

SULLA RESISTENZA ALLA PENETRAZIONE DELL'AGO DI PROCTOR (*)

GIOVANNI SAPIO (**)

SOMMARIO: Nella presente nota si riferisce su un'indagine sperimentale condotta in merito alla tecnica delle prove di penetrazione con l'ago di PROCTOR.

Dall'indagine svolta risulta che sul valore della resistenza alla penetrazione influiscono, in maniera più o meno marcata, la velocità di infissione, la profondità di affondamento, la forma ed il diametro dell'ago. Risulta altresì che l'influenza dei parametri ora detti si risente in misura differente a seconda del tipo di terreno.

In particolare non sembra possa ammettersi una relazione unica fra la resistenza alla penetrazione R ed il contenuto di acqua w indipendentemente dagli altri parametri, del che è da tener conto, anche ai fini pratici dei controlli di cantiere, quando si voglia utilizzare la relazione (R, w) per la determinazione rapida del contenuto di acqua.

Premessa

Nella serie di quattro articoli apparsi sui numeri di agosto e settembre 1933 dell'*Engineering News Record* [13] ed in cui l'ingegnere americano R. R. PROCTOR illustrava la prova di laboratorio per il costipamento delle rocce sciolte che è ormai universalmente nota come « prova di PROCTOR », l'Autore suggeriva di accoppiare alla prova di costipamento vera e propria una prova di penetrazione consistente nel misurare lo sforzo richiesto per infiggere verticalmente nel provino costipato un'asta metallica di forma cilindrica.

Per eseguire la prova di penetrazione l'apparecchiatura di costipamento, quale è stata descritta in una precedente nota [16], comprende anche un dinamometro ed una serie di punte intercambiabili, comunemente dette aghi, ciascuna con una differente sezione di estremità, da un minimo di 0,125 cm² ad un massimo di 2,5 cm² circa.

Per ogni punto della prova di costipamento — che, come è noto, fornisce la relazione sperimentale fra il peso secco dell'unità di volume γ_s (1) ed il contenuto di acqua w (2) del provino sottoposto a prova — si sceglie

allora l'ago di sezione più appropriata (3) e lo si affonda, con modalità sulle quali ci soffermeremo in seguito, nel provino costipato nel cilindro di PROCTOR rilevando contemporaneamente con il dinamometro lo sforzo richiesto per l'affondamento.

La determinazione viene ripetuta in almeno tre punti della superficie del provino e si mediano quindi le letture al dinamometro. Il rapporto fra questa media e l'area premente della sezione trasversale dell'ago fornisce ciò che PROCTOR ha chiamato « resistenza alla penetrazione R ». Questa grandezza, espressa in kg/cm², viene generalmente riportata in funzione del contenuto di acqua w del provino a fianco della curva ($\gamma_s; w$) (vedi fig. 1).

Variando l'energia di costipamento, analogamente a quanto avviene per la curva ($\gamma_s; w$), anche la ($R; w$) cambia e precisamente, aumentando l'energia, si sposta verso i valori più elevati di R .

Le prove, su cui si riferisce nella presente nota, sono state però eseguite tutte su provini costipati con energia normale e cioè con l'energia corrispondente alla prova « standard » di PROCTOR (4).

La prova di penetrazione è stata ideata con un duplice scopo. In primo luogo essa dovrebbe permettere di determinare rapidamente in cantiere il contenuto di acqua del terreno onde verificare che esso sia abbastanza prossimo a quello prestabilito. Ammessa infatti una corrispondenza biunivoca fra R e w , dalla misura di R , per la cui determinazione occorrono pochi minuti, si potrà ottenere immediatamente il valore del contenuto di acqua presente nel terreno.

In secondo luogo la prova di penetrazione dovrebbe

(*) Questo studio, che rientra nel piano di indagini che il Centro Geotecnico di Napoli va attuando sotto gli auspici e con il finanziamento dell'ANIDEL, ha formato oggetto di comunicazione al I Convegno Nazionale di Geotecnica (Napoli, maggio 1953).

(**) Dott. Ing. Giovanni SAPIO del Centro Geotecnico della Fondazione Politecnica del Mezzogiorno d'Italia, Napoli.

(1) Indichiamo con γ_s il peso secco dell'unità di volume e cioè il rapporto fra il peso del campione, essiccato a 105 ÷ 110 °C, ed il volume totale (vuoti + pieni) che esso occupava inizialmente.

(2) Indichiamo con w il contenuto di acqua e cioè il rapporto fra il peso dell'acqua contenuta in un campione, e che questo perde per essiccamento a 105 ÷ 110 °C, ed il peso dei granelli.

(3) Per comodità e precisione di lettura conviene infatti che lo sforzo massimo al dinamometro cada sempre al centro della scala del dinamometro stesso, scala che in generale è graduata da 0 a 50 kg.

(4) Vedi: appendice alla nota [16].

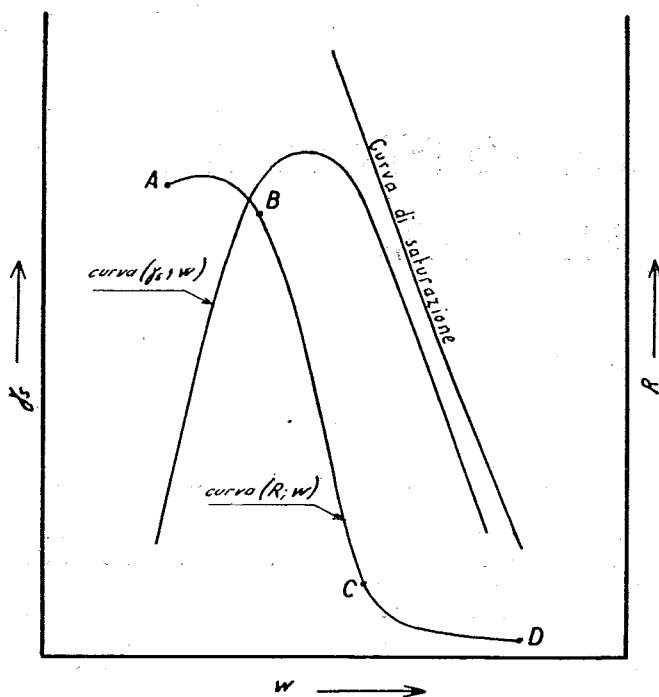


Fig. 1 - Esempio di curva di costipamento e relativa curva della resistenza alla penetrazione.

fornire un indice della capacità di resistenza del terreno costipato [14; 15]. Il PROCTOR in particolare ritiene che dai valori di R si possa dedurre in maniera abbastanza precisa se un certo materiale può essere impiegato con successo nella costruzione di una diga di terra. Altri tecnici [5; 11; 17; 18; 19] invece considerano la prova di penetrazione come semplicemente orientativa e danno ad essa quella limitata importanza che le deriva dal suo carattere di prova completamente empirica.

Svolgimento e risultati delle indagini

Oggetto delle indagini.

A parte il giudizio sull'interpretazione e sul modo di utilizzare la prova di penetrazione, è da osservare che la stessa tecnica sperimentale per il rilievo della R varia da uno sperimentatore all'altro.

Secondo alcuni sperimentatori [1; 2; 7; 13; 20], fra cui lo stesso PROCTOR, la prova dovrebbe infatti eseguirsi misurando lo sforzo necessario ad affondare l'ago nel terreno ad una determinata velocità e per una data lunghezza. Altri autori [3; 6; 9; 10; 11; 20] invece fanno riferimento soltanto alla velocità di infissione dell'ago senza imporre alcun limite al suo approfondimento nel terreno. Per un terzo gruppo di tecnici [4; 18], il risultato della prova dipende semplicemente dalla profondità di infissione dell'ago ed è indipendente dalla velocità con la quale viene effettuato l'affondamento. Per qualche altro sperimentatore [12] infine, l'ago dovrebbe essere affondato nel terreno fino a vincere completamente la resistenza del terreno stesso ed ottenere l'avanzamento dell'ago senza ulteriore aumento dello sforzo applicato. Ci è parso allora opportuno analizzare separatamente i parametri che possono

essere variati nell'eseguire la misura della resistenza alla penetrazione e, nei paragrafi seguenti, esporremo le prove eseguite al riguardo ed i risultati a cui siamo pervenuti.

Allo scopo di chiarire un'eventuale influenza della natura del terreno tutte le prove sono state condotte parallelamente sia su un terreno nettamente sabbioso sia su un terreno prevalentemente limoso, le cui caratteristiche sono riportate nella fig. 2.

Ripetibilità dei risultati.

Per valutare l'influenza che ciascuno dei parametri esercita sul risultato della prova occorre innanzi tutto stabilire entro quali limiti variano i risultati di una prova del genere, eseguita sempre con la stessa tecnica.

