

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA
 QUINTO CONVEGNO DI GEOTECNICA

Palermo, Marzo 1961

INTERPRETAZIONE DI CEDIMENTI ANORMALI
 DELLA FONDAZIONE DI UN ALTO TERRAPIENO STRADALE

PREVISIONI E CONTROLLO DEL LORO COMPLETAMENTO

G. MEARDI (*)

SOMMARIO: Si dà notizia degli studi eseguiti in seguito al verificarsi di un notevole, rapido ed inconsueto cedimento del terreno di fondazione di un terrapieno di accesso ad un manufatto stradale, soprattutto per rendersi conto della parte di cedimento che era ancora da attendersi, e del programma più opportuno dei lavori per non ritardare troppo il termine di esecuzione, evitando nel contempo i danni di forti cedimenti ad opere ultimate.

Lo studio, eseguito in base ai risultati di prove geotecniche in sito (prove penetrometriche) ed in Laboratorio ha dato risultati soddisfacenti, per cui è stato esteso ai numerosi manufatti e terrapieni di tutto il lotto di lavoro. Si informa dei criteri seguiti per semplificare il lavoro utilizzando quando possibile lo studio del primo manufatto, dei risultati ottenuti e del controllo con i cedimenti effettivamente prodottisi.

1 - Premesse

Durante la costruzione dell'autostrada Brescia-Padova in corrispondenza del cavalcavia di una strada comunale, si notò un notevolissimo cedimento delle pile e delle spalle del manufatto. Uno dei terrapieni di accesso, alto 6 m sul piano di campagna, era stato ultimato da un mese; il secondo era in via di esecuzione ed il terrapieno dell'autostrada, alto 3 m sul piano di campagna, era stato da poco ultimato. I cedimenti rilevati furono di 86,7 cm per la testata del terrapieno ultimato, di cm 48,4 - 29,0 - 22,8 per le pile intermedie, di cm 23,4 per il terrapieno parzialmente eseguito.

Il valore così inconsueto e rapido dei cedimenti, l'incertezza su quello che sarebbe ancora avvenuto e il fatto che numerose altre opere di tipo analogo dovevano essere eseguite nella zona, impose uno studio urgente ed accurato del fenomeno.

2 - Indagini eseguite

Si dispose in primo luogo per l'esecuzione di numerosi sondaggi con campionamento indisturbato dei terreni coerenti e di ancor più numerose prove penetrometriche allo scopo di prevedere quello che sarebbe successo ancora. Si dispose inoltre un accurato rilievo dei cedimenti nel tempo.

Il penetrometro impiegato è quello dinamico, con diametro in punta di 51 m/m, mazza di 73 Kg,

volata 75 cm; l'asta che trasmette i colpi alla punta, del diametro di 34 m/m, è protetta dal contatto del terreno circostante mediante tubazione di rivestimento diametro 48 m/m. E' stato impiegato questo penetrometro perché è quello che da oltre cinque anni viene usato dal *Laboratorio Geotecnico* dell'Istituto di *Scienza delle Costruzioni* del Politecnico di Milano, ed ha quindi permesso, attraverso l'esame di molte centinaia di lavori, di raccogliere una discreta esperienza.

Il campionamento indisturbato venne fatto con campionatore normale contenente una fustella porta campione del diametro di 100 m/m.

La planimetria del cavalcavia con la posizione delle prove penetrometriche sono indicati, un poco riassunti, nelle Figg. 1a ed 1b. Di fianco ai sondaggi sono indicati i risultati delle prove geotecniche eseguite sui campioni coerenti.

Il terreno è di natura varia con grande prevalenza di limo, talvolta argilloso, talvolta sabbioso. Sono frequenti strati e straterelli di sabbia, generalmente sporca, qualche volta con ghiaietto. E' frequente la presenza di torba, generalmente diffusa, qualche volta invece sotto forma di piccoli strati o di lenti. Alle maggiori profondità, cioè oltre i 20 metri sotto il piano di campagna precedente ai lavori, si trova la sabbia, più o meno limosa.

Per avere un quadro sufficiente e dettagliato della stratificazione, i campioni prelevati sono stati numerosi. Le prove di Laboratorio più lunghe e costose furono eseguite, per evidenti ragioni economiche, sui campioni caratteristici; mentre quelle più semplici (umidità), o sommarie (resistenza al taglio misurata con piccolo « *vane test* » durante l'apertura e l'ispezione di ogni campione) vennero eseguite su quasi tutti,

(*) Prof. Ing. Guglielmo MEARDI, libero docente di *Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni in Terra* presso l'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Milano.

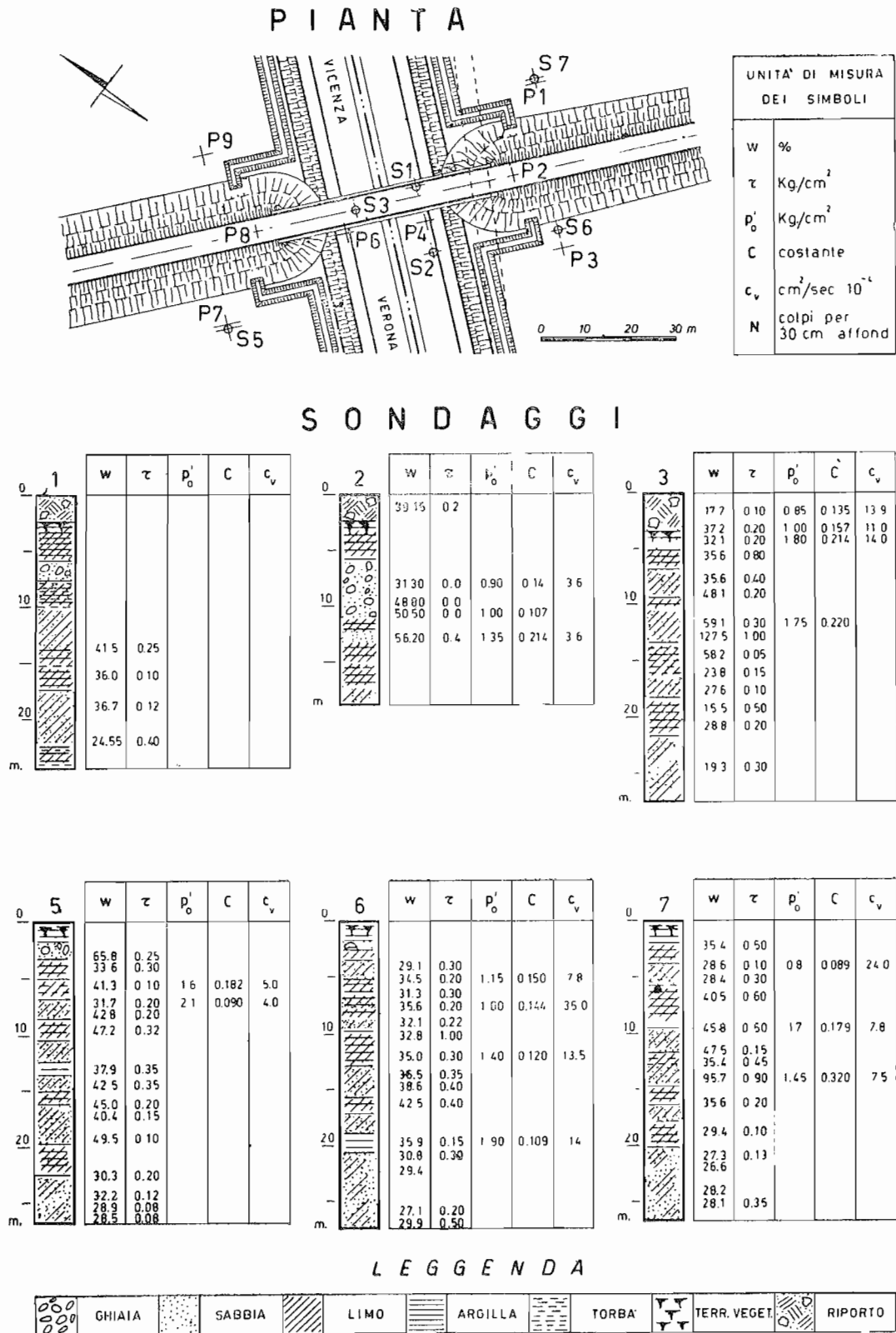


Fig. 1a - Cavalcavia Menarotto.

