Premessa alla traduzione delle Raccomandazioni ISRM per il controllo dei Movimenti nell'Ammasso Roccioso tramite Inclinometri e Clinometri

Queste Raccomandazioni, apparse nel 1977, rivestono una particolare importanza specialmente per la parte dedicata agli inclinometri a sonda. Questi strumenti, infatti, hanno avuto una diffusione eccezionale che si giustifica con il costo piuttosto contenuto, la facilità di impiego e le informazioni fornite. A questo proposito si sottolinea che le indicazioni ed i suggerimenti espressi nelle presenti raccomandazioni sono validi non solo per gli strumenti installati in roccia, a cui il testo fa specifico riferimento, ma possono essere estesi anche agli inclinometri installati nei terreni.

Dall'esame dei dati provenienti da vari siti caratterizzati da differenti condizioni geotecniche e dall'osservazione di numerose campagne di installazione e misura, è emersa la convinzione che siano necessarie delle specifiche ben precise tanto per l'installazione e la lettura degli inclinometri quanto per l'elaborazione delle relative misure. In tal senso queste Raccomandazioni costituiscono attualmente l'unico riferimento, prodotto da un organismo «al di sopra delle parti», a disposizione dei tecnici addetti all'installazione, alla lettura ed all'elaborazione dati e degli utenti che devono interpretare le misure. Vista la diffusione degli inclinometri, vi è anzi da augurarsi che la stessa ISRM o associazioni equivalenti, siano esse nazionali o internazionali, si impegnino in un aggiornamento delle specifiche.

Le Raccomandazioni qui presentate potrebbero infatti essere arricchite con ulteriori indicazioni sull'installazione degli strumenti e sull'esecuzione delle letture che si riflettono sull'attendibilità delle misure.

In una eventuale revisione potrebbe anche rientrare la trattazione particolareggiata dell'elaborazione dei dati, che all'epoca della stesura del testo venne lasciata volutamente vaga per la diversità dell'output fornito dai vari strumenti allora disponibili. Infatti, poiché, si è assistito ad una progressiva unificazione dei principi di funzionamento degli strumenti in commercio appare ora possibile trattare l'argomento in modo unitario e più esauriente. A tale proposito va sottolineato che i dati grezzi ed elaborati contenuti nelle Raccomandazioni (Figg. 3a, 3b, 4, 5 e 6) per semplicità fanno riferimento ad una sola delle due direzioni individuate dalle due coppie di guide opposte.

È il caso, infine, di fare alcune osservazioni terminologiche relative alle grandezze misurate con gli inclinometri, siano essi a sonda o fissi. Poiché tali grandezze sono indicate nella letteratura con i nomi più svariati, verrà precisato il significato dei vocaboli italiani utilizzati, corredati dei corrispettivi termini inglesi.

L'inclinazione rispetto alla verticale del tubo inclinometrico ad una data profondità (corrispondente, in realtà, a quella della sonda o del sensore dell'inclinometro fisso) è stata denominata «inclinazione locale» (nell'originale *incremental angle*). Questa grandezza viene fornita dalla centralina in unità di misura adimensionali, indicate nel testo come *instrumental units*, che sono legate all'angolo di inclinazione da una costante strumentale, diversa da un'apparecchiatura all'altra. Tali unità di misura sono comunemente denominate «digit» poiché tutte le centraline acquisiscono ormai i dati «in digitale».

I cambiamenti di inclinazione subiti dal tubo ad una certa profondità tra la lettura iniziale e le letture successive verranno indicati come «variazioni di inclinazione locale» (nell'originale *incremental angular changes*). Una variazione di inclinazione locale di un generico tratto di tubo di lunghezza L dà luogo, in testa al tratto di tubo stesso, ad uno spostamento che chiameremo «spostamento locale» (nell'originale *incremental displacement*). La somma di tutti gli spostamenti locali dal fondo del tubo alla generica profondità z_i verrà denominato «spostamento integrale» alla profondità z_i. Non è stata eseguita la traduzione letterale dall'originale *total displacement* poiché il termine «spostamento totale» sembra meglio riferirsi alla risultante degli spostamenti nelle due direzioni perpendicolari individuate dalle coppie di guide opposte, che, come detto, non è mai trattata nelle Raccomandazioni.

Il curatore della traduzione
Paolo Tommasi

Raccomandazioni per il controllo dei movimenti nell'ammasso roccioso mediante inclinometri e clinometri (1977)

Introduzione

La Commissione per la Standardizzazione delle Prove in Roccia in Situ ed in Laboratorio è stata nominata nel 1967. Dopo il Convegno Internazionale di Meccanica delle Rocce tenutosi a Madrid nel 1968, la Commissione distribuì a tutti i membri dell'ISRM un questionario dal quale emerse una volontà generale di standardizzare le procedure di prova. In una successiva riunione della Commissione tenutasi ad Oslo nel settembre 1969, le prove vennero suddivise in categorie e fu decisa una priorità per la loro standardizzazione.