A tal uopo, sia per il terreno sabbioso che per quello limoso, abbiamo elaborato i dati di circa 300 determinazioni, effettuate tutte con la tecnica suggerita da PROCTOR e cioè affondando l'ago per una profondità di 7,5 cm alla velocità di circa 1,25 cm/sec (3 pollici alla velocità di 1/2 pollice al secondo). Le determinazioni sono state eseguite su provini costipati a vari contenuti di acqua si da impiegare la intera serie di aghi in dotazione all'apparecchio. Per ciascun provino, come è pratica comune (vedi premessa), l'ago è stato affondato

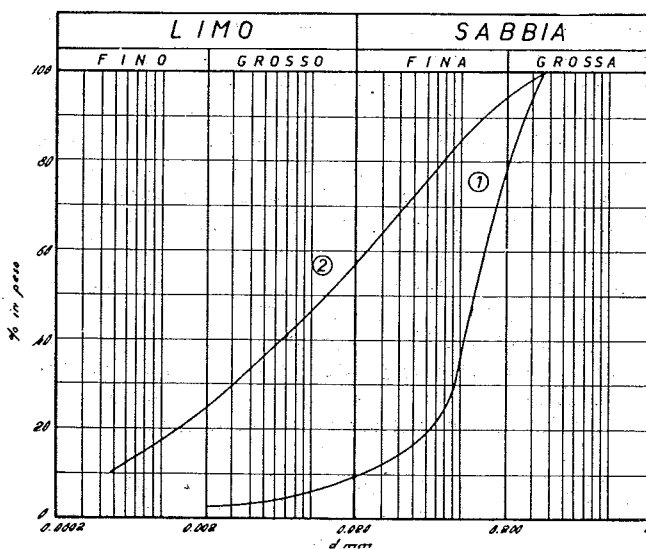


Fig. 2 - Caratteristiche dei terreni impiegati nelle prove di resistenza alla penetrazione

- (1) - Sabbia debolmente limosa. Limiti di consistenza non determinabili.
- (2) - Limo con sabbia. Limite di fluidità: 0,433; limite di plasticità: 0,199; indice di plasticità: 0,234.

nel terreno per almeno tre volte ed ogni volta è stato annotato il relativo valore di R . Di ciascuna terna di valori è stato poi calcolato, insieme alla media aritmetica, lo scostamento massimo assoluto ΔR dalla media medesima.

In fig. 3 sono riportate le frequenze percentuali del rapporto $\frac{\Delta R}{R_{med}}$ fra lo scostamento massimo predetto ed il corrispondente valor medio della R .

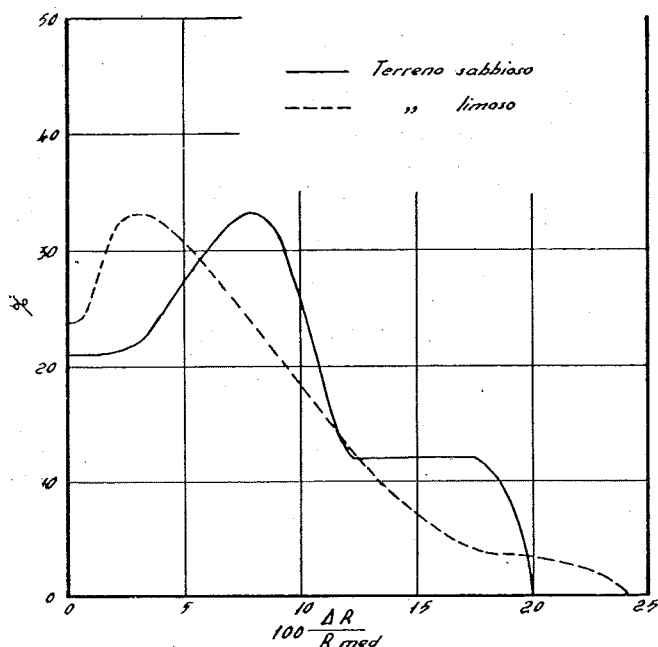


Fig. 3 - Frequenza degli scostamenti massimi rispetto alla media nella determinazione della R .

Come si rileva dalla figura, l'errore massimo ΔR può giungere anche al 20 ÷ 25% del valor medio di R , ma la probabilità che ciò si verifichi è indubbiamente molto scarsa. Il suo valore più probabile è infatti compreso fra lo 0 ed il 5% per i terreni limosi e fra il 5 ed il 10% per i terreni sabbiosi, mentre per ambedue i terreni la probabilità di scarti superiori al 10% va rapidamente diminuendo.

In conclusione quindi, riferendoci alle prove da noi effettuate, riteniamo che l'errore che si può commettere nella misura della resistenza alla penetrazione di un determinato provino non superi in genere il $\pm 10\%$.

Ciò posto, vediamo qual'è l'errore che si commette, nella valutazione del w tramite la curva ($R; w$), in conseguenza di uno scarto nel valore della R di $\pm 10\%$. Dalle numerose prove prese in esame è risultato che l'entità dell'errore può variare sensibilmente a seconda che il punto rappresentativo della resistenza del campione capitò nel tratto centrale BC della curva (vedi fig. 1) ovvero sui due tratti estremi AB e CD. In linea di massima, nel tratto centrale della curva — nel cui campo spesso cade il w_{opt} — il valore assoluto dello errore che si può commettere nella valutazione del w si aggira su $\pm 0,002$ con qualche punta di massimo che però non supera mai $\pm 0,005$. Nei tratti AB e CD invece l'errore è innanzitutto più variabile e può inoltre raggiungere e superare agevolmente il $\pm 0,10 \div 0,15$.

Al termine del presente lavoro ritorneremo su questo argomento e ne trarremo le conclusioni.

Influenza della velocità di penetrazione.

Il primo parametro, che è stato preso in esame, è stata la velocità, con cui si può fare penetrare l'ago nel provino di terreno costipato.

La regolazione di tale velocità riesce alquanto diffi-

cile con il comune dinamometro a mano ⁽⁵⁾, e pertanto abbiamo ritenuto sufficiente eseguire due soli tipi di prove, l'una, che chiameremo « prova rapida » in cui l'infissione dell'ago, per una profondità di 7 cm, avveniva in circa un secondo, l'altra, che indicheremo come « prova lenta », in cui per il medesimo affondamento venivano impiegati all'incirca dieci secondi.

Le prove sono state eseguite su provini costipati con differenti contenuti di acqua, si da impiegare tutta la serie di aghi in dotazione all'apparecchio, e sono state ripetute per ciascuno dei terreni prescelti per il nostro studio.

In ciascun provino l'ago è stato infisso per almeno tre volte con applicazione rapida dello sforzo (prova rapida) e per almeno tre volte con applicazione lenta (prova lenta).

Come indice della variazione di resistenza passando da una prova all'altra è stato quindi assunto il rapporto fra la media dei tre valori riscontrati nella prova

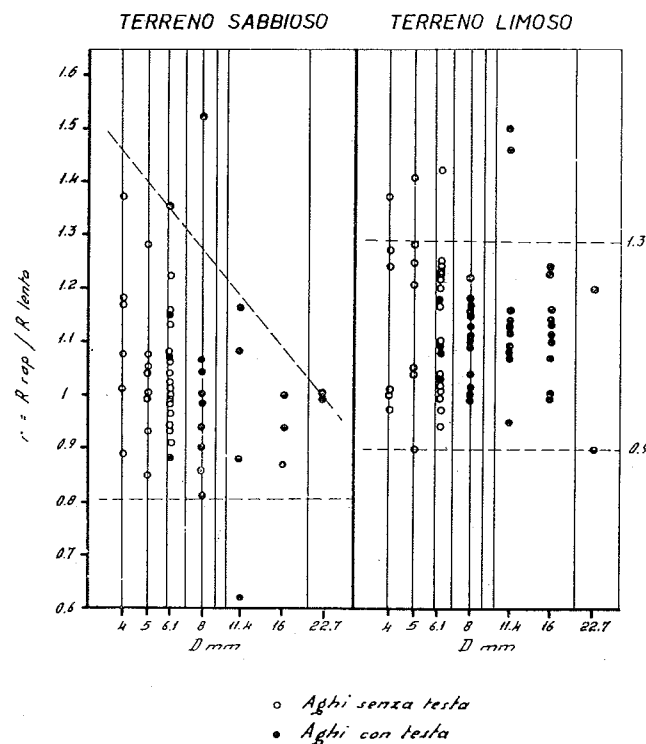


Fig. 4 - Rapporto r in funzione del diametro D dell'ago.

rapida e la media dei tre valori ottenuti nella prova lenta.

Tale rapporto, che abbiamo indicato con la lettera r , è riportato in fig. 4 in funzione del diametro dell'ago, mentre in fig. 5 è tracciata, per ciascun terreno, la curva di frequenza dei valori assunti da r in tutte le prove eseguite su quel terreno.

I risultati differiscono a seconda che si tratti di terreno sabbioso ovvero di terreno limoso. Nel primo caso infatti il valore di r appare dipendere dalla di-

⁽⁵⁾ Parimenti difficoltoso risulta il realizzare una perfetta verticalità nell'affondamento. Per ovviare a questo inconveniente abbiamo aggiunto alla nostra apparecchiatura di costipamento un apposito castelletto guida per il dinamometro.