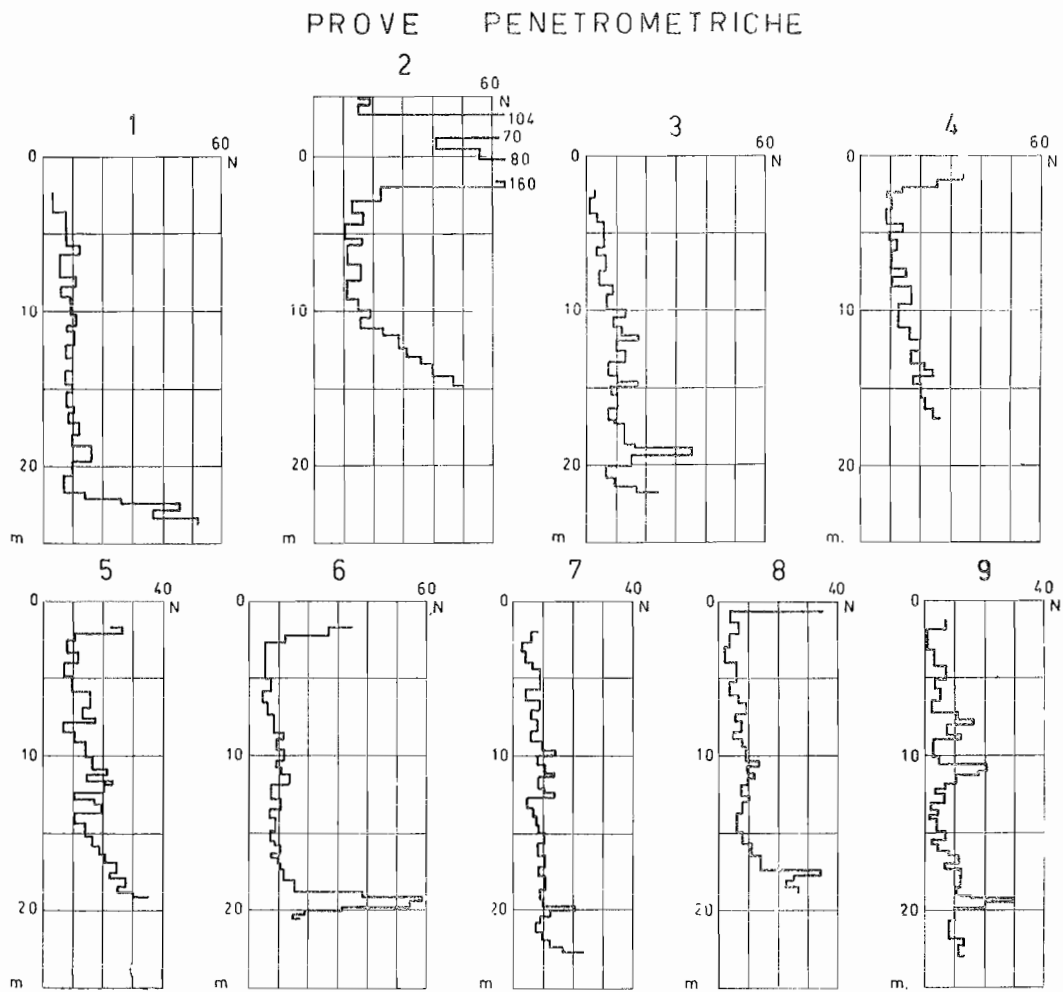
Per maggiore chiarezza si ritiene opportuno indicare le unità di misura ed il significato dei simboli che vengono adoperati:

w = umidità in percento del peso secco

τ = (kg/cm²) resistenza al taglio

p'_o = (kg/cm²) pressione di preconsolidamento in sito

C = costante di compressibilità



CEDIMENTI NEL TEMPO

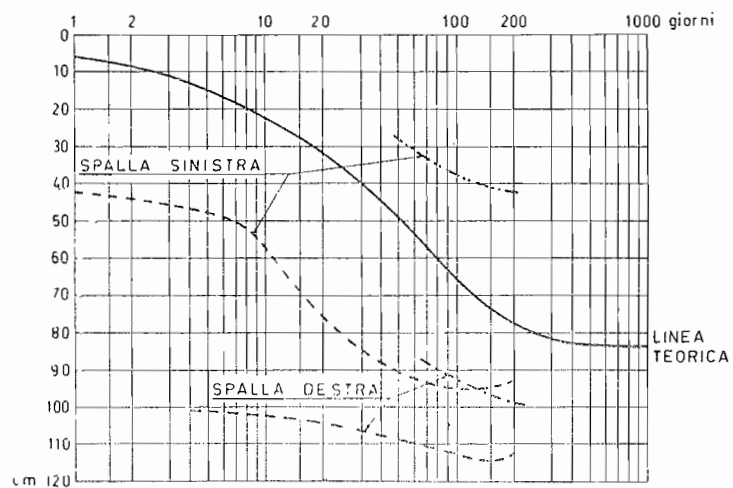


Fig. 1b - Cavalcavia Menarotto.

c_v :: (cm²/sec) coefficiente di consolidamento

$2H$ = (m) spessore di strati impermeabili compresi tra strati permeabili

N = colpi per affondamento di 30 cm della punta del penetrometro

z = (m) profondità degli strati

Δh = assestamento dello strato di spessore h

z' = (m) profondità del terreno incompressibile

3 - Calcolazioni eseguite

La prima calcolazione fu quella di verifica della stabilità di base del rilevato. Questo è alto 6 m e largo pure 6 m in sommità. Carico massimo al centro della base 1,2 kg/cm². La resistenza al taglio del terreno, nel primo strato limoso di 2 ÷ 3 metri dopo il terreno vegetale, è di 0,2 ÷ 0,4 kg/cm², mentre negli strati inferiori è generalmente più elevata;

il coefficiente di consolidamento c_v . Si ottennero i valori indicati nelle stratigrafie, che poco differiscono da un campione all'altro, e si procedette così con valori medi al calcolo della compressibilità totale e nel tempo. Per quanto riguarda lo spessore dello strato impermeabile compreso tra due strati permeabili, si scelse lo spessore di 2 m che anch'esso è sembrato interpretasse bene la stratificazione media.

	w	τ	p'_0	C	c_v
0	46.1	0.12			
	43.4	0.6	0.65	0.15	37.5
	33.3	0.45			
	44.6	0.80	1.30	0.178	42.0
10	36.3				
	39.8				
	24.3				
	19.9				
20	36.4	0.70			
	24.4	0.75			

