 41\%; \quad V_p/n_T = 33\%.$$

I risultati relativi alle due differenti tecniche richiedono alcune considerazioni chiarificatrici. È opportuno ricordare che nel tufo il MMA, con peso dell'unità di volume  $s_m = 0,94 \text{ grcm}^{-3}$  polimerizza contraendosi; infatti il peso specifico  $s_p$  del PMMA sale a  $1,19 \text{ grcm}^{-3}$ . La sostanza reattiva subisce allora una riduzione di volume pari a:

$$100 - s_m/s_p = 20\%.$$

Il più elevato valore di  $\gamma_d$  che può essere ottenuto a seguito di una sola impregnazione di MMA è pari a:

$$s_m \times n_T + \gamma_{dT} = 1,53 \text{ grcm}^{-3}.$$

Questo valore non è stato ottenuto né attraverso l'iniezione né con l'immersione e questo viene così interpretato:

— i quantitativi di MMA iniettati nei blocchi di tufo sono stati sempre molto inferiori al volume dei pori disponibili. Il monomero, in fase di iniezione, sotto l'effetto della pressione si è diffuso percorrendo la rete dei capillari più grossi a cui compete minore resistenza alla penetrazione. Contemporaneamente e successivamente fenomeni capillari molto intensi si sono sviluppati nella rete dei capillari più

piccoli, che presumibilmente pescano nella rete dei capillari più grossi e dai quali i primi attingono liquido. Alla fine del fenomeno, il liquido si è molto diffuso nella massa ed i capillari grossi, inizialmente saturi, si sono andati parzialmente svuotando. L'evaporazione del MMA e la già citata contrazione del liquido, durante la polimerizzazione, hanno ridotto ulteriormente la percentuale dei pori impregnati che è risultata in media pari al 30%.

Nei provini impregnati per immersione i pori più grossi e quelli più piccoli hanno ricevuto continui apporti dall'esterno durante il propagarsi del MMA nella massa; pertanto i campioni hanno presentato un elevato grado di saturazione di MMA al momento dell'estrazione dal bagno. Perdite di liquido per sgocciolamento ed evaporazione e la già ricordata contrazione del MMA in fase di polimerizzazione, hanno portato i valori di  $V_p/n_T$  a ricadere tra il 47 ed il 70%. Si ricorda che il limite massimo di  $V_p/n_T$ , tenendo conto della sola contrazione del MMA in fase di polimerizzazione, è pari al 70%.

In via di principio è possibile ottenere un « trattamento intenso » anche attraverso l'iniezione se si adatta un'ottimale combinazione fra i tempi di immissione e di reazione, e cioè facendo in modo che i tempi di immissione siano solo leggermente inferiori a quelli di reazione. Questo richiederebbe però l'adozione di una particolare apparecchiatura di iniezione che eviti la possibilità di un'improvvisa polimerizzazione del MMA all'interno del serbatoio. A tal proposito si fa notare che i tempi di reazione delle miscele all'interno del tufo, sono molto maggiori di quelli del liquido in massa.

Ciò è dovuto alle diverse condizioni termodinamiche del reattivo: adiabatiche quando si trova in massa e isoterme quando è introdotto nel tufo che funziona in parte come dissipatore per la sua stessa capacità di conduzione e per la dispersione del reattivo nella rete di capillari.

Le prove effettuate con il porosimetro ad aria hanno evidenziato un importante aspetto e cioè che il trattamento con MMA porta alla creazione di porosità non comunicante con l'esterno. Ciò è messo chiaramente in evidenza dai risultati sintetizzati nella fig. 2 dove si può vedere che i punti  $1M \div 9M$ , relativi alle determinazioni effettuate sul tufo trattato, ricadono sempre al di sotto delle curve teoriche; ciò a dimostrare che la porosità comunicante  $n^*$  ri-

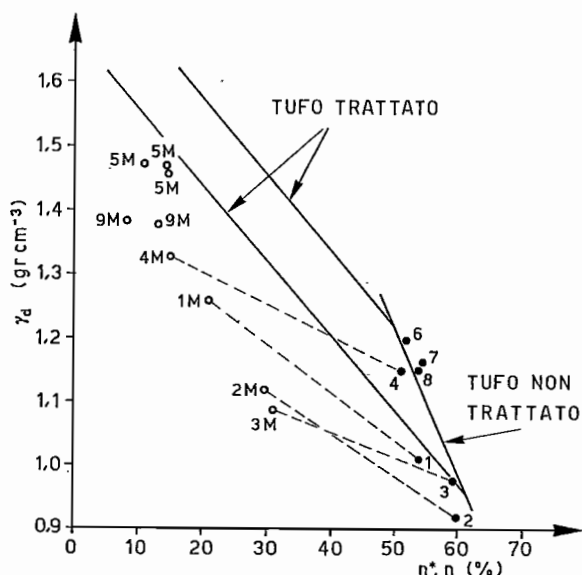


Fig. 2. - Porosità del tufo: prove al porosimetro ad aria. I punti sperimentali sono posti in diagramma in funzione di  $\gamma_d$  e della porosità comunicante con l'esterno  $n^*$  ricavata con la prova. Le curve teoriche, che legano la porosità totale  $n$  al peso  $\gamma_d$  sono state ricavate a partire dal peso specifico del tufo  $s = 2,42 \text{ gr cm}^{-3}$  e del polimero  $s_p = 1,19 \text{ gr cm}^{-3}$ . Le curve a tratti collegano le determinazioni sperimentali prima e dopo il trattamento; queste ultime sono contraddistinte dall'indice M.

sulta inferiore a quella totale e residua  $n$  deducibile a partire dal peso secco  $\gamma_d$  (tufo + polimere).