Nella stessa occasione venne anche stabilito che le prove orientate verso fini di ricerca, incluse molte delle prove per la determinazione delle proprietà fisiche delle rocce, esulavano dagli obiettivi della standardizzazione. Le riunioni successive furono tenute a Belgrado (IX-1970), Nancy (X-1971), Lucerna (IX-1972), Katowice (X-1973), Denver (IX-1974), Minneapolis (IX-1975) e Salisburgo (X-1976). Nella riunione di Lucerna la Commissione fu suddivisa in due comitati per la standardizzazione, rispettivamente, delle prove di laboratorio ed in situ.

Questo documento è stato redatto dalla Commissione per la standardizzazione delle prove in situ nel marzo 1976 e rappresenta un contributo alla categoria «*Controllo dei movimenti in roccia, delle pressioni sui rivestimenti, dei carichi negli ancoraggi, delle emissioni acustiche in roccia e delle vibrazioni*» nell'ambito delle «*Prove per la progettazione nell'ingegneria*».

Si deve sottolineare che lo scopo di queste «Raccomandazioni» è di specificare le procedure di prova e raggiungere un certo grado di standardizzazione senza peraltro scoraggiare lo sviluppo ed il miglioramento delle tecniche.

Chiunque sia interessato a queste «Raccomandazioni» e desideri suggerire modifiche o aggiunte dovrà indirizzare le sue osservazioni a: Secretary General, International Society for Rock Mechanics, c/o Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, Lisboa 5, Portogallo.

Parte I

I. Raccomandazioni per il controllo di movimenti nell'ammasso roccioso mediante inclinometri a sonda

Scopo

1. (a) Un inclinometro a sonda (o sonda inclinometrica) consiste in una sonda munita di rotelline, contenente un sensore eccitato dalla forza di gravità, che generi un segnale elettrico inviato via cavo ad una centralina di acquisizione sulla quale si legga l'angolo ϑ formato dall'asse della sonda con la verticale (figure 1 e 2) o lo spostamento incrementale.

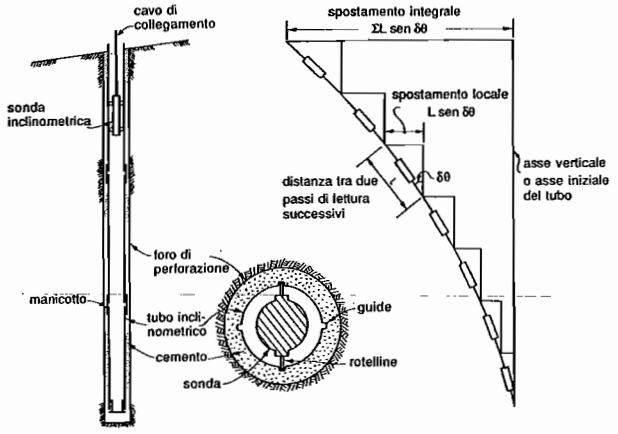


Fig. 1 - Principio di funzionamento di una sonda inclinometrica.

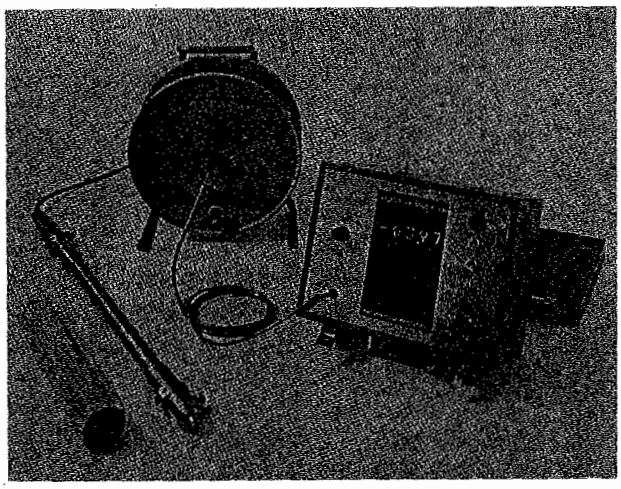


Fig. 2 - Tipica apparecchiatura di misura comprendente: spezzone di tubo inclinometrico, sonda, cavo di collegamento con relativo tamburo di avvolgimento, centralina.

Allo scopo, la sonda si inserisce in un tubo guida (tubo inclinometrico; n.d.t.) cementato in un foro di sondaggio, nel quale viene calata per passi progressivi leggendone ad ogni passo l'inclinazione. Come mostrato in Fig.1, le misure dell'inclinazione della sonda e della profondità a cui si effettua la misura sono utilizzate per calcolare la deviazione del tubo inclinometrico dalla verticale. Le differenze tra serie di misure effettuate in tempi successivi indicano i movimenti orizzontali dell'intero tubo.

(b) Lo strumento misura solamente movimenti del terreno normali all'asse del sondaggio. La maggior parte degli strumenti in commercio sono concepiti per funzionare in sondaggi subverticali; in questo caso possono essere rilevati solo movimenti orizzontali[1]*.