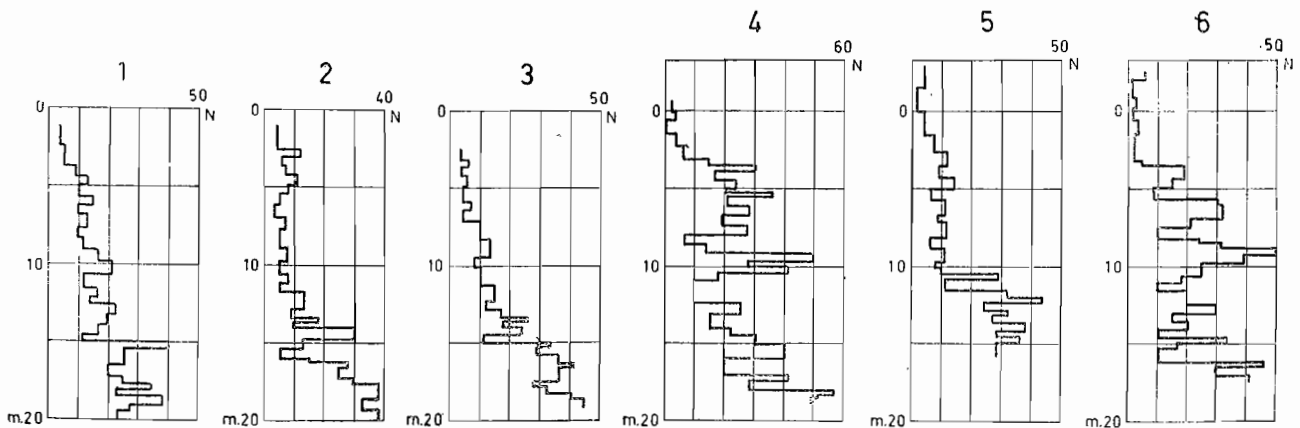
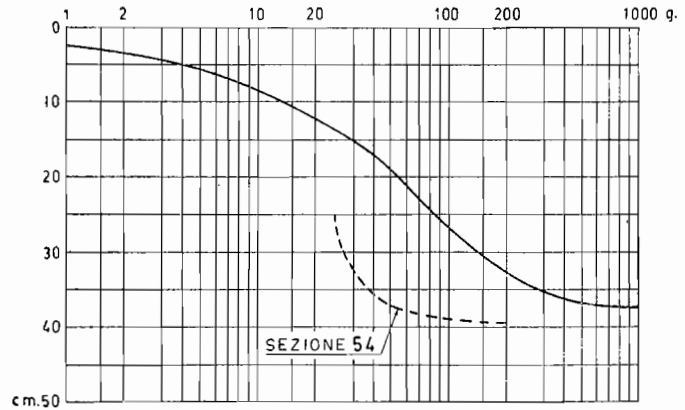


Fig. 2 - Ponte Alpone.

la sabbia ad essi intervallata ha una resistenza minima alla penetrazione di 5 ÷ 10 colpi per affondamento di 30 cm. Dato il modesto spessore della parte più tenera e il fatto che essa è a contatto con strati sabbiosi rapidamente drenanti, la stabilità contro il rifluimento è assicurata. I cedimenti avvenuti non sono quindi di rifluimento.

Escluso il pericolo del rifluimento, le prove più importanti da studiare sono evidentemente quelle di compressibilità e pertanto i campioni scelti furono sottoposti a prove edometriche complete ed accurate, rilevando cioè non solo l'assestamento totale, ma anche quello nel tempo, in modo da poter ricavare la pressione di preconsolidamento p'_0 , il coefficiente C della formula di compressibilità $\Delta h = hC \cdot \lg(p_2 : p_1)$ valevole quando p_1 non è minore di p'_0 e

Vennero adottati i seguenti coefficienti medi:

	C	p'_0	$c_v \cdot 10^4$	2 H
— 0	0,135	0,75	7	2
— 5	0,15	0,75	7	2
— 10	0,178	1,00	7	2
— 15	0,32	1,50	7	2
— 20	0,16	2,00	7	2
$z' = -21,50$				

Nel calcolo si trascurarono i cedimenti dei terreni sabbiosi poco compressibili compresi fra quota 0 e quota -21,50 e quelli dei terreni a profondità maggiore di 21,50 m sia perché costituiti anch'essi in genere da terreni sabbiosi, sia perché anche la modesta parte più compressibile, essendo situata a profondità maggiore della larghezza del terrapieno, non avrebbe influenzato sensibilmente il fenomeno.

Il calcolo delle pressioni unitarie alle varie profondità, al centro ed ai lati del terrapieno, venne eseguito con le tabelle ricavate dalla teoria di BOUSSINESQ, tenendo quindi conto non solo della larghezza del terrapieno, ma anche dei suoi limiti in lunghezza.

Qui, per brevità, si riferisce solo sui cedimenti della parte centrale, vicino alla testata.

I cedimenti vennero calcolati col metodo indicato da TERZAGHI e PECK (*Soil Mechanics in Engineering Practice* - 1948 pag. 61 e segg.) trascurando sia il cedimento «immediato» dato il modesto spessore degli strati compressibili, che quello «secondario» perché modesto e non influente per il primo studio.

Si ottennero così per il centro del terrapieno i seguenti valori:

$$\Delta h \text{ tot.} = 0,83 \text{ m}$$

50%	di cedimento nel tempo	33"
70%	»	» 66"
90%	»	» 140"

I dati ottenuti furono, come ben si vede, rassicuranti perché lasciavano sperare che il fenomeno dell'assettamento fosse ormai alla fine; non restava che da controllare con rilievi topografici la corrispondenza dell'andamento dei cedimenti previsti con quelli misurati.

Neila Fig. 1b sono indicati per le due spalle, sia i diagrammi dei cedimenti previsti nel tempo, essendo questo rappresentato in scala logaritmica (diagramma a linea continua), che quelli dei cedimenti misurati (diagrammi a tratto e punto). La spalla sinistra era stata caricata solo parzialmente.

Ho già altra volta osservato che il diagramma logaritmico permette meglio, con la sua forma ad S, il confronto tra il diagramma calcolato e quello effettivo.

	w	τ	p'_0	C	c_v
0					
40.2	0.20	0.60	0.127	7.5	
	0.12				
139.5		0.60	0.16	8.3	
37.2	0.10				
26.0	0.60				
27.4	0.30	1.00	0.083	11.6	
27.2	0.25				
20.0					
23.5	0.40				
27.2					
20					
23.3					

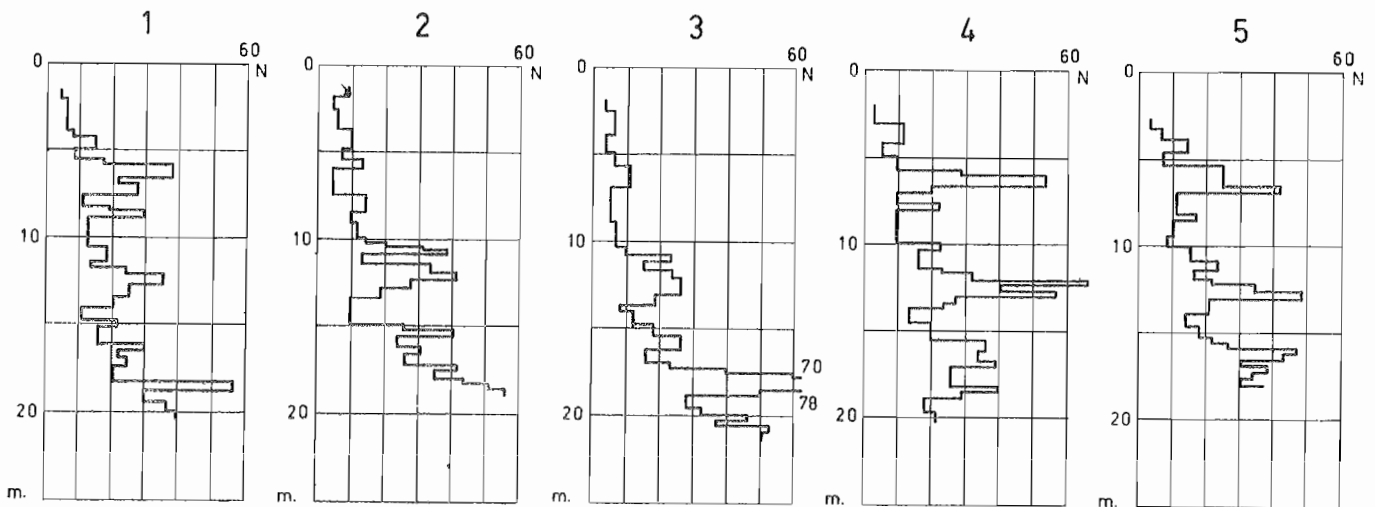
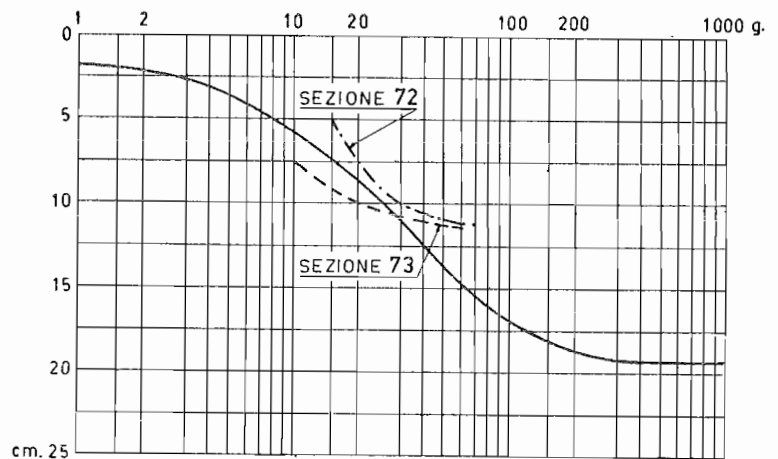