Nella predetta figura è inoltre evidenziato quanto già detto nel paragrafo 2 sulla porosità del tufo in condizioni naturali; per questo  $n^*$  è

molto prossima ad  $n$  ed infatti i punti sperimentali interpolano con sufficiente approssimazione la relazione teorica.

In fig. 3 sono riportate le determinazioni al porosimetro a mercurio effettuate sui provini con differenti intensità di trattamento, unitamente alla curva relativa al tufo non trattato già presentato nella fig. 1.

Dal confronto tra le curve si evince che il tufo mediamente trattato conserva un assortimento dei pori paragonabile a quello del tufo naturale; in quello intensamente trattato scompaiono invece quasi del tutto le frazioni dei pori più grossi.

Quanto evidenziato è in sostanziale accordo con le ipotesi formulate sulla diffusione del MMA nella massa del tufo; un approfondimento del fenomeno potrà essere effettuato solo sulla base dei risultati di un maggior numero di prove al porosimetro.

## 5. Caratteristiche meccaniche del tufo trattato

### 5.1. Compressione monoassiale.

L'efficacia del trattamento è stata inizialmente determinata avvalendosi dei risultati di semplici prove a compressione monoassiale [EVANGELISTA *et al.*, 1983].

In particolare è stato messo in evidenza co-

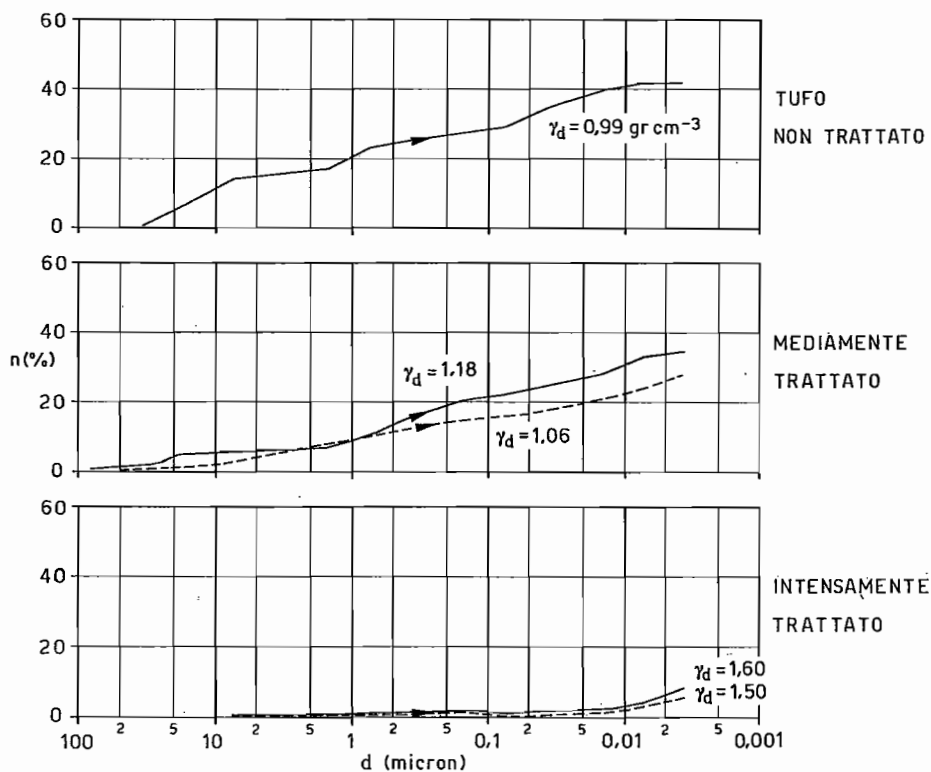


Fig. 3. - Andamento delle curve porosità-diametri dei pori dedotte da prove al porosimetro a mercurio effettuate su campioni di tufo sottoposti a trattamento di differente intensità.

me la resistenza a compressione  $\sigma_c$  ed il modulo secante  $E$ , valutato in corrispondenza di  $\sigma/\sigma_c = 0,5$ , siano funzione dell'intensità del trattamento. In fig. 4 sono riportate le curve tensioni-deformazioni rilevate su tre provini con differente intensità di trattamento.

In fig. 5 è riportato l'andamento di  $\sigma_c$  in fun-

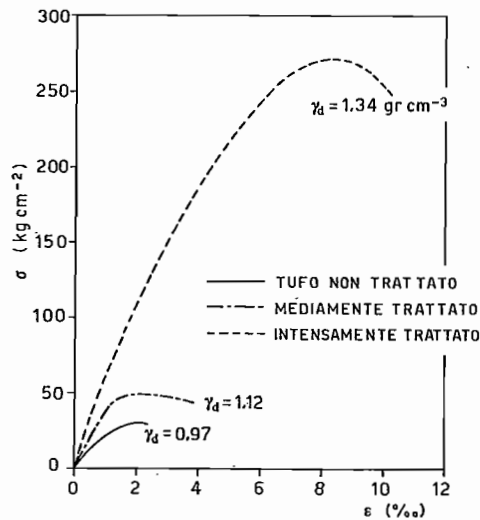


Fig. 4. - Andamento tipico delle curve tensioni-deformazioni in prove di compressione monoassiale su provini di tufo trattato e non trattato.