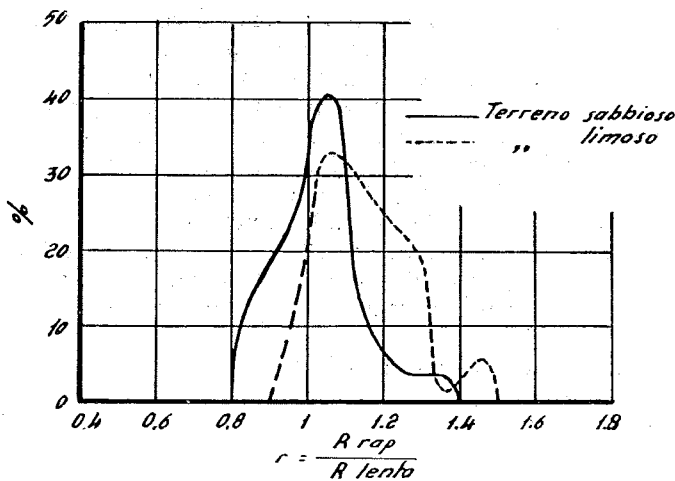


Fig. 5 - Frequenza percentuale del rapporto r .

mensione dell'ago; esso passa dal campo $0,8 \div 1,4$ per aghi piccoli al campo $0,8 \div 1$ per aghi più grossi. Nel caso del terreno limoso invece il valore di r risulta praticamente indipendente dalle dimensioni dell'ago ed è compreso, salvo pochi scarti, fra $0,9$ ed $1,3$.

Dalla fig. 5 si rileva poi che, indipendentemente dalle dimensioni dell'ago, mentre il valore più probabile di r si aggira per ambedue i tipi di terreno intorno ad $1,05$, la sua variabilità è maggiore nel caso del terreno limoso.

In conclusione quindi, in base alle prove da noi effettuate, appare evidente una discreta influenza della velocità di affondamento sui risultati della determinazione di R e pertanto se ne deduce che nelle prove di penetrazione conviene mantenere costante, sia pure approssimativamente, la velocità medesima.

Occorre tuttavia sottolineare che le differenze da noi rilevate si riferiscono a prove eseguite in condizioni estreme, mentre in pratica la velocità di penetrazione, pur non rimanendo rigorosamente costante, potrà subire solo delle variazioni modeste per rispetto a quelle realizzate nel nostro studio passando dalla prova lenta a quella rapida.

Influenza della forma dell'ago e della profondità di affondamento.

Come si è già detto, l'apparecchiatura di PROCTOR è dotata di una serie di aghi cilindrici con l'estremità di diametro variabile da 4 a 23 mm. Di questi aghi i più piccoli sono di diametro costante per tutta la loro lunghezza (aghi senza testa) mentre i più grandi posseggono una « testa » di estremità, come si rileva dallo schizzo di fig. 6. Esaminiamo pertanto il fenomeno dell'affondamento dell'ago nel terreno, nei due casi di ago con testa e di ago senza testa.

Possiamo esprimere la resistenza R , che occorre vincere per fare avanzare l'ago nel terreno, come somma di tre termini e precisamente:

— un primo termine che indicheremo con la lettera Q e che rappresenta la resistenza sulla punta dell'ago

— un secondo termine, che indicheremo con la lettera S e che rappresenta la resistenza sviluppantesi lungo la superficie laterale dell'ago in conseguenza dell'adesione fra terreno e materiale costituente l'ago.

Detta c tale adesione la resistenza S potrà esprimersi pertanto come prodotto di c per la superficie $\pi D l$ dell'ago a contatto con il terreno, essendo D il diametro dell'ago ed l la lunghezza del tratto infisso;

— un terzo termine, che indicheremo con la lettera T e che rappresenta la resistenza dovuta all'attrito fra terreno ed ago. Anche tale resistenza potrà esprimersi a sua volta come prodotto della superficie $D l$ del tratto di ago già infisso, del coefficiente di attrito ago-terreno $tg\delta$, e della pressione p , con cui il terreno preme contro la parete dell'ago.

Si potrà pertanto scrivere in definitiva:

$$R = Q + S + T = Q + \pi D l c + D l p tg\delta$$

Ciò posto, consideriamo il caso di materiali incoerenti. In questo caso è innanzitutto $c = 0$ e pertanto nullo il termine S . E' poi da tener presente che, nella prova in terreni sabbiosi, si verifica sempre un discreto rifluimento del terreno circostante all'ago per cui la entità della pressione p si porta a valori trascurabili e di conseguenza, nella formula precedente, si annulla o quasi anche il termine T .

La resistenza R si riduce allora, nel caso di materiali incoerenti, al solo termine Q . Questo termine è a sua

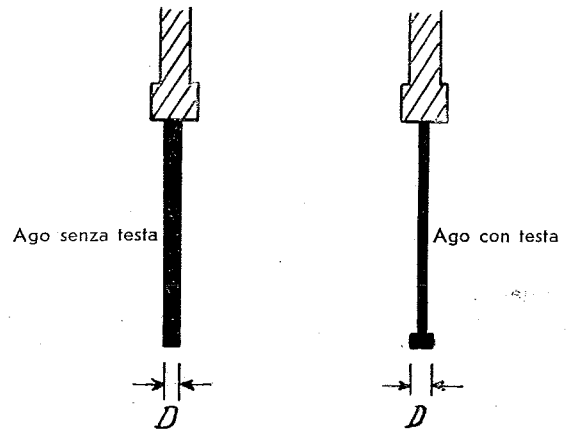


Fig. 6 - Forma degli aghi.

volta indipendente dalla superficie laterale dell'ago a contatto con il terreno e pertanto sia che questa si limiti alla sola superficie laterale della testa — determinazione con ago con testa — ovvero si estende per tutto il tratto l d'infissione, — determinazione con ago senza testa — non si riscontreranno differenze nel valore della R .

Consideriamo ora invece il caso dei terreni coerenti. Questa volta risulterà nullo il solo termine T — in conseguenza del valore trascurabile che compete a $tg\delta$ — e quindi l'espressione della resistenza alla penetrazione si ridurrà alla:

$$R = Q + \pi D l c.$$

Il valore di R risulterà allora differente a seconda che si adoperino aghi con testa o aghi senza testa. Infatti la grandezza l è una costante nel primo caso, in cui sta ad indicare l'altezza della testa, e risulta invece variabile con l'affondamento nel secondo caso, in cui rappresenta la profondità d'infissione. Si per-