Fig. 3 - Ponte Aldegà.

I diagrammi dei cedimenti misurati sono stati disegnati tenendo presente che i rilievi vennero iniziati dopo un mese dall'ultimazione del carico, e che per effettuare il carico si erano impiegati 60 giorni. Questi 60 giorni furono ritenuti equivalenti a 30 giorni di carico massimo.

I diagrammi dei cedimenti reali seguono abbastanza bene con il loro andamento quello teorico e soprattutto concordano nella valutazione del tempo

poi tolto per dare corso alla costruzione del manufatto.

4 - Estensione delle indagini al resto del lavoro

Il risultato raggiunto dagli studi fu giudicato soddisfacente e pertanto fu deciso di estenderne l'applicazione ai tratti rimanenti di 2 lotti consecutivi di

	w	τ	\bar{p}'_0	C	C_v
0	50.8	0.22	1.4	0.13	80.0
	50.4	0.40			
	32.9	0.40			
	54.7	0.40	0.7	0.157	4.3
	21.3	0.80			
10	25.0	0.60			
	25.1	0.30	1.2	0.075	13.5
	27.7	0.20			
	23.1	0.35			
	27.3	0.10	1.7	0.140	17.7
	29.6	0.50			
20	26.6				
	27.3				
	30.6	0.25			
	31.0	1.20			
	19.0	1.20			
m.					

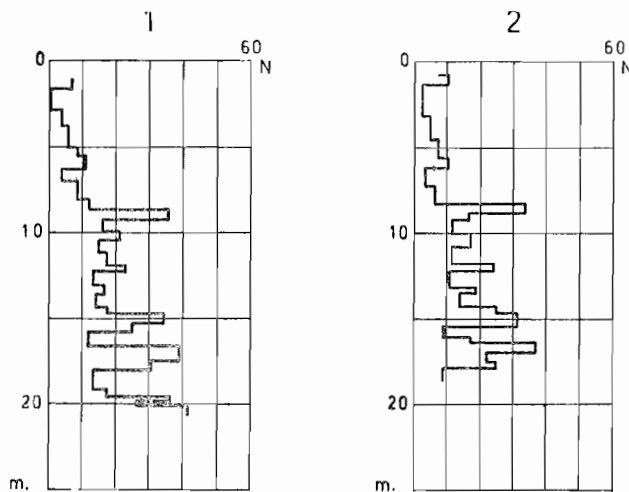
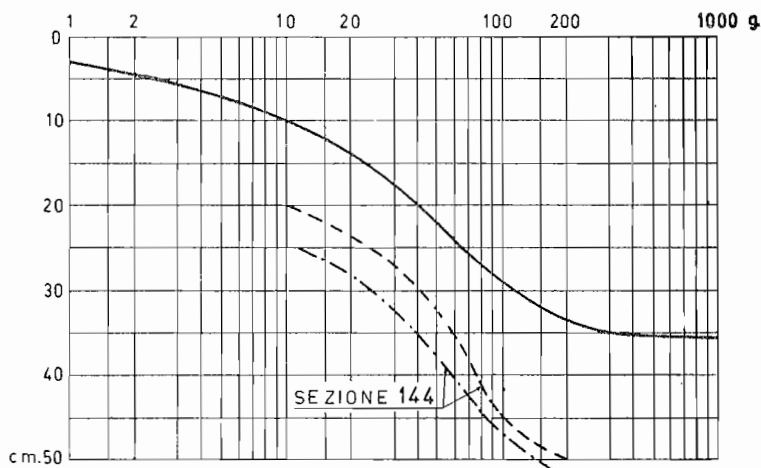


Fig. 4 - Ponte Chiampo.

necessario a raggiungere il 90% del cedimento primario totale, così da rendere possibile lo stabilire un programma per il completamento delle opere che possa evitare i danni conseguenti a notevoli cedimenti producentisi su opere ultimate.

Con linee a trattini sono riportati i diagrammi dei cedimenti dovuti ad un carico fatto in più in corrispondenza del manufatto per provocare sotto le pile e spalle un cedimento uguale a quello che avrebbe provocato il manufatto. Il carico è stato

autostrada dove i lavori non erano ancora stati eseguiti od erano stati appena ultimati. Non si ritenne necessario di estendere lo studio con la stessa abbondanza di prelievi, di rilievi e di prove, ma si cercò di usufruire per analogia degli studi effettuati per il manufatto esaminato.

Si eseguirono pertanto lungo il lotto numerose prove penetrometriche, rapide e poco costose, nei tratti dove il terrapieno autostradale aveva un'altezza sensibile e con maggiore frequenza nei terreni

interessati dai manufatti. Poiché le prove penetrometriche vanno interpretate in modo diverso a seconda che si tratti di terreni sabbio-ghiaiosi o di terreni limo-argillosi, si eseguì inoltre qualche sondaggio con qualche prova geotecnica di Laboratorio per ottenere ancora qualche dato sulla natura dei terreni e sulla loro compressibilità.

La natura dei terreni, varia, è sufficientemente corrispondente a quella del terreno del Cavalcavia

Negli strati inferiori prevale ancora la sabbia, più o meno limosa.

I sondaggi, le prove penetrometriche ed il diagramma dei cedimenti di ogni singola opera sono rappresentati nelle Figure 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

L'esame delle prove penetrometriche ha dato luogo ad interessanti constatazioni. Si è notato primieramente come esse siano sensibili all'assestamento dei terreni prodotto da carichi; ciò risulta in modo chia-