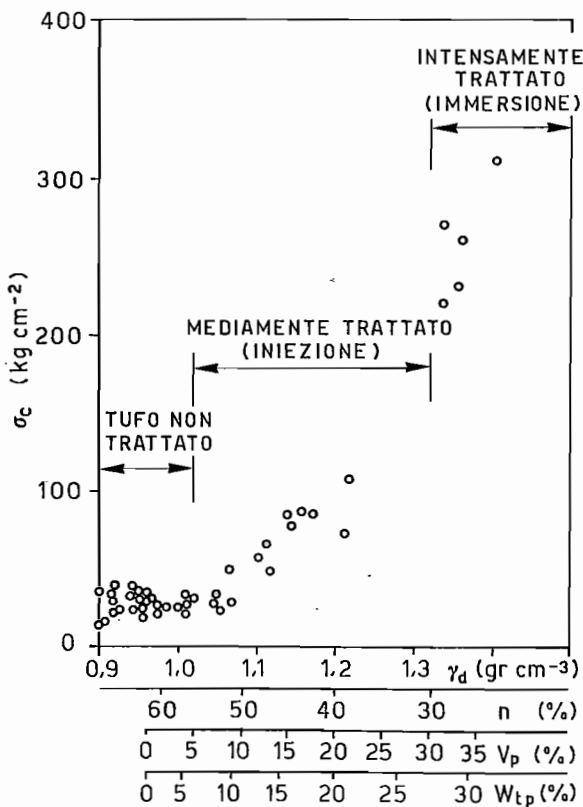


Fig. 5. - Compressione monoassiale: resistenza a rottura in funzione del contenuto del polimero.

zione del peso secco dell'unità di volume  $\gamma_d$  (tufo + polimero) e quindi dei parametri  $V_p$ ,  $W_{tp}$ ,  $n$  che più significativamente esprimono la quantità di polimero presente nel tufo.

In fig. 6 è inoltre rappresentata l'influenza di  $\gamma_d$  sul modulo  $E$ .

Dall'esame della fig. 5 si può notare come il trattamento è efficace solo a partire da  $W_{tp}$  maggiore del 10%; in particolare un aumento di  $\sigma_c$  si manifesta per  $W_{tp} = 20\%$  in quanto la resistenza all'incirca si quadruplica. Per  $W_{tp} = 30\%$  la  $\sigma_c$  risulta 10 volte più elevata.

Si registra invece un limitato incremento del modulo:

$E = 1 \div 3 \times 10^4 \text{ Kgcm}^{-2}$  per il tufo non trattato;  $E = 5 \div 6 \times 10^4 \text{ Kgcm}^{-2}$  per il tufo trattato (v. fig. 6).

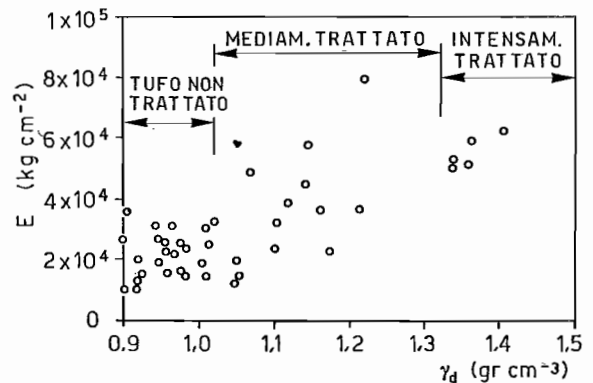


Fig. 6. - Compressione monoassiale: modulo elastico in funzione del contenuto di polimero. È rappresentato il modulo elastico secante in corrispondenza di un livello di sollecitazione pari al 50% di quello di rottura.

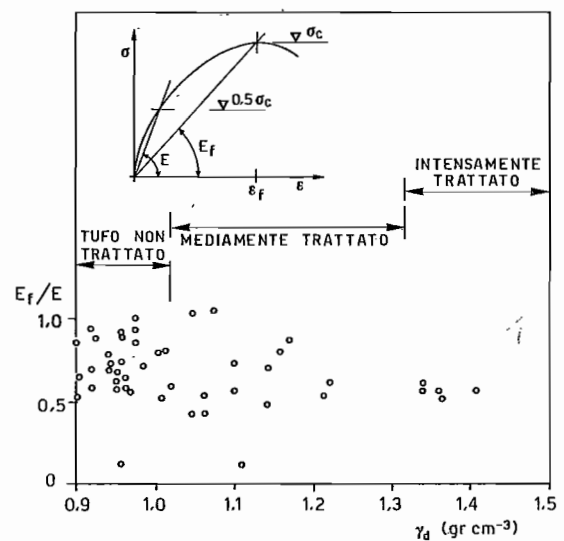


Fig. 7. - Compressione monoassiale: rapporto fra moduli elastici a differenti livelli di sollecitazione in funzione del contenuto del polimero. È rappresentato il rapporto fra il modulo secante  $E_f$  in corrispondenza della condizione di rottura ed  $E$  in corrispondenza del 50% della rottura.