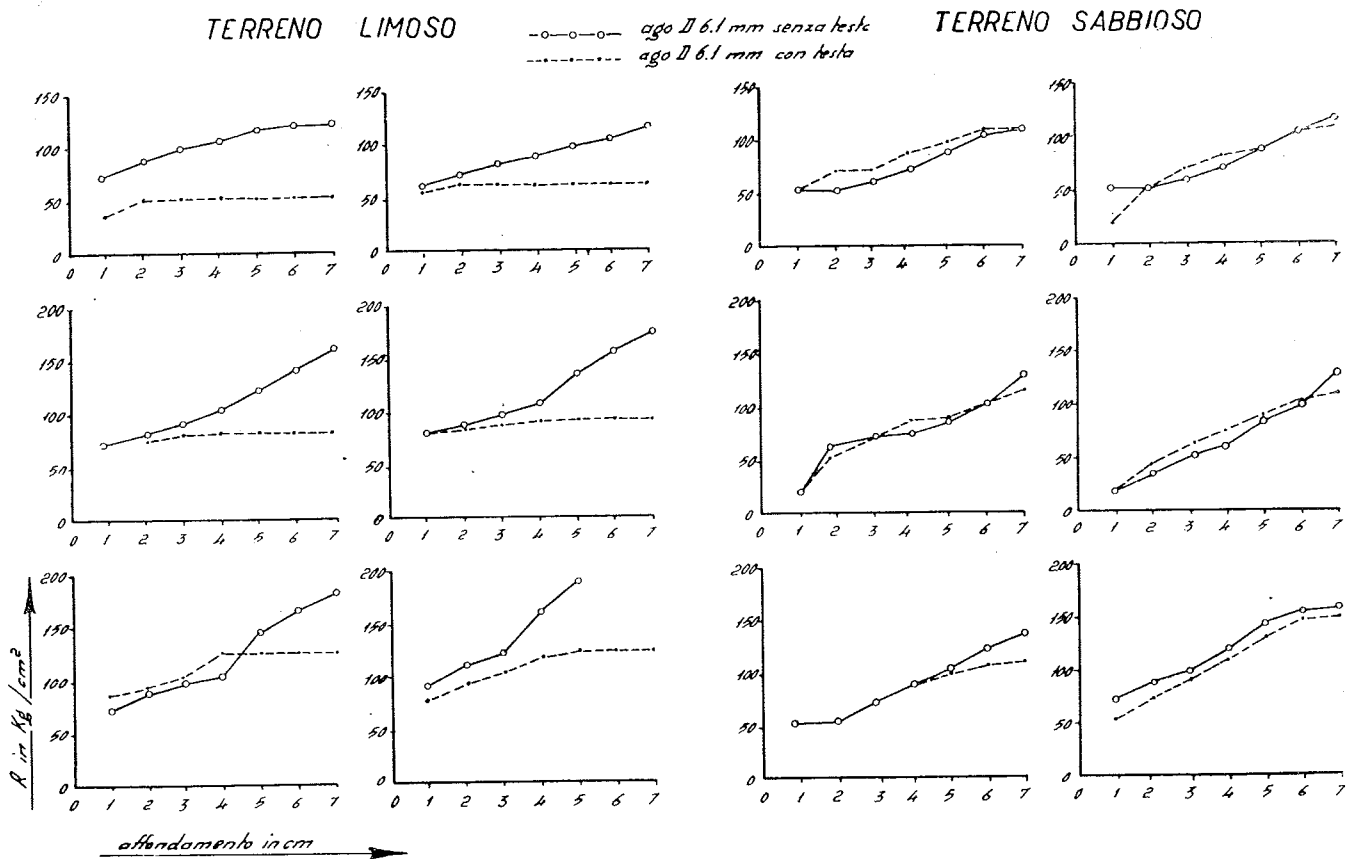


Fig. 7 - Influenza della forma dell'ago sul valore della resistenza alla penetrazione R.

viene quindi in definitiva al seguente quadro riassuntivo per l'espressione della resistenza R:

	Terreno limoso	Terreno sabbioso
Aghi con testa	$Q + cost$	Q
Aghi senza testa	$Q + \pi D l c$	Q

Di quanto ora esposto abbiamo eseguito una verifica sperimentale. A tal uopo abbiamo condotto a termine sui soliti due terreni prescelti per il nostro studio (vedi fig. 2), delle prove di confronto con due aghi, entrambi del diametro di 6,1 mm, ma l'uno fornito di testa e l'altro senza testa.

Per ciascun terreno sono stati preparati sei campioni con differenti contenuti di acqua. Ciascun campione è stato quindi costipato con il solito metodo e sono state eseguite tre determinazioni di R con l'ago con testa e tre determinazioni con l'ago senza testa. In tutti i casi l'ago è stato affondato nel terreno per 7 cm alla velocità di circa 1 cm/sec rilevando contemporaneamente la funzione $R = f(l)$.

I risultati sono raccolti nei diagrammi della fig. 7, in cui sulle ascisse sono riportati gli affondamenti dell'ago nel provino e sulle ordinate le corrispondenti resistenze alla penetrazione R. Come si vede, nei terreni limosi, conformemente a quanto avevamo previsto, le

curve che si ottengono adoperando aghi con testa ed aghi senza testa, sono nettamente differenti. Si rileva anche dalle curve a tratti che, dopo un certo valore dell'affondamento, la resistenza alla penetrazione rilevata con aghi forniti di testa diviene costante, ossia, con i nostri simboli, l'espressione $(Q + cost)$ raggiunge un massimo e rimane poi invariata. Questo fatto sta ad indicare che si è pervenuti alla condizione limite di resistenza.

Per i terreni sabbiosi invece il valore di R risulta praticamente lo stesso sia che si adoperi un ago con testa sia che si impieghi un ago senza testa. Anche in tali terreni si dovrebbe raggiungere la condizione di carico limite (valore costante della resistenza), ma si può presumere che la detta condizione limite si sarebbe forse verificata per valori dello sforzo superiori a quelli che si possono ottenere con il dinamometro in dotazione dell'apparecchio, e pertanto non è stata rilevata.

Il diverso comportamento degli aghi con e senza testa nel caso di determinazioni eseguite in terreni limosi risulta evidente anche da un altro gruppo di prove effettuate su una serie di campioni del limo sabbioso 2, ciascuno preparato con un differente contenuto di acqua. In ogni campione è stato poi infisso un determinato ago ed i valori della R ottenuti impiegando aghi differenti sono riportati in fig. 8. Come si rileva, indipendentemente dalla dimensione dell'ago, gli aghi senza testa forniscono valori della R sempre crescenti con l'affondamento, mentre con quelli con testa si perviene ad un valore limite della R.

In fig. 9 sono invece raccolti i risultati di prove analoghe eseguite sul terreno sabbioso 1 e in tal caso, sia per gli aghi con testa che per quelli senza testa, le resistenze R risultano sempre crescenti con l'affondamento.

Dall'insieme delle prove ci pare pertanto lecito con-

Influenza della dimensione dell'ago.

Come si è detto nella premessa, l'apparecchiatura per il rilievo della R comprende una serie di aghi intercambiabili e, per la misura della resistenza alla pene-

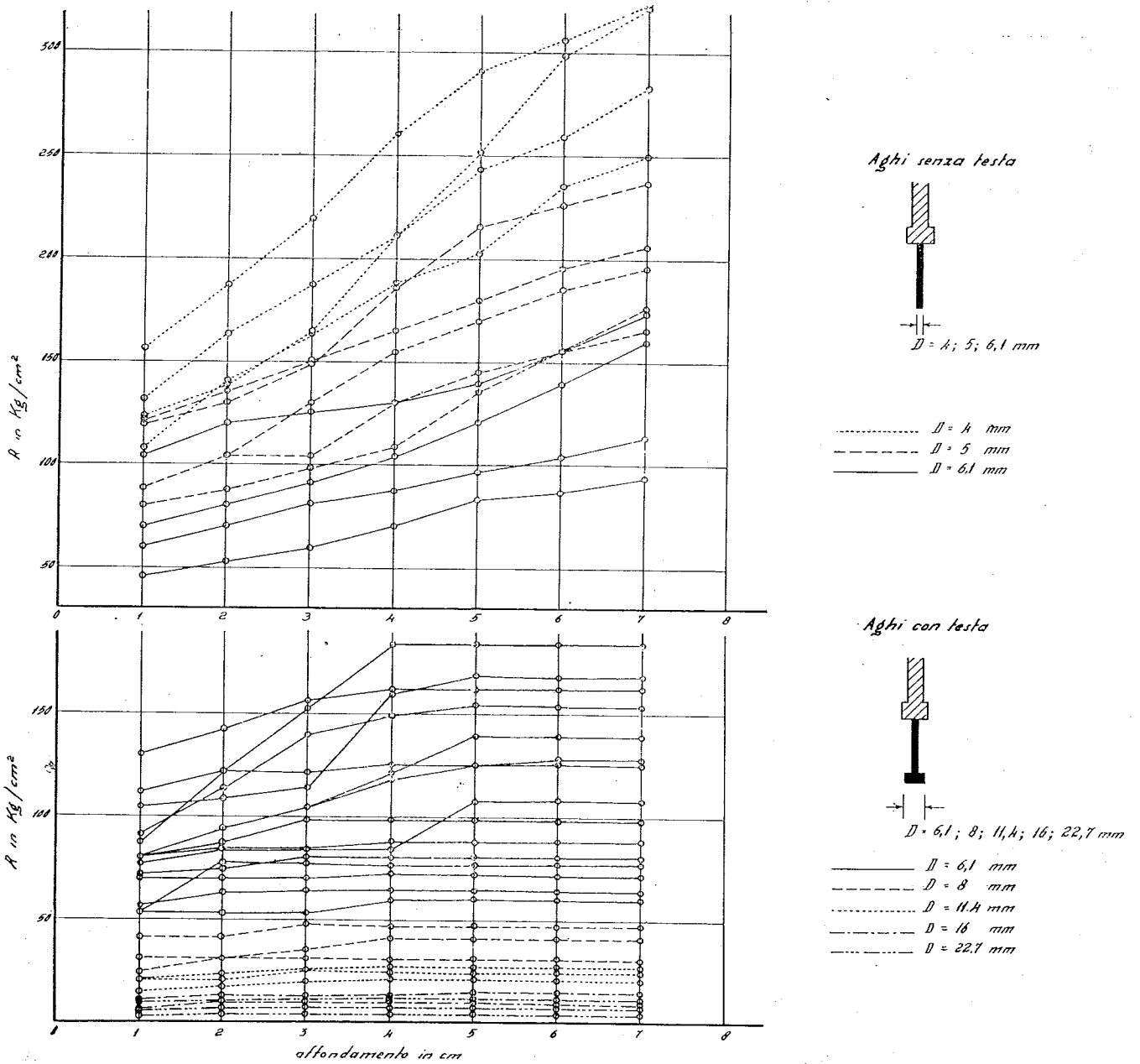


Fig. 8 - Influenza dell'affondamento dell'ago sui valori della resistenza R . Terreno limoso.

cludere che, atteso il differente comportamento degli aghi con e senza testa, nel caso dei terreni limosi, è opportuno adottare costantemente lo stesso tipo di ago. Per ragioni pratiche, non potendosi ricavare la testa per gli aghi più sottili, deve essere prescelto il tipo di ago a diametro costante.