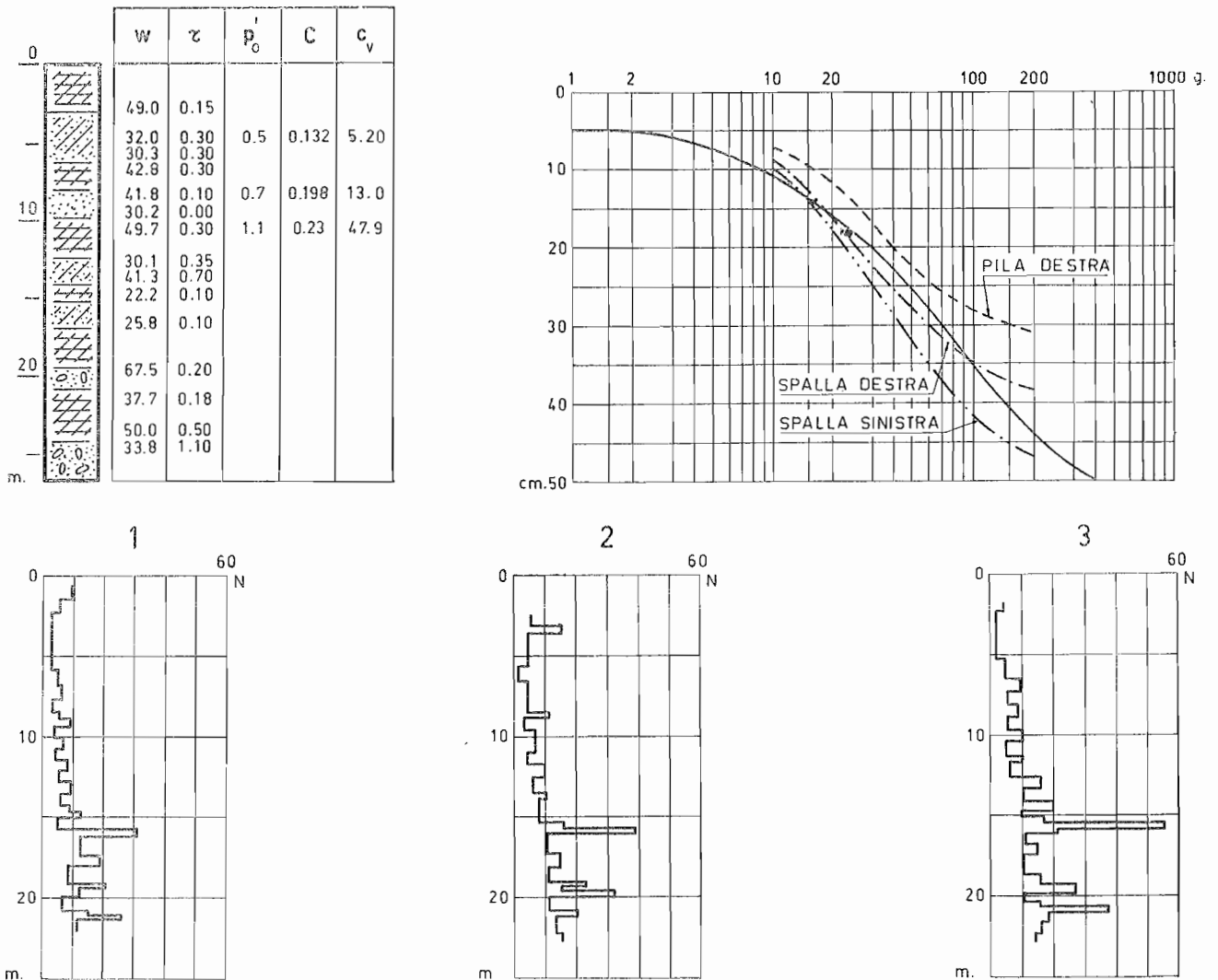


Fig. 5 - Cavalcavia Dovaro.

Menarotto, salvo che per il ponte sul Guà, dove si ha prevalenza di ghiaia e sabbia (il sondaggio è stato effettuato in corrispondenza di un argine del torrente e questo può spiegare lo spessore notevole dello strato superficiale di ghiaia e sabbia). Gli altri terreni hanno la solita prevalenza di limo talvolta argilloso, più frequentemente sabbioso, alternato a strati di sabbia e ghiaietto. E' ancora presente la torba, generalmente diffusa e qualche volta sotto forma di vere e proprie lenti.

rissimo dall'esame delle prove eseguite in corrispondenza del primo cavalcavia (vedi ad es. Fig. 1b prova penetrometrica 2), che danno resistenze alla penetrazione del terreno sotto il rilevato, indiscutibilmente maggiori di quelle dei terreni scarichi ai lati del rilevato, mentre la natura dei terreni non è cambiata se non in modo del tutto trascurabile. Analogamente si nota che per il ponte Alpone ed il ponte Guà (Fig. 2 e Fig. 7) le prove penetrometriche in corrispondenza degli argini già esistenti,

facilmente distinguibili perché cominciano da una quota più alta, hanno dato compattezze ben maggiori di quelle eseguite nella campagna immediatamente adiacente.

Alcune prove penetrometriche mettono in evidenza la selezione del materiale depositato lungo un corso d'acqua (il materiale fine viene trasportato lontano e viene depositato solo il materiale più grosso e volumetricamente più denso); infatti le prove penetrometriche più vicine al corso d'acqua, hanno dato di solito per profondità modeste resistenze sensibilmente maggiori di quelle della campagna adiacente.

Ma soprattutto le prove ci hanno indicato in modo molto chiaro lo spessore e la quota del terreno soffice molto compressibile, ed anche, sia pure grossolanamente, il grado di compressibilità, dove non erano state eseguite prove edometriche, per confronto con quelli provati.

Con questi accorgimenti vennero scelti i coefficienti più probabili per i calcoli di compressibilità sia totale che nel tempo.

I coefficienti adottati furono i seguenti:

	C	p'_0	$C_v \cdot 10^4$	2H	z'
Alpone	0,16	1	15	3,50	— 8
Aldegà	0,16	1	15	2,50	— 8
Chiampo	0,16	1	15	3	— 8
Fra Chiampo e Menarotto	0,20	1	10	3	— 12
Dovaro	0,20	1	10	3	— 16
Statale n. 11	0,13	1	20	3,50	— 24
Guà	0,13	1	20	3,50	— 8
Tra Guà e fine lotto	0,13	1	20	3,50	— 12

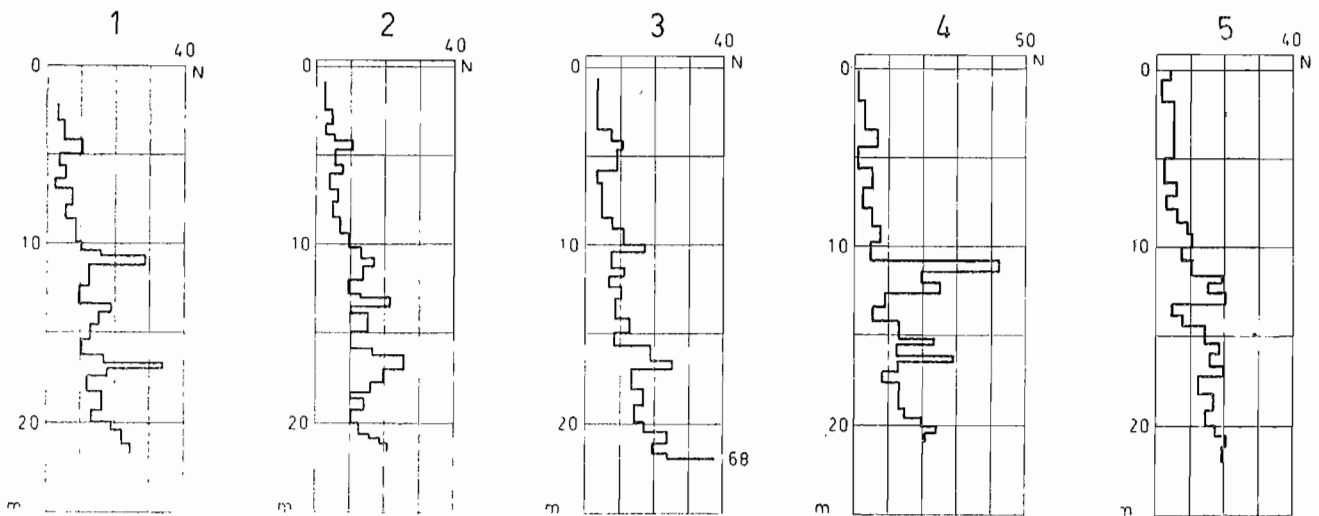
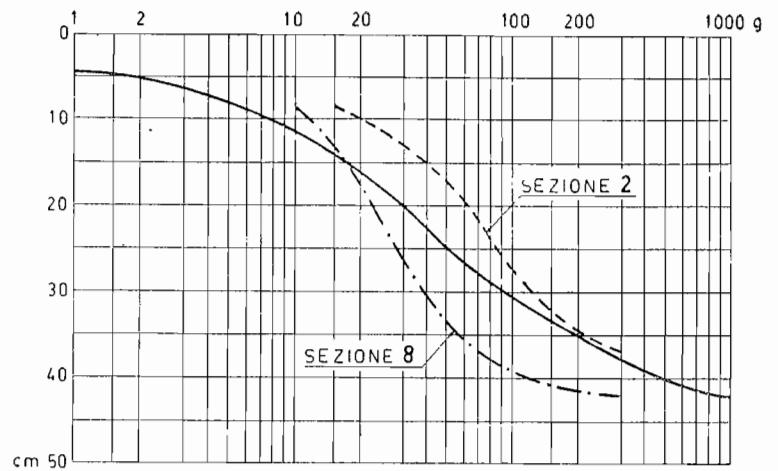
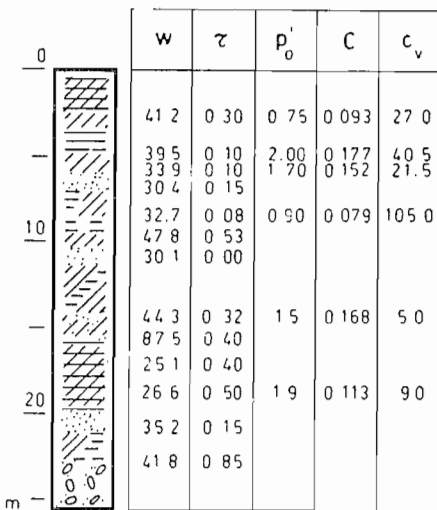