Ciò era da attendersi in quanto il tufo ed il polimero hanno moduli dello stesso ordine di grandezza. In fig. 7 è infine riportato il rapporto fra il modulo  $E_f$ : modulo secante calcolato in corrispondenza della condizione di rottura ed il già definito modulo  $E$ , al variare di  $\gamma_d$ . Come si vede i dati sono abbastanza dispersi e non individuano una significativa influenza del trattamento sulla forma della curva carichi-cedimenti. Al contrario la deformazione unitaria verticale a rottura  $\epsilon_f$  risulta notevolmente influenzata in quanto passa da  $1 \div 2\%$  per il tufo non trattato al  $7 \div 8\%$  per il tufo intensamente trattato.

La ridotta sensibilità al trattamento del modulo  $E$  è stata riscontrata anche sul conglomerato cementizio impregnato; a tal proposito DE PUY e DIKEOU [1973] hanno misurato un incremento del modulo di elasticità pari all'80% a fronte di un incremento della  $\sigma_c$  di circa il 280%; nella predetta sperimentazione il modulo di rottura  $E_f$  si è incrementato del 250%.

### 5.2 Trazione monoassiale.

La sperimentazione a trazione è stata più contenuta di quella a compressione a causa delle difficoltà di prova. In particolare è stato necessario, in conseguenza dell'elevata resistenza acquistata dal tufo trattato, operare su pro-

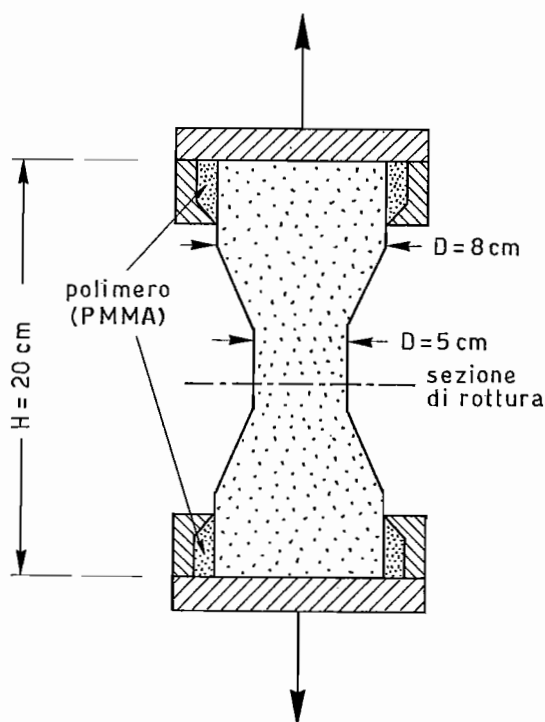


Fig. 8. - Rappresentazione schematica del sistema di aggancio del provino in prova di trazione monoassiale.

vini sagomati al tornio così come riportato in fig. 8.

Eseguendo le prove su provini di sezione costante e con diametro pari a 8 cm, si determinava lo scollamento del campione dalle teste e non la sua rottura.

I risultati delle dieci prove effettuate, riportate in fig. 9, dimostrano come anche questa caratteristica di resistenza risulti influenzata dal polimero a partire da un contenuto in peso  $W_{tp} > 10\%$ ; per  $W_{tp} = 30\%$  la resistenza a trazione risulta all'incirca dieci volte più elevata di quella per il tufo in condizioni naturali.

Di particolare interesse, ai fini tecnici, appaiono questi ultimi risultati che mostrano come il tufo, che è una roccia di ridotta resistenza a trazione, possa essere trasformata, da un trattamento intenso, in un materiale capace di sopportare elevati sforzi di trazione.

Non è stato possibile nel corso di queste prove, effettuare misure di deformazione attendibili ai fini della determinazione della curva sforzi di trazione-deformazioni.

È stato rilevato sempre un comportamento a rottura di tipo fragile.

### 5.3 Compressione triassiale.

La sperimentazione in regime di compressione triassiale è stata prevalentemente effettuata sui provini intensamente trattati e non trattati, con la finalità di indagare sulle caratteristiche del materiale in corrispondenza dei più elevati contenuti di polimero.

Si ricorda preliminarmente che il tufo nelle

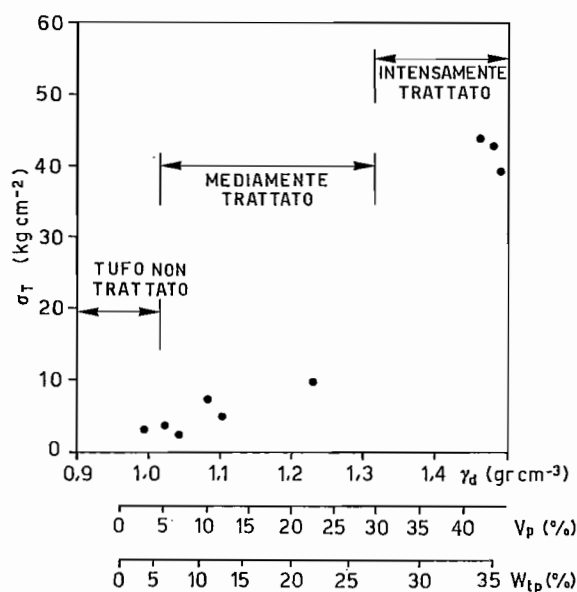


Fig. 9. - Resistenza a trazione monoassiale in funzione del contenuto di polimero.



condizioni naturali presenta, se sottoposto ad uno stato di sollecitazione triassiale, un differente comportamento tensioni-deformazioni.