Anche per la profondità di affondamento conviene fissare un valore determinato, che può essere ad esempio quello comunemente adottato di 7,5 cm.

trazione, si sceglie di volta in volta quell'ago la cui sezione è tale da permettere un agevole affondamento dell'ago stesso.

Una tale pratica presuppone però che, a parità di terreno ed a parità d'infissione, adoperando aghi di differenti sezioni gli sforzi letti al dinamometro risultino in ragione diretta delle sezioni stesse sì da ottenere il medesimo valore per la resistenza alla penetrazione.

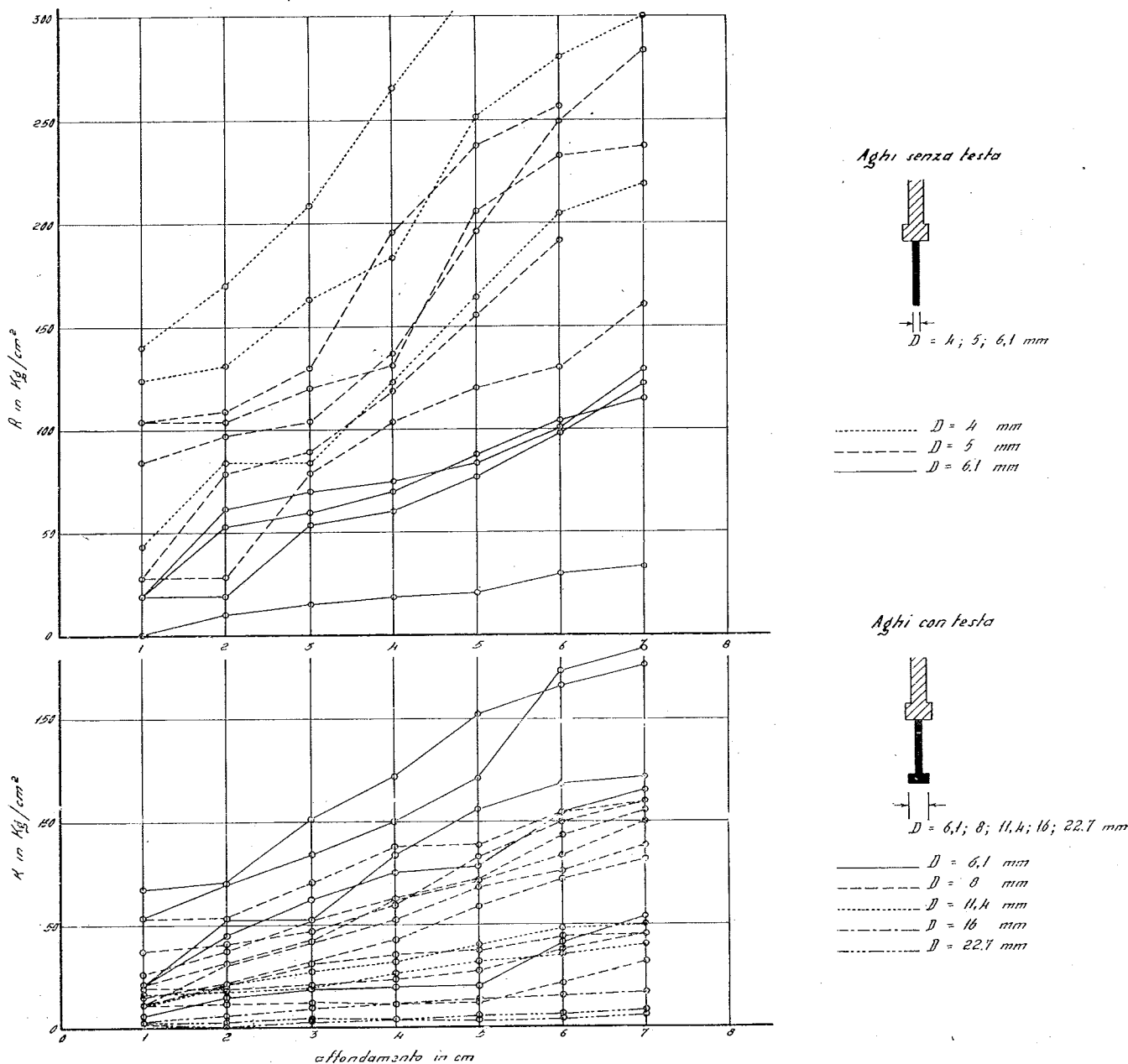


Fig. 9 - Influenza dell'affondamento dell'ago sui valori della resistenza alla penetrazione R . Terreno sabbioso.

In tutte le nostre prove abbiamo invece rilevato che variando, sia pure di poco, la dimensione dell'ago, il valore della resistenza R alla penetrazione varia. Allo scopo allora di chiarire questo punto e rilevare contemporaneamente l'entità di tali variazioni, abbiamo preparato vari campioni costipati a differenti contenuti di acqua w .

In ogni campione sono stati successivamente infissi dapprima per tre volte un certo ago, quindi, sempre per tre volte, un ago più grande, quindi ancora per altre tre volte un ago di dimensioni ancora maggiori e così via. Della serie di tre misure è stato poi riportato in diagramma il valor medio (vedi fig. 10 e fig. 11).

Dai diagrammi si rileva chiaramente come il valore della resistenza alla penetrazione dipenda sensibil-

mente dalle dimensioni dell'ago e precisamente vada diminuendo con il crescere della dimensione di base dell'ago adoperato. Tale diminuzione è molto più notevole nel caso di terreni limosi, ma rimane sensibile anche per i terreni sabbiosi.

Che la resistenza alla penetrazione varii con la dimensione dell'ago è stato osservato anche dall'HOGENTGLER [6]. Secondo tale autore però, mentre per i terreni limosi la resistenza diminuisce con il crescere delle dimensioni dell'ago, nei terreni sabbiosi accadrebbe il contrario e per terreni sabbio-limosi non si risconterebbe alcuna differenza.

Esperienze molto recenti, ideate ed eseguite presso la *Waterways Experiment Station* per la rapida scelta dei rulli a piede di pecora [8], conducono invece a

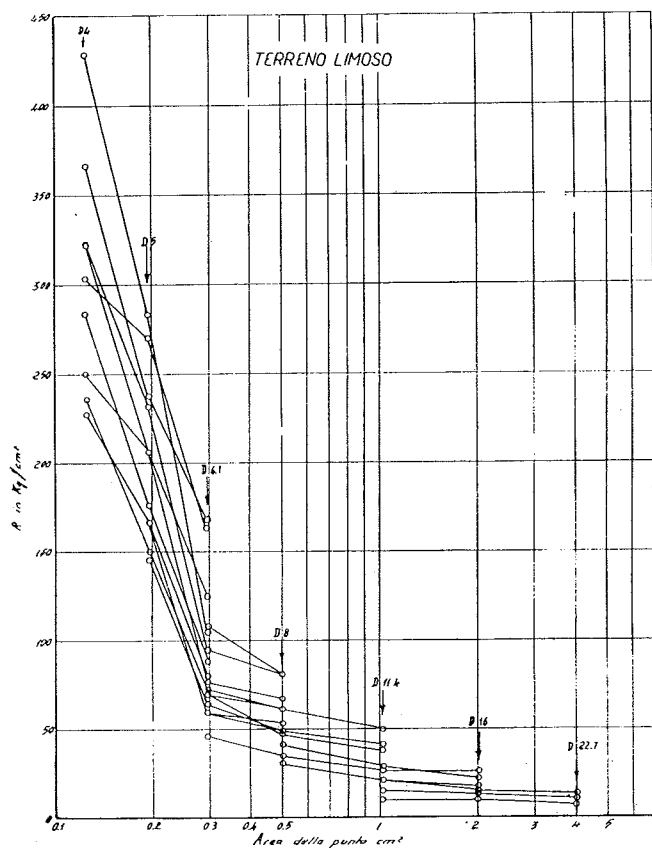


Fig. 10 - Influenza della dimensione dell'ago sui valori della resistenza alla penetrazione R.

conclusioni analoghe a quelle a cui noi siamo pervenuti. Le prove in questione sono consistite nell'affondare nel terreno, su cui è destinato ad operare il rullo, un modello di zampa in vera grandezza e nel misurare la resistenza alla penetrazione in funzione della penetrazione stessa. Le prove, eseguite con aree di appoggio variabili da un minimo di 40 cm² ad un massimo di circa 150 cm², hanno dimostrato che, indipendentemente dalla natura e dalla granulometria del terreno considerato, le dimensioni dell'area di appoggio, mentre non influiscono sensibilmente sulla resistenza alla penetrazione quando il contenuto di acqua del terreno è piuttosto elevato, si fanno invece risentire per contenuti di acqua più bassi nel senso che la resistenza alla penetrazione aumenta con il diminuire dell'area di appoggio.

Prove finali.