Fig. 6 - Cavalcavia S.S. n. 11.

Si ottennero così per il centro del terrapieno i seguenti valori:

Cedimenti totali

Altezza dei rilevati	m	1	2	3	6	9
Alpone	cm	6,8	10,8	18,8	36,5	49,1
Aldegà		6,8	10,8	18,8	36,5	49,1
Chiampo		6,8	10,8	18,8	36,5	49,1
Fra Chiampo e Menarotto		9,8	16,3	26,5	49,9	67,1
Dovaro		15,2	25,4	40,6	72,2	101,7
Statale n. 11		12,3	21,3	33,1	61,3	83,1
Guà		5,5	8,7	15,3	29,7	39,9
Tra Guà e fine lotto		8,0	13,3	21,6	40,3	54,5

Tempi di consolidamento (giorni)

Percentuale di cedimento	50%	70%	90%
Alpone	46	93	200
Aldegà	24	47	101
Chiampo	34	68	146
Fra Chiampo e Menarotto	51	102	220
Dovaro	51	102	220
Statale n. 11	35	70	150
Guà	35	70	150
Tra Guà e fine lotto	35	70	150

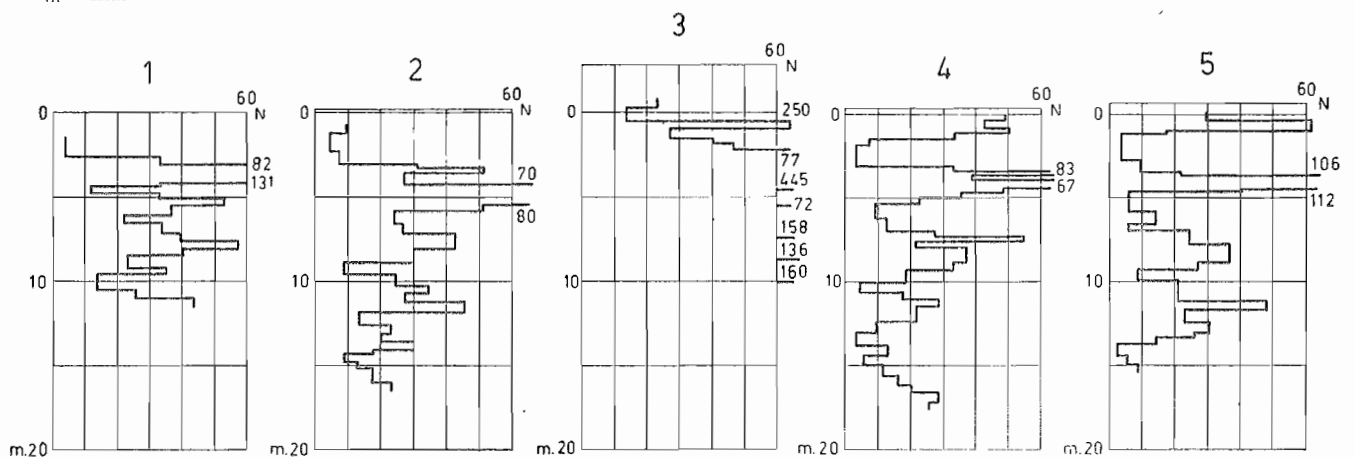
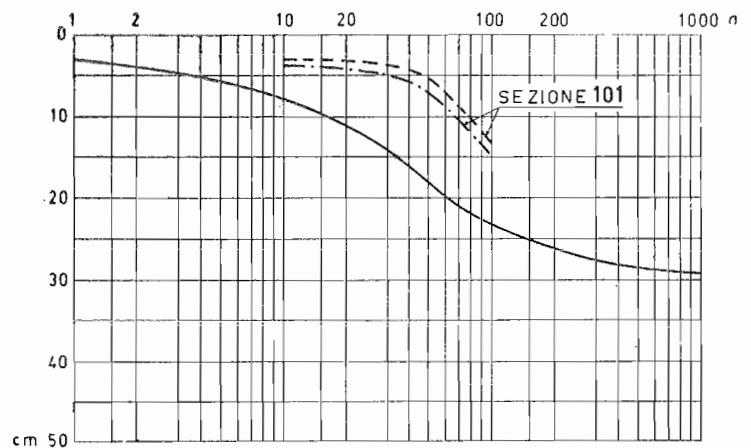
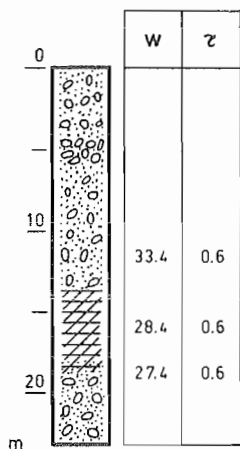


Fig. 7 - Ponte Guà.

In base ai risultati ottenuti si procedette ai lavori col criterio di eseguire i terrapieni per intero e di lasciarli assestare per il numero di mesi risultato dallo studio, necessario per ottenere che fosse

realizzato almeno l'80% dell'assestamento totale, prima di provvedere al completamento della massicciata.

Per accelerare l'assestamento sarebbe stato preferibile evidentemente, come in altri casi è stato fatto,

caricare il terreno con un peso maggiore del peso definitivo; ma la zavorra per il carico non poteva essere eseguita che con grandi quantitativi di altra terra e non era conveniente aumentare di molto la spesa per il prelievo dalle cave di prestito. Questo metodo avrebbe permesso di ottenere un assestamento uguale a quello totale del carico di progetto, ma il vantaggio sarebbe stato troppo costoso; è stato quindi deciso di lasciare che una parte del cedimento avvenisse ad opera ultimata,

controllato con quello previsto in modo da rettificare i calcoli zona per zona e da rinviare od anticipare il periodo di ripresa dei lavori. Così, per esempio, esaminando i cedimenti si nota che i terrapieni dei manufatti sull'Alpone, sull'Aldegà, sul Dovaro, sulla S.S. n. 11, tra Chiampo e Menarotto e alle fine lotto, hanno raggiunto l'assestamento del 90% (diagramma fortemente concavo verso l'alto) grosso modo cento giorni prima del previsto; il primo, il terzo, il quarto, il quinto ed il sesto con