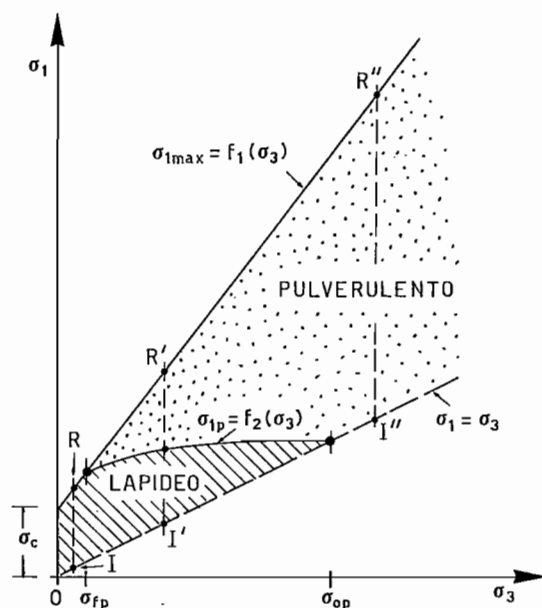


Fig. 10. - Compressione triassiale: rappresentazione schematica nel piano  $\sigma_1, \sigma_3$  dei domini lapideo e pulverulento del tufo in condizioni naturali.

Per bassi valori della  $\sigma_3$  ed inferiori ad un prefissato valore  $\sigma_{fp}$ , funzione delle caratteristiche meccaniche del tufo, la roccia si deforma fino a rottura, come un materiale pressoché elastico lineare (regime lapideo); la rottura è caratterizzata dalla comparsa di lesioni e dallo scorrimento relativo degli elementi lapidei in cui si suddivide il provino.

Per più elevati valori della  $\sigma_3$ , il tufo presenta un comportamento pressoché elastico lineare solo fino ad un valore della  $\sigma_1$  pari a  $\sigma_{1p}$ , a

partire dal quale subisce microlesioni che interessano, via via, tutto il provino; il valore massimo  $\sigma_{1max}$  viene attinto quando questo è ormai quasi totalmente pulverizzato.

Notevoli deformazioni intercorrono nella fase di pulverizzazione, man mano che la  $\sigma_1$  evolve dal valore  $\sigma_{1p}$  a  $\sigma_{max}$ .

Per valori ancora più elevati della  $\sigma_3$  la pulverizzazione della roccia viene raggiunta nella fase di compressione sferica sotto un prefissato valore della pressione  $\sigma_{op}$ , funzione delle caratteristiche meccaniche del tufo.

L'argomento si trova ampiamente trattato nei lavori di PELLEGRINO [1970] e di EVANGELISTA [1980].

In fig. 10 sono indicati i tre possibili comportamenti del tufo ed i tre differenti percorsi tensionali, relativi alle prove triassiali, individuati dalle spezzate O-I-R, O-I'-R', O-I''-R''.

Come detto la sperimentazione in regime di compressione triassiale è stata condotta solo sul tufo intensamente trattato e per confronto su quello non trattato.

In fig. 11 sono riportate le curve deformazione verticale  $\epsilon$ , tensione deviatorica  $\sigma_1 - \sigma_3$ , per il tufo trattato e non, e per due differenti valori della pressione di confinamento  $\sigma_3$ .

Il tufo trattato, dopo aver raggiunto la condizione di rottura, presenta una caduta di resistenza la cui entità è tanto più ridotta quanto più elevata è la pressione di confinamento; la resistenza cala molto lentamente per i più elevati valori della  $\sigma_3$ . Il comportamento di tipo lapideo, fino a rottura, è stato riscontrato per tutti i valori della pressione di confinamento impiegati nella sperimentazione.