Al termine delle nostre indagini abbiamo eseguito una serie di prove di verifica e controllo di quanto si era constatato nello svolgimento delle indagini stesse. A tale scopo abbiamo preparato quattro provini del terreno limoso e quattro provini del terreno sabbioso, ciascuno costipato con un differente contenuto di acqua *w*. Dei vari parametri, singolarmente considerati innanzi, abbiamo mantenuto costante solo la velocità di penetrazione. Le prove sono state effettuate come prove « lente » nel senso innanzi chiarito. Si sono variati invece forma e dimensioni degli aghi e la resistenza alla penetrazione R è stata misurata in fun-

zione dell'affondamento per valori compresi fra 1 e 7 cm.

I risultati ottenuti sono raccolti nelle figg. 12 e 13. Essi confermano appieno quanto innanzi rilevato circa l'influenza dei differenti parametri sul valore della resistenza alla penetrazione.

Conclusioni

Dalla nostra indagine risulta che sulla resistenza alla penetrazione influiscono, in maniera più o meno marcata:

- a) la velocità di penetrazione;
- b) la profondità di affondamento;
- c) la forma dell'ago;
- d) il diametro dell'ago.

Risulta inoltre dalle prove che l'influenza dei parametri ora detti si risente in misura differente a seconda del tipo di terreno.

Alcuni sperimentatori, e fra questi PROCTOR, hanno fissato delle norme per quanto riguarda i primi due parametri innanzi considerati senza però fornirne alcuna particolare giustificazione. Al contrario, l'unico parametro, sulla cui influenza risultano riportati nella letteratura dati ed esperienze, è il diametro dell'ago.

Ciò considerato, le conseguenze da trarre dalle nostre indagini possono così riassumersi:

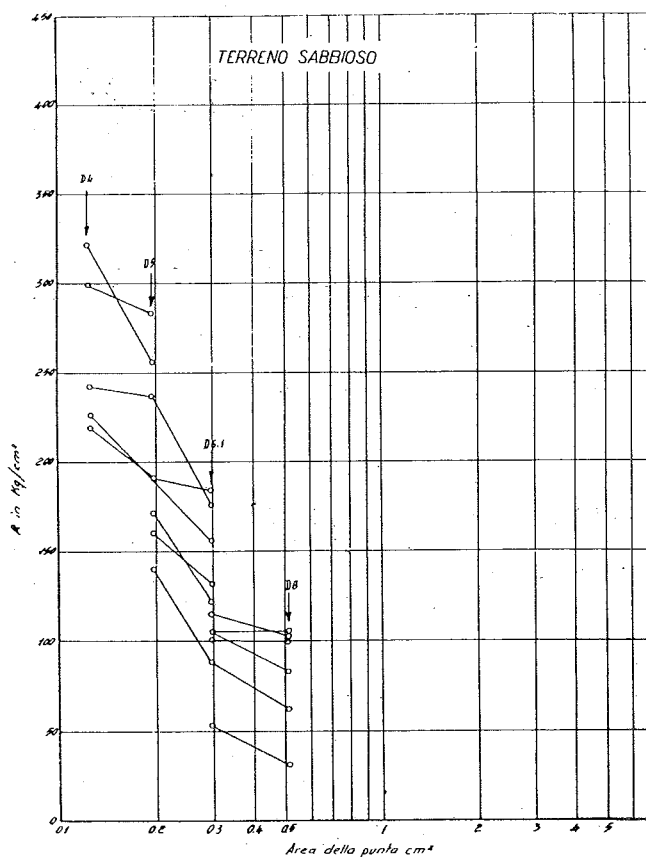


Fig. 11 - Influenza della dimensione dell'ago sui valori della resistenza alla penetrazione R.

———— aghi con testa
 ———— aghi senza testa

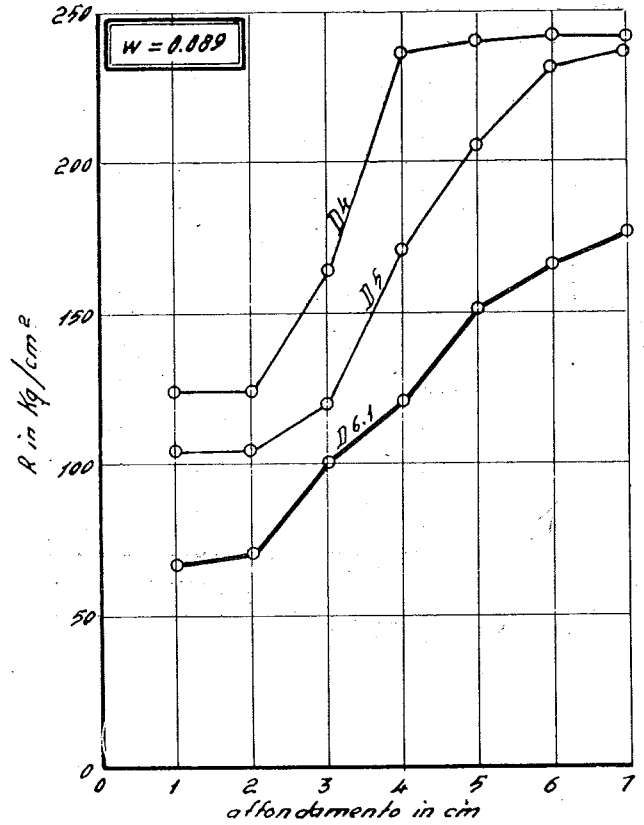
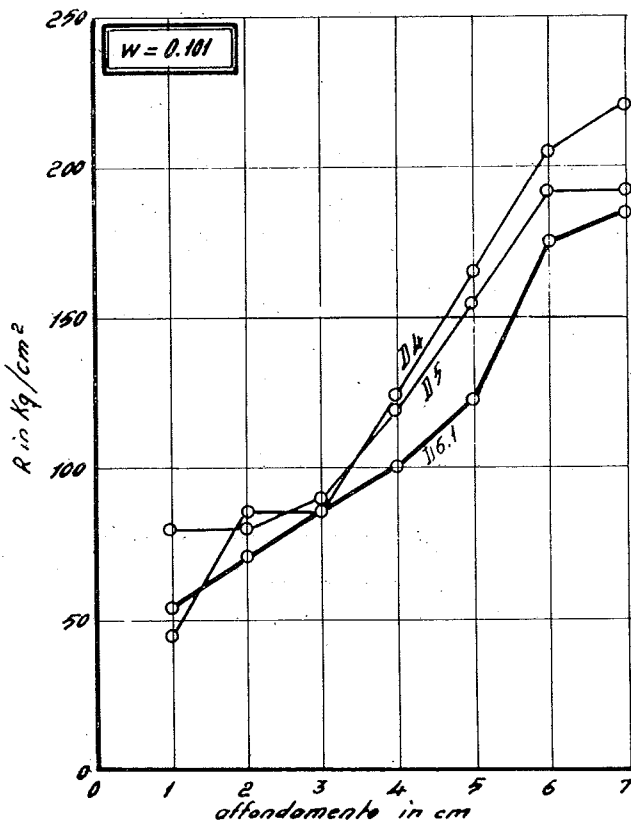
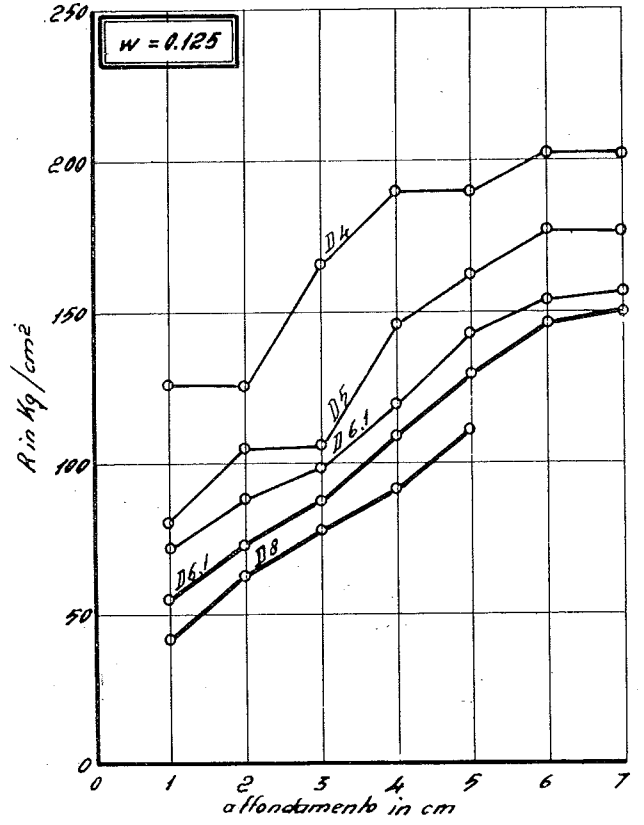
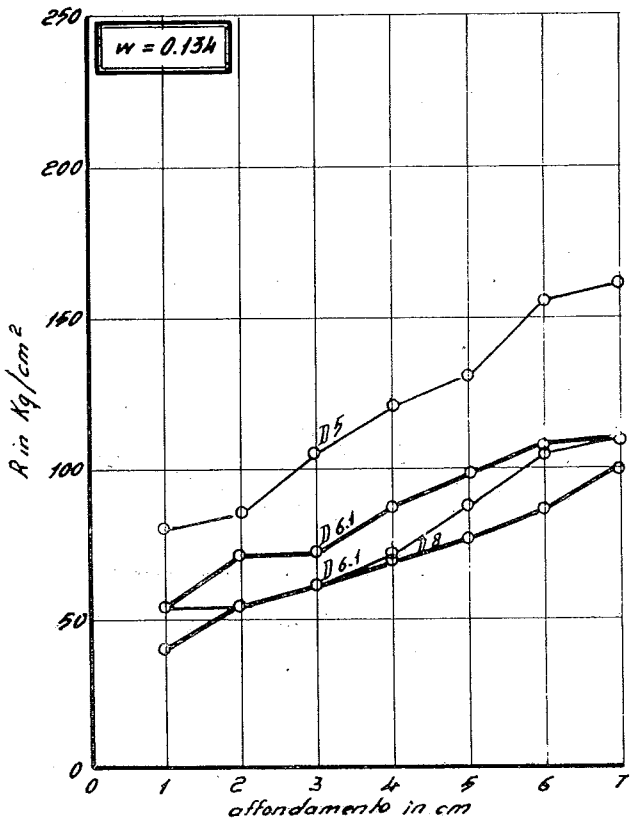