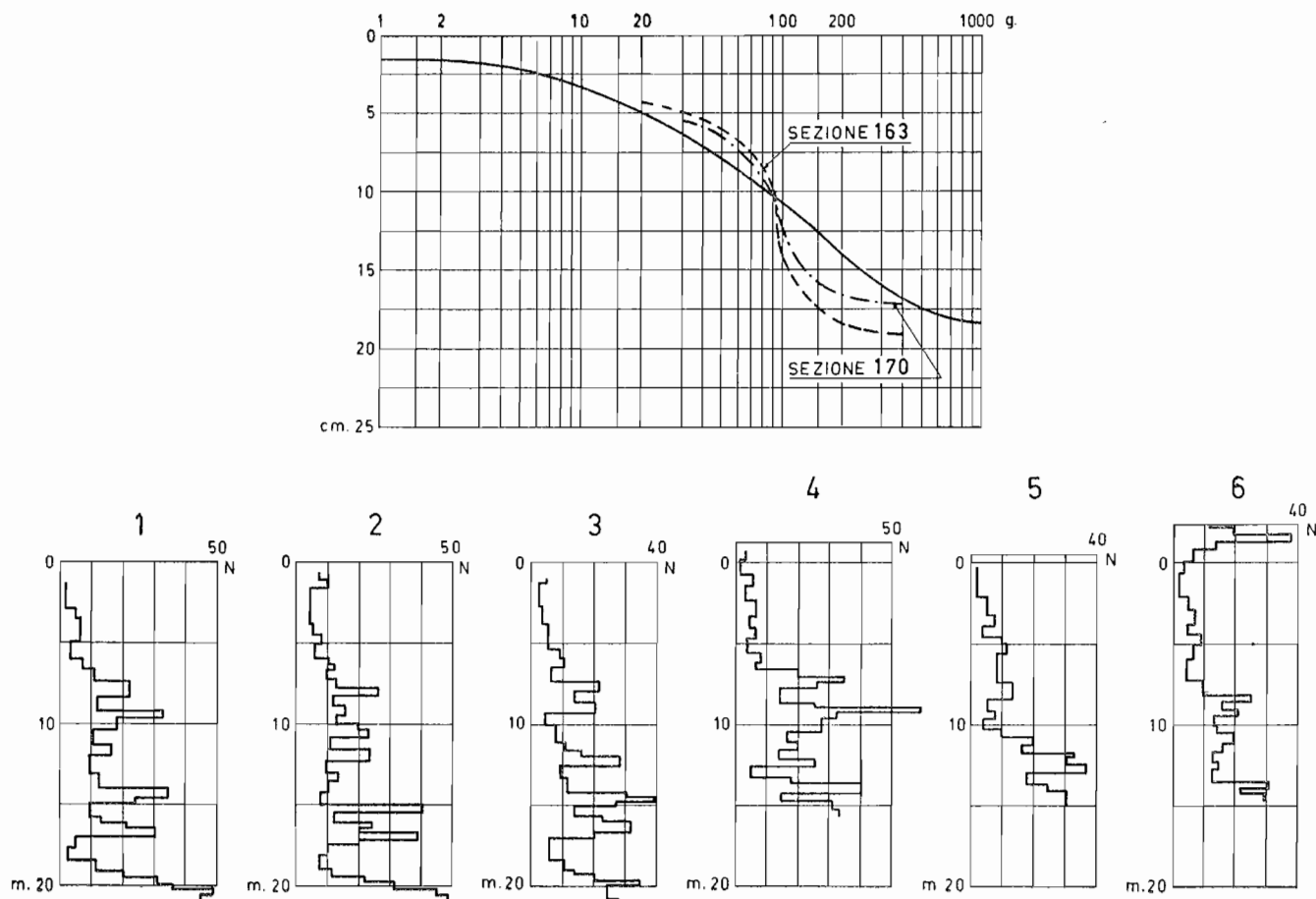


Fig. 8 - Fra T. Chiampo e C. Menarotto.

Per le fondazioni dei manufatti invece si seguì il criterio più prudente e si provocò l'assestamento delle fondazioni con un carico totale nei terrapieni di accesso e con un carico in più in corrispondenza delle pile e spalle atto a provocare un cedimento analogo a quello che avrebbe provocato il manufatto, analogamente a quanto era stato fatto per il Cavalcavia del Menarotto.

Lo studio eseguito permette di fare previsioni generalmente attendibili sul valore dei cedimenti totali e sulla loro durata, il secondo più importante del primo; ma ha anche il grande vantaggio di poter essere verificato rilevando periodicamente i cedimenti effettivi; il diagramma relativo può essere

valori di cedimento poco diversi da quelli previsti, il secondo con valori minori.

I terrapieni del manufatto sul Chiampo e tra il Gua' e Lucchetta hanno raggiunto lo stesso assestamento in un tempo uguale, ma con valori maggiori nel primo caso e sensibilmente minori nel secondo. Nel secondo caso si trattava di un terrapieno lungo per il quale si è voluto fare una sola valutazione in base alle prove n. 3 e 4 (massimo spessore compressibile) pur essendo le prove sensibilmente diverse: le piastre di livellazione, non essendo state posate in vicinanza delle prove n. 3 e 4 hanno dato risultati più concordanti con le altre prove (minore spessore compressibile). Un maggior det-