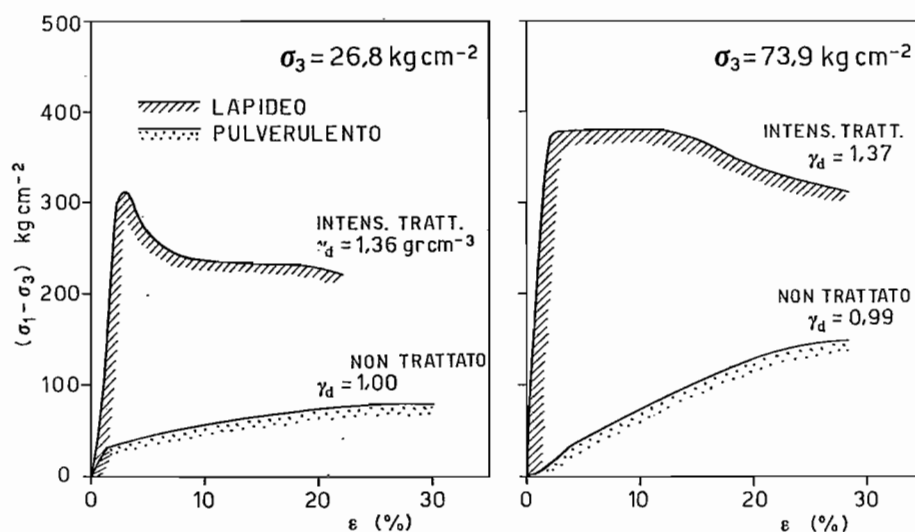


Fig. 11. - Compressione triassiale: andamento tipico delle curve tensioni deviatoriche - deformazioni assiali di provini di tufo non trattato ed intensamente trattato.

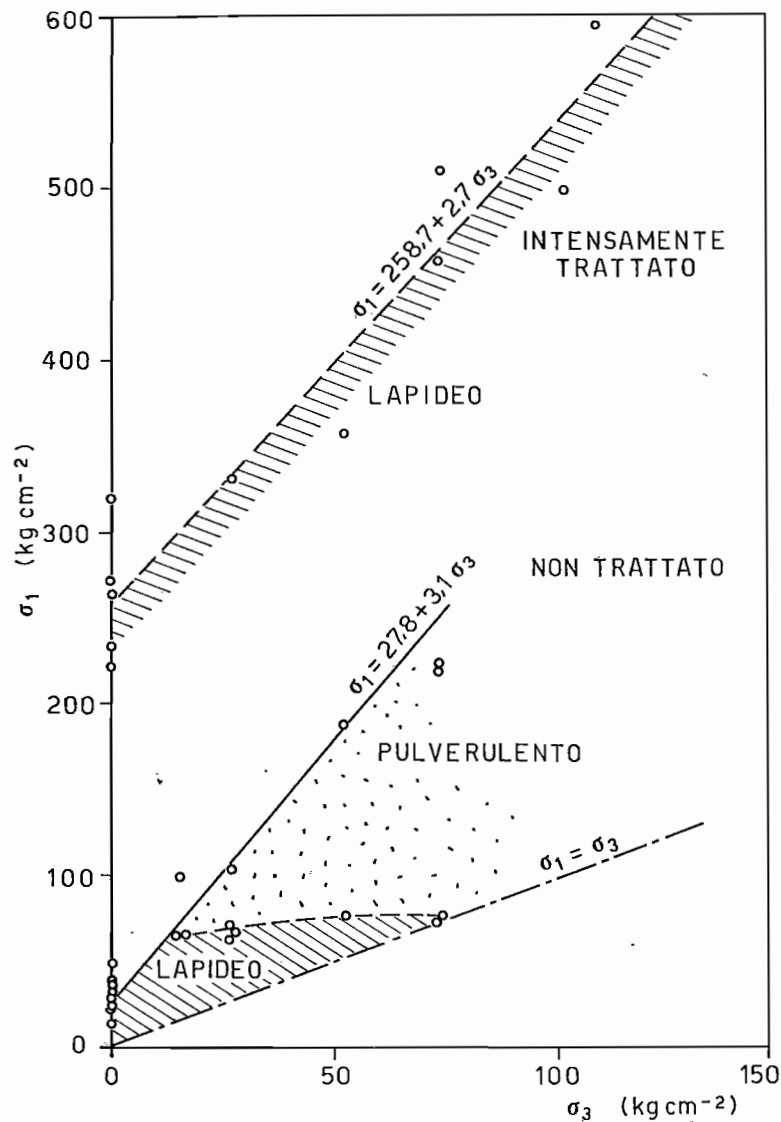


Fig. 12. - Compressione triassiale: domini di compatibilità nel piano  $\sigma_1, \sigma_3$  per il tufo non trattato ed intensamente trattato.

I tufo non trattato, al contrario, non presenta una resistenza di picco; per  $\sigma_3 = 26,9 \text{ Kgcm}^{-2}$  (fig. 11) esso subisce il fenomeno della polverizzazione a partire da  $\sigma_1 - \sigma_3 = 30 \text{ Kgcm}^{-2}$ ; per  $\sigma_3 = 73,9 \text{ kgcm}^{-2}$  il tufo è già passato nel dominio pulverulento nella fase di compressione sferica.

In fig. 12 sono rappresentate, nel piano  $\sigma_1 - \sigma_3$ , gli stati tensionali critici: per il tufo intensamente trattato  $\sigma_{1\text{max}}$  è quella di picco; per il tufo non trattato sono stati riportati  $\sigma_{1p}$  e  $\sigma_{1\text{max}}$ .

Dall'esame della figura è risultato che:

— vi è una scarsa influenza dell'intensità del trattamento sull'angolo di attrito  $\varphi$ : le due rette risultano praticamente parallele;

— si registra invece un elevato aumento della coesione, in accordo con quanto già eviden-

ziato nella sperimentazione in regime di compressione uniassiale dove la resistenza a compressione è risultata esaltata dal trattamento.