Fig. 12 - Prove finali su terreno limoso.

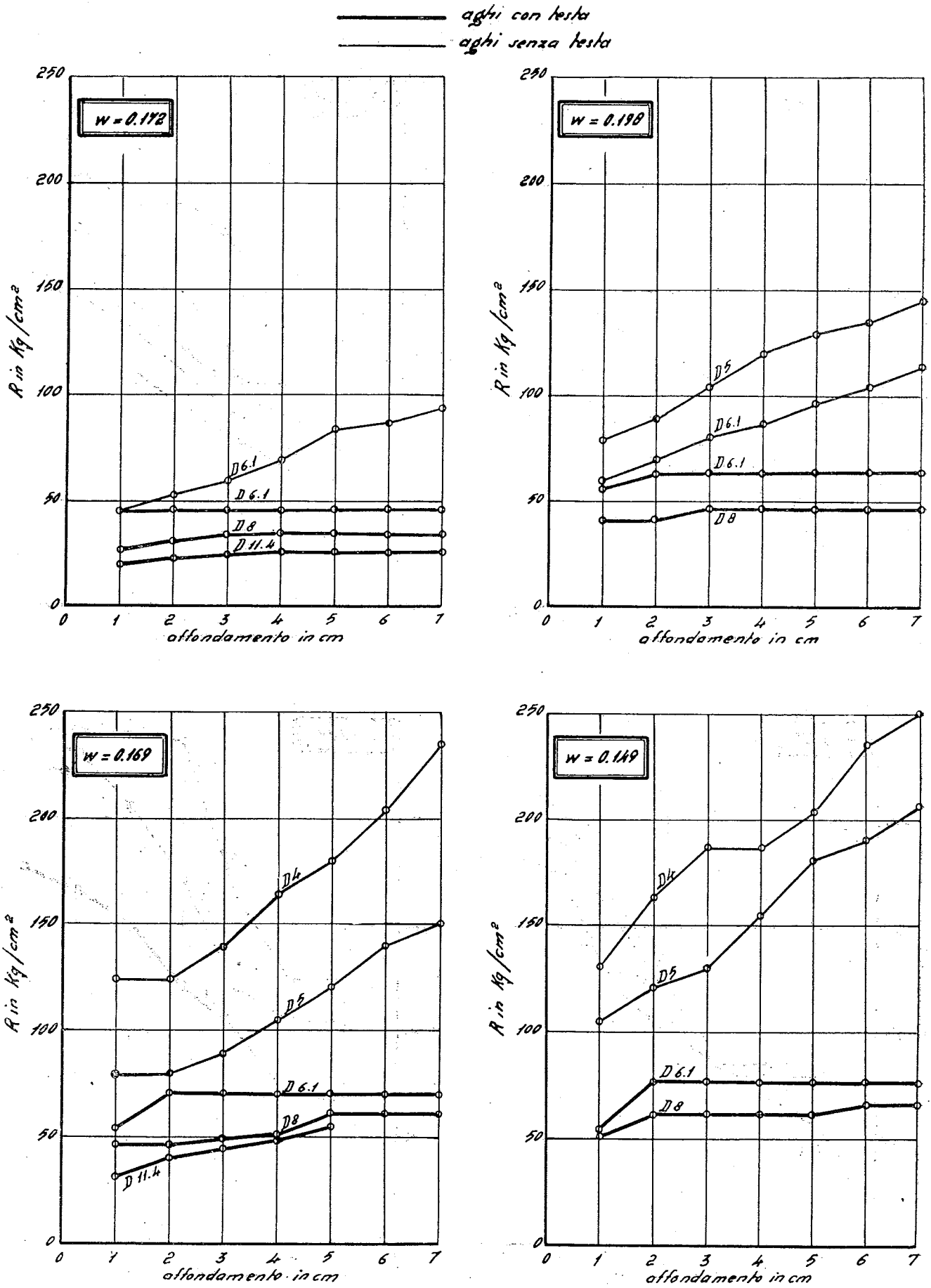


Fig. 13 - Prove finali su terreno sabbioso.

a) Convieni effettuare le prove con una velocità di penetrazione dell'ago pressochè costante. PROCTOR ha suggerito la velocità di 1/2 pollice al secondo; in pratica si potrà adottare la velocità di 1 cm/sec circa.

b) Convieni inoltre stabilire un valore determinato per la profondità di affondamento, che può essere quello generalmente adottato di 75 mm.

In sostanza questi due criteri non si discostano da quanto consigliato da PROCTOR.

c) Per quanto riguarda la forma dell'ago è risultato che, a seconda che l'ago è cilindrico a sezione costante ovvero presenta una testa alla sua estremità inferiore, il fenomeno che si determina nella prova di penetrazione ha caratteristiche molto differenti nel caso di terreni a grana fina. Pertanto sembra consigliabile adottare sempre lo stesso tipo di ago che, per ragioni pratiche, deve essere l'ago cilindrico di diametro costante.

d) L'argomento che ci pare più importante è però quello che riguarda la dimensione dell'ago. Per illustrare più chiaramente questo punto abbiamo riportato in fig. 14 una coppia di curve ($R; w$) per un materiale limoso ed una coppia di curve per un terreno sabbioso. Delle due curve di ciascuna coppia, l'una è stata rilevata adoperando una determinata serie di aghi e l'altra impiegando una serie di aghi con sezioni di base poco differenti da quelle dei corrispondenti aghi della prima serie (6).

Come si vede, per valori di w relativamente ridotti, lo scarto fra una curva e l'altra è notevole indipendentemente dal tipo di terreno. Aumentando w , mentre per il terreno sabbioso le due curve differiscono di poco, una sensibile differenza continua a manifestarsi nel caso di terreno limoso. Ne viene di conseguenza che, contrariamente a quanto di solito si presume, per uno stesso materiale non esiste una unica curva ($R; w$), ma tante curve per quante sono le serie di aghi che si possono adoperare. Pertanto è innanzitutto necessario indicare a fianco di ciascun punto della curva ($R; w$) le dimensioni dell'ago impiegato nella misura.

Come si è poi accennato nella premessa, nel corso della costruzione di un rilevato di terra la prova di penetrazione viene utilizzata per stabilire rapidamente il contenuto di acqua w , deducendolo dalla misura della resistenza R ed utilizzando la curva ($R; w$) di quel

materiale precedentemente rilevata in laboratorio. Di solito in laboratorio viene rilevata un'unica curva ($R; w$) impiegando aghi di differente diametro, per esempio la curva a) del secondo diagramma di fig. 14. Ne segue, per rimanere nell'esempio, che se in cantiere si è misurato per R un valore di 25 kg/cm² con ago ϕ 16, il contenuto di acqua w è in realtà pari a 0,175 ed invece si determinerebbe dalla curva a) un w di 0,205 commettendo così un errore non trascurabile nemmeno ai fini pratici. Perché il procedimento risulti