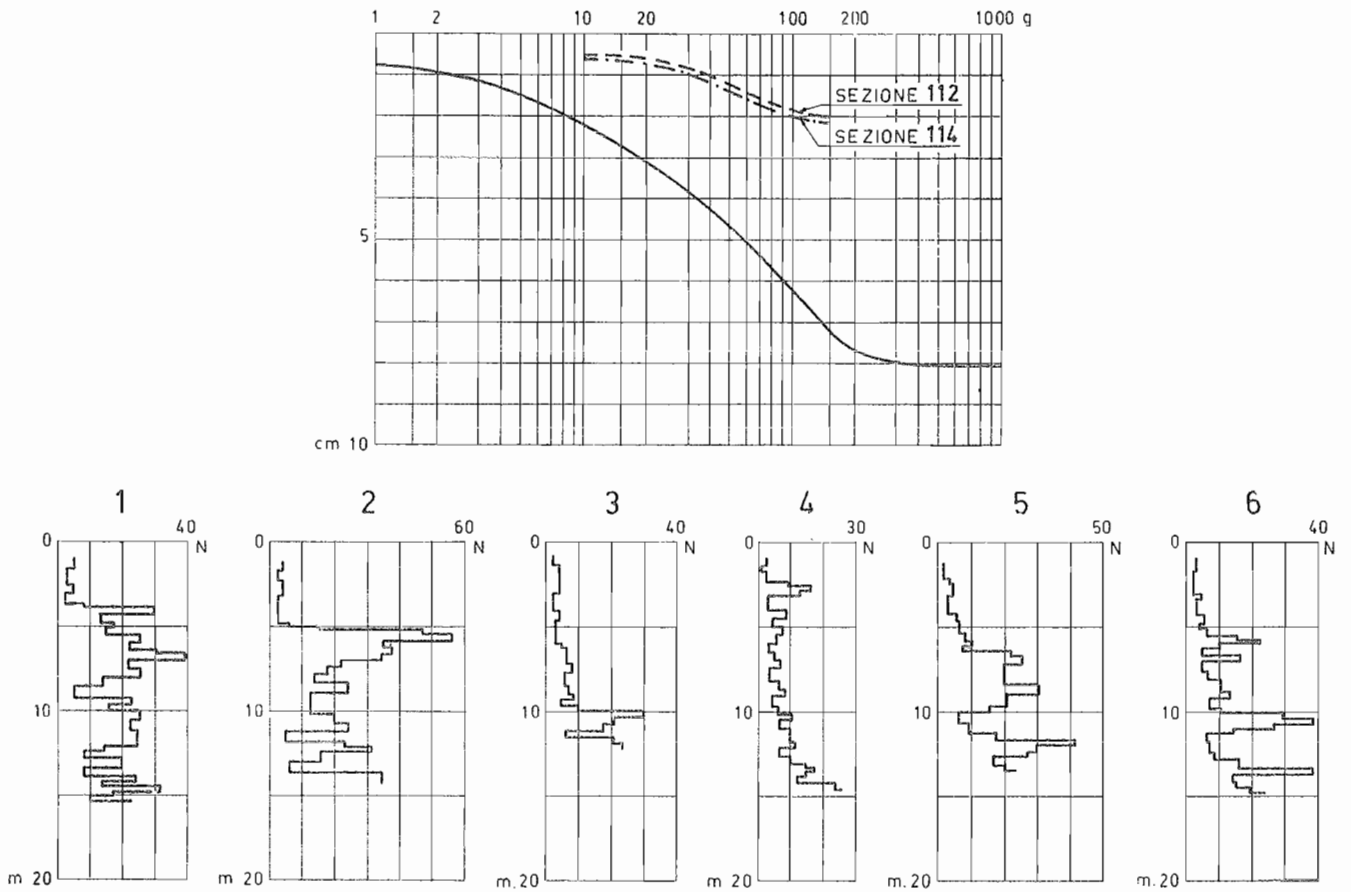


Fig. 9 - Fra T. Guà e Loc. Lucchetta.

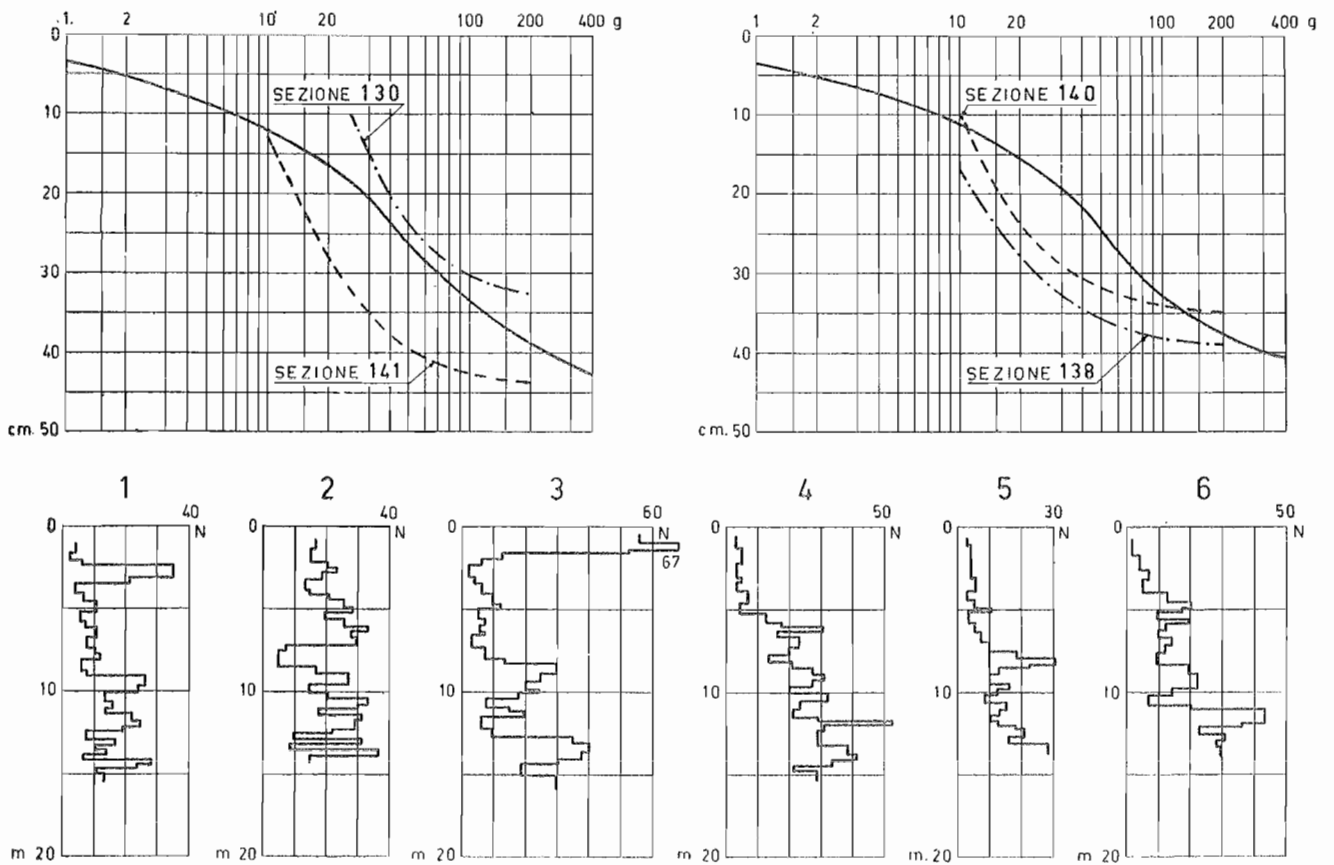


Fig. 10 - Fra Loc. Lucchetta e fine lotto.

taglio nelle previsioni avrebbe facilmente ottenuto migliori risultati anche nella previsione del valore del cedimento.

Il terrapieno del manufatto sul Gua' non ha ancora raggiunto un assestamento sufficiente, per cui è necessario attendere ancora prima del completamento dell'opera.

Il sottoscritto ha ritenuto interessante rendere noto il risultato di questi studi e di questi esperimenti poiché essi dimostrano come sia possibile, in base ai dati che si possono ricavare dalle prove di laboratorio, prevedere il valore dei cedimenti totali e la loro durata nel tempo, e come sia possibile, con approssima-

zione largamente sufficiente nella pratica costruttiva, estendere i risultati dei dati ottenuti in corrispondenza di un sondaggio alle zone vicine sfruttando l'impiego di prove rapide semplici e poco costose, come sono le penetrometriche dinamiche.

Ringrazio sentitamente l'Impresa ASTALDI MEC per avermi forniti tutti i dati diligentemente rilevati dalle livellazioni di controllo, l'Ing. Francesco CASARICO per la collaborazione nell'esecuzione dei calcoli e per il paziente lavoro di raccolta e riordinamento del materiale di calcolo e di osservazione, la *Direzione Lavori dell'Autostrada Brescia-Padova* per avere consentito alla pubblicazione dello studio.

SUMMARY: The paper outlines the investigations made on a great, quick and uncommon settlement of the foundation soil of an embankment leading to a road bridge. The investigations were particularly made in order to estimate the settlement still to be expected and the most suitable programme of works not to defer excessively the completion of the road construction meanwhile avoiding post-construction injurious settlements.

Since the study — based upon penetrometric subsoil explorations and laboratory tests on undisturbed samples — gave satisfactory results, it was subsequently applied to all the other bridges and embankments of the whole work.

The methods followed to simplify the investigations exploiting the studies for the first embankment, the results acquired, the control of the actual settlements are reported.

SOMMAIRE: La communication s'occupe des études exécutées à la suite d'un tassement exagéré et extrêmement rapide du sous-sol d'un remblai d'accès à un pont routier. Toutes ces études ont été faites pour évaluer le tassement à venir et pour organiser les travaux de façon que l'exécution de l'ouvrage ne fût pas trop retardée évitant en même temps les dommages dus à de forts tassements après l'achèvement des travaux.

L'étude effectuée, se basant sur les résultats des essais pénétrométriques en place et les essais en laboratoire sur échantillons non remaniés, a donné des résultats très satisfaisants. En conséquence elle a été étendue aux nombreux remblais et à tous les ponts de la route qui étaient dans les mêmes conditions.

On expose les critères suivis pour utiliser tout ce qui était possible de l'étude relative au premier remblai, les résultats obtenus, et les informations recueillies sur les mesures des tassements qui se sont effectivement vérifiés.