Val la pena notare che la dispersione dei dati sperimentali, normalmente già elevata per il tufo nelle condizioni naturali, aumenta per la roccia intensamente trattata. In questo caso lo scarto dei punti sperimentali rispetto alla retta viene fra l'altro esasperato dall'elevato gradiente con cui le caratteristiche meccaniche crescono in funzione dell'intensità del trattamento qualora questo è molto intenso. I provini sottoposti a rottura triassiale hanno presentato qualche differenza, anche se modesta, del contenuto del polimero.

In conclusione può dirsi che il trattamento esalta la resistenza a taglio aumentando la sola coesione e lasciando praticamente inalterato

l'attrito ( $c = 7,9 \text{ Kgcm}^{-2}$ ;  $\varphi = 30^{\circ}48'$  per il tufo non trattato;  $c = 78,4 \text{ Kgcm}^{-2}$ ;  $\varphi = 27^{\circ}21'$  per il tufo intensamente trattato).

A conferma di quanto detto è stato montato il diagramma di fig. 13, dove viene riportata la coesione  $c$  calcolata a partire dai risultati di tutte le prove di compressione uniassiale e triassiale eseguite sui provini con differenti trattamenti.

Il calcolo della coesione è stato eseguito mantenendo sempre l'angolo di attrito costante e pari a  $30^{\circ}$ . Come si vede, si registra un buon accordo fra le prove effettuate nei due differenti regimi e per tutti i differenti valori di  $\gamma_d$ .

#### 5.4 Permeabilità.

Le prove sono state effettuate su campioni aventi diametro pari ad 8 cm ed altezza 5 cm.

La bassa permeabilità dei provini trattati ha

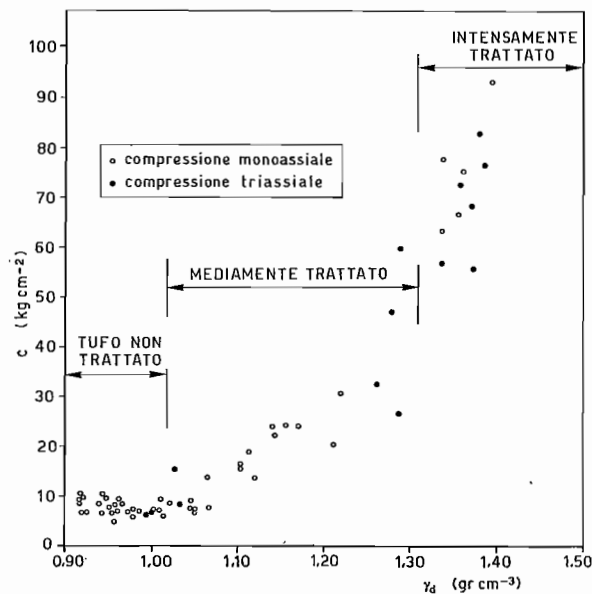


Fig. 13. - Coesione dedotta da prove di compressione triassiale e monoassiale al variare del contenuto di polimero.

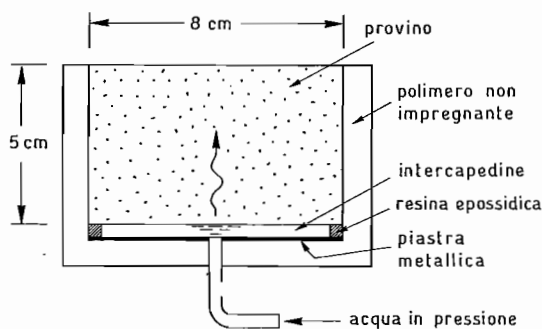


Fig. 14. - Schema della prova di permeabilità.

richiesto l'adozione di una speciale tecnica sperimentale.

Di volta in volta è stato realizzato un permeometro in materiale plastico all'intorno del provino secondo lo schema di fig. 14, impiegando una resina poliesteri senza filling di elevata viscosità e tale da non impregnare il tufo. La resina, nella fase di polimerizzazione, si contrae e serra fortemente il tufo determinando una perfetta impermeabilizzazione delle superfici laterali del provino.

Il moto di filtrazione è stato indotto immettendo acqua a pressione non maggiore di  $1 \text{ Kgcm}^{-2}$ , sono state misurate con una buretta graduata i volumi filtrati in funzione del tempo.

In fig. 15 sono riportati i valori della permeabilità  $K$  in funzione di  $\gamma_d$ .

Si registra, anche in questo caso, un'elevata influenza del contenuto del polimero.

I provini intensamente trattati sono risultati praticamente impermeabili.

#### 5.5 Considerazioni conclusive.

I risultati sperimentali, in precedenza descritti, mostrano come il trattamento con polimeri determini una significativa variazione delle caratteristiche del tufo, sia per quanto attiene alla resistenza della roccia, sia per quanto riguarda la sua permeabilità.