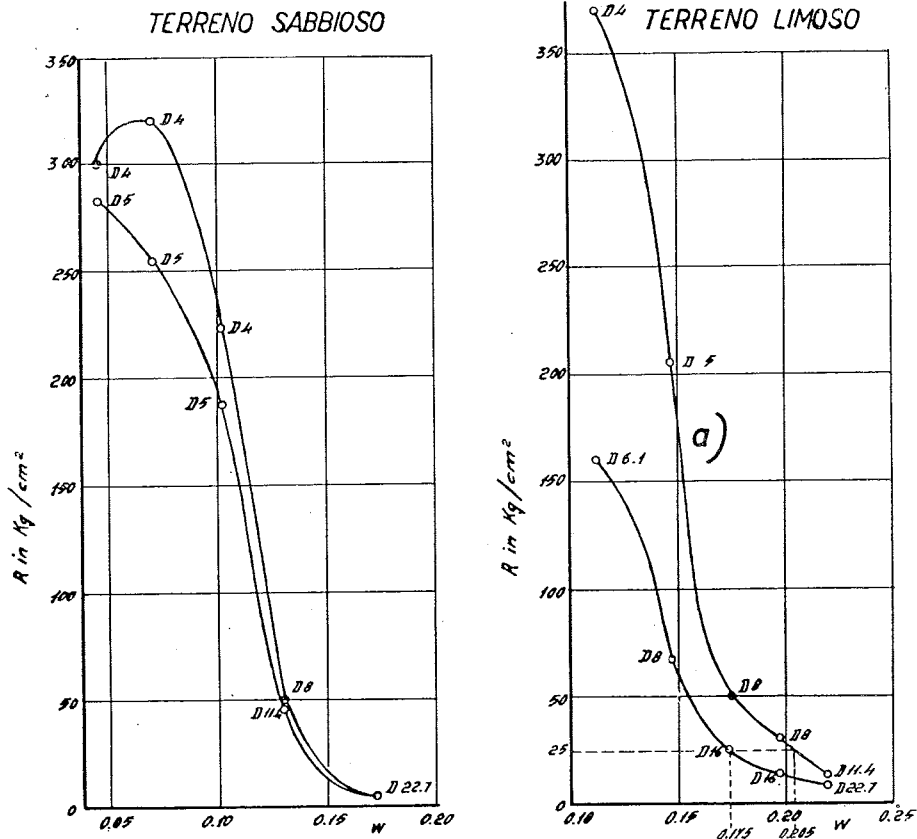


Fig. 14 - Curve ($R; w$) rilevate con serie di aghi di differenti diametri.

attendibile occorre perciò adoperare in cantiere lo stesso ago impiegato in laboratorio. A tal fine, invece di un'unica curva ($R; w$) occorrerebbe preparare in precedenza una curva per ciascun ago (valga come es. la fig. 15) ed in cantiere dedurre il valore di w dalla curva corrispondente all'ago adoperato.

L'approssimazione nel valore di w sarà in tal caso dipendente dall'errore che si può commettere nella determinazione stessa della R . Come vedemmo nelle pagine precedenti tale approssimazione è senz'altro accettabile nel campo dei valori di w che interessano la pratica (nell'intorno del w_{opt} abbiamo riscontrato al massimo un errore nel w di $\pm 0,005$) e diviene insufficiente solo per valori di w molto lontani dal w_{opt} .

In conclusione quindi riteniamo che la misura della resistenza alla penetrazione possa venire impiegata in cantiere per la determinazione rapida del w , purchè

(6) Il diametro dell'ago impiegato per il rilievo di ciascun punto è indicato a fianco del punto stesso.

sia stata costruita in precedenza la famiglia di curve per i differenti valori del diametro dell'ago. Considerati poi tutti gli altri parametri che possono influire sulla determinazione della R , non esclusa l'influenza personale dell'operatore che esegue la misura, rite-

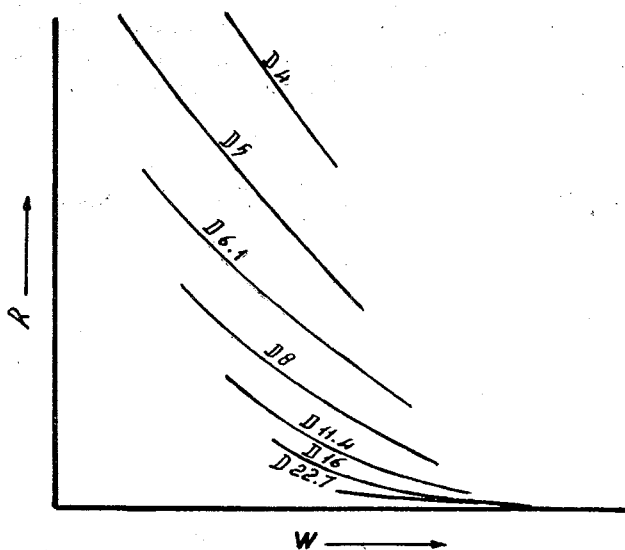


Fig. 15 - Curve (R ; w) rilevate su uno stesso campione con aghi di differente diametro.

niamo che sia preferibile far rilevare la famiglia di curve (R ; w) direttamente dal laboratorio di cantiere che in pratica dovrà utilizzarle. In tal modo infatti si potrà essere sicuri che tutte le operazioni verranno sempre eseguite allo stesso modo, sia in fase di costruzione delle curve (R ; w) sia nel corso della loro utilizzazione.

Bibliografia

- [1] CAPPER P. L. and CASSIE W. F.: *The Mechanics of Engineering Soils*. Mc Graw-Hill Book Company - New York, 1949.
- [2] CESTELLI GUIDI C.: *Meccanica del terreno e stabilità delle fondazioni*. Hoepli - Milano, 1951.
- [3] CREAGER J. H.: *Engineering for Dams* - Vol. III. John Wiley and Sons - New York, 1944.

SOMMAIRE: Cet article présente les résultats d'un certain nombre d'essais concernant la technique de la mesure de la résistance à la pénétration de l'aiguille PROCTOR.

Il résulte que la vitesse et la profondeur d'enfoncement, la forme et le diamètre de l'aiguille influent plus ou moins remarquablement sur la valeur de la résistance à la pénétration.

L'influence de ces paramètres varie avec la nature du sol. Il semble aussi qu'on ne puisse pas établir une relation entre la résistance à la pénétration R et la teneur en eau w indépendamment des autres paramètres.

Il faut tenir compte de ce résultat lorsque on veut utiliser sur les chantiers la relation (R , w) pour une rapide détermination de la teneur en eau.

- [4] DERVIEUX M. S.: *Le compactage des sols*. Ann. Inst. Techn. - Aprile-maggio 1952.
- [5] ESCARIO J. L. and JIMENEZ SALAS J. A.: *Routine Practice for Soil Tests in the Road and Road Construction Laboratory in Madrid*. Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. III - Rotterdam, 1948.
- [6] HOGENTGLER C. A.: *Engineering Properties of Soils*. Mc Graw-Hill Book Company - New York, 1937.
- [7] JENKINS H. T.: *Soil Mechanics Laboratory Manual*. Comstock Publishing Company - New York, 1947.
- [8] JOHNSON S. J. and W. G. SHOCKLEY: *Field Penetration Tests for Selection of Sheepfoot Rollers*. Proc. Am. Civ. Engr. - Vol. 79 Sep. n. 363 - Dic. 1953.
- [9] KRYNINE D. P.: *Soil Mechanics*. Mc. Graw-Hill Book Company - New York, 1947.
- [10] MALLET C. et PACQUANT J.: *Les Barrages en Terre*. Eyrolles - Paris, 1951.
- [11] NATIONAL RESOURCES COMMITTEE: *Low Dams*. U. S. Gov. Printing Office - Washington, 1939.
- [12] PARAMYTHIOTI J. et DE LA SAYETTE E.: *Le Compactage des Sols* - La Technique Moderne - Construction. Paris, T. V. n. 7 luglio 1950.
- [13] PROCTOR R. R.: *Design and Construction of Rolled - Earth Dams*. Engng N. Rec. - 31 ag.; 7, 21, 28 sett. 1933.
- [14] PROCTOR R. R.: *Military Airfields*. Proc. Amer. Civ. Engr Vol. 110, 1945.
- [15] PROCTOR R. R.: *Laboratory Soil Compaction Methods Penetration Resistance Measurements, and the Indicated Saturated Penetration Resistance*. Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering - Vol. V - Rotterdam, 1948.
- [16] SAPIO G.: *Sulle prove di costipamento in laboratorio - Essiccamento dei campioni*. Geotecnica 1954, fasc. 2.
- [17] TAYLOR D. W.: *Fundamentals of Soil Mechanics*. John Wiley and Sons - New York, 1948.
- [18] TSCHBOTARIOFF G. P.: *Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures*. Mc. Graw-Hill Book Company - New York, 1951.
- [19] TURNBULL W. I.: *Written Discussion on Paper IX b 17*. Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering - Vol. VI, Rotterdam, 1948.
- [20] U.S.B.R.: *Earth Manual*. United States Department of the Interior, Denver, Colorado, 1951.

SUMMARY: This article deals with an experimental investigation concerning the PROCTOR penetration resistance test.

On the ground of the experiments carried out by the A. it appears that the results of the penetration resistance test are more or less affected by a number of factors such as the rate and the depth of penetration, the shape and the size of the needle. Furthermore the test results show that the influence of the above mentioned parameters varies with soil nature.

Particularly it seems that a unique relationship between the penetration resistance R and the water content w independently of the other parameters cannot be admitted. This result should be taken into the right account when, in field control of the placement moisture, the penetration curve is used for a rapid determination of water content.