Il miglioramento delle caratteristiche meccaniche è tale che il suo impiego permetterebbe

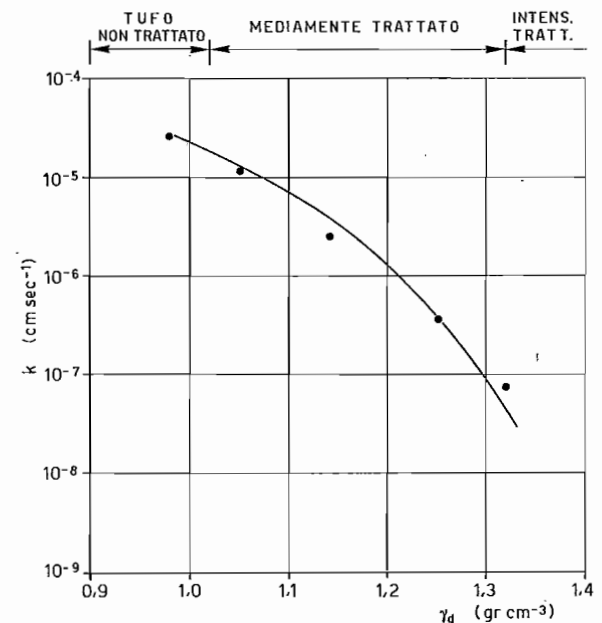


Fig. 15. - Coefficiente di permeabilità del tufo al variare del contenuto di polimero.

di modificare in modo sostanziale le condizioni di stabilità di opere ai limiti del dissesto.

Il procedimento, sperimentato con successo in laboratorio, richiede una serie di verifiche in sito finalizzate in particolare alla messa a punto della più idonea tecnica di impregnazione che permetta:

— l'immissione di grossi quantitativi di MMA in tempi prolungati;

— l'uniforme diffusione del liquido nella massa tufacea;

— il raggiungimento di una prefissata intensità di trattamento in funzione del richiesto miglioramento delle caratteristiche della roccia.

Questo tipo di sperimentazione richiederà l'impiego di complesse apparecchiature di alto costo e la presenza di una struttura operativa di elevata specializzazione.

In laboratorio ci si propone inoltre di estendere la sperimentazione ad altre rocce lapidee e sciolte e di individuare altri possibili impieghi del MMA in problemi geotecnici.

#### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ing. Cioffi del Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università di Napoli che ha curato l'esecuzione delle prove al porosimetro al mercurio.

#### SUMMARY

##### Mechanical behaviour of tuff impregnated by polymers

In the city of Naples the majority of ancient buildings have been constructed by means of the Neapolitan yellow tuff, a soft rock of volcanic origin widespread in the Naples area.

The yellow tuff formation outcrops along the hills sides and it is covered by a few meters of soils in plain areas. Most of the underground structures are contained within this formation, and a lot of pits and caverns have been excavated in it during the centuries to extract building stones.

The majority of underground cavities are affected by fissures and other damages of different nature and origin; accordingly, there is a great potential interest in tuff strengthening techniques.

The feasibility of improving the mechanical properties of the tuff by means of polymer impregnation has been investigated, as a potential alternative to other remedial measures. In particular, the impregnation by methylmethacrylate (MMA) has been considered.

The pore structure has been investigated by means of air

and mercury porosimeters; in fig. 1 typical results obtained by the mercury porosimeter are shown.

The permeability of the tuff to MMA has been found to be lower than that to water.

Two different impregnation techniques have been tested: by injection and by soaking. The former treatment has been found to be less effective than the latter.

The pore structure of impregnated tuff is shown in figs. 2 and 3.

The addition of polymer produces an improvement of the properties of the material. In figs. 5 and 6 the uniaxial compressive strength and the elastic modulus ratio are plotted as a function of the polymer content; in fig. 9 the uniaxial tensile strength versus the polymer content is shown.

The untreated tuff is known to exhibit two different behaviours in triaxial compression: a brittle, rock-like behaviour and a soil-like behaviour. The domains of the two behaviours in the  $\sigma_1, \sigma_3$  plane are schematically reported in fig. 10.

The tuff treated by soaking exhibits only the rock-like behaviour.

The triaxial compressive strength increases with increasing polymer content, as a result of an increase in cohesion intercept, while the friction angle is practically unaffected (figs. 12 and 13).

The results of permeability tests are reported in fig. 15. The coefficient of permeability  $k$  decreases with increasing polymer content; as a matter of fact, treatment by soaking reduces the permeability of the tuff to extremely low values.

#### BIBLIOGRAFIA

- AURISICCHIO S., FINIZIO A., MAGLIO G., NICOLAIS L., PIERATINI G. (1981) - *Properties of polymer impregnated tuff Composites*.
- AURISICCHIO S., MASI P., NICOLAIS L., EVANGELISTA A., PELLEGRINO A. (1982) - *Polymer impregnation of tuffs*. Polymer Composites.
- AURISICCHIO S., EVANGELISTA A., MASI P. (1982) - *Il tufo giallo napoletano: permeabilità ed impregnabilità con monomeri acrilici*. Rivista Italiana di geotecnica, n. 1.
- DE PUY G. W., DIKEOU S. T. (1973) - *Development of Polymer Impregnated Concrete as a Construction Material for Engineering Projects*. Polymers in Concrete, ACI Special Report 40.
- 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.
- EVANGELISTA A., PELLEGRINO A., AURISICCHIO S., MASI P., NICOLAIS L. (1983) - *Improvement of volcanic tuff by means of Polymer impregnation*. Proceedings of VIII European Cong. Soil Mech. Found. Eng., Helsinki.
- 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.