(c) La sonda inclinometrica, a differenza degli inclinometri fissi descritti nella seconda parte, può rilevare l'andamento degli spostamenti lungo l'asse del sondaggio in modo completo e dettagliato e può essere usata per localizzare i movimenti del terreno, ovunque essi abbiano luogo. Una serie di letture su di un certo arco di tempo fornisce l'entità, la direzione e la velocità del movimento da accertare. Lo stesso strumento può essere usato per effettuare letture in un numero qualsiasi di fori.

(d) La sonda inclinometrica non è adatta per letture «in continuo» o per letture a distanza, in questi casi si deve usare un inclinometro fisso.

Strumentazione

2. Attrezzatura per la perforazione e l'ispezione del foro.

(a) Una perforatrice per roccia in grado di realizzare un foro del diametro richiesto, usualmente 75 mm o più grande, fino alla profondità a cui si deve spingere la misura. La perforazione deve essere a carotaggio continuo a meno che non sia specificato diversamente.

(b) Una telecamera per riprese in foro o un'attrezzatura per misure geofisiche in foro può essere utilizzata per ispezionare il sondaggio, specie se non si dispone di carote.

3. Tubo inclinometrico e manicotti di giunzione

(a) Le dimensioni e la forma del tubo inclinometrico dovrebbero accordarsi con la sonda da impiegare. Solitamente i tubi inclinometrici sono in plastica o in alluminio rivestito in resina epossidica e presentano quattro guide (scanalature; ndt) a 90° tra loro nelle quali si alloggiano le rotelle della sonda. In ambiente corrosivo si preferiscono i tubi in plastica, caratterizzati da una più lunga durata. I tubi inclinometrici dovrebbero essere montati in spezzoni, lunghi al massimo 3 m, raccordati con manicotti o giunti telescopici.

(b) La forma dei manicotti, la loro corsa telescopica ed il sistema di fissaggio dovrebbero essere tali da consentire al tubo inclinometrico, una volta installato, di deformarsi assialmente con facilità di una quantità pari alla deformazione del terreno (sia in accorciamento che allungamento). La giunzione dovrebbe essere impermeabile per impedire l'ingresso del cemento nel tubo. I manicotti telescopici dovrebbero essere utilizzati solo nel caso si attendano movimenti assiali, poiché i tubi giuntati con rivetti guidano meglio le rotelline della sonda e consentono un più facile controllo della profondità.

(c) Dopo l'installazione ci si deve assicurare che le rotelline della sonda scorrano agevolmente nelle guide del tubo inclinometrico. Le guide devono essere il più possibile rettilinee e garantire che la sonda non ruoti intorno al suo asse di più di 1° («spiralatura», n.d.t.) su 3 m di tubo e, preferibilmente, non più di 5° su tutto il tubo inclinometrico. Spesso è difficile raggiungere queste tolleranze per problemi legati alla profilatura ed all'installazione dei tubi, specie in sondaggi profondi (più di 30 m). La spiralatura dovrebbe essere limitata il più possibile e, se necessario, dovrebbe essere misurata e tenuta nel debito conto durante il calcolo degli spostamenti (va comunque ricordato che l'errore di spiralatura altera l'azimut del vettore spostamento ed il valore delle componenti di spostamento lungo le direzioni delle guide ma non il modulo del vettore spostamento; n.d.t.)

(d) Il tubo inclinometrico montato dovrebbe essere sufficientemente flessibile da seguire i cambiamenti di curvatura prodotti dai movimenti del terreno. Il tubo inclinometrico non dovrebbe interferire con i movimenti del terreno, influenzandone l'entità, ed allo stesso tempo non dovrebbe subire distorsioni o fenomeni di instabilità strutturale che impediscano il passaggio della sonda.

4. Attrezzatura per l'installazione comprendente:

(a) adesivo oppure rivetti e rivettatrice, utensili per l'allineamento delle scanalature e per l'accoppiamento ed il montaggio dei tubi e dei manicotti. Tappi di fondo, materiale sigillante e valvole di fondo a perdere.

(b) materiali per la cementazione; ovvero una miscela cementante che riempia l'intercapedine tra tubo e pareti del foro ed abbia, dopo la presa, una rigidezza confrontabile con quella della roccia in cui è installato il tubo.

* I numeri ad apice si riferiscono alle note elencate a conclusione del testo.

(c) attrezzatura per la miscelazione e l'iniezione del cemento adatta ad eseguire le operazioni esposte al punto 4(b).

5. Apparecchiature di misura (ad es. vedi Fig.2):

(a) La sonda consiste in un involucro cilindrico su cui sono montate delle rotelline messe in tensione da molle che permettono di collocare la sonda lungo le guide in modo ripetibile; le rotelline sono distanziate di 1 o 2 piedi oppure di 0,5 o 1,0 m. L'involucro cilindrico contiene un trasduttore di inclinazione[2] che misura l'angolo tra l'asse della sonda e la verticale nel piano contenente le rotelline. Il trasduttore di inclinazione è collegato tramite un cavo elettrico, ad una centralina di lettura[3].

(b) Il campo di misura, la sensibilità e l'accuratezza del complesso sonda-centralina dovrebbero essere specificati in relazione alle richieste progettuali. La ripetibilità dell'apparecchiatura di misura nelle condizioni di lavoro non dovrebbe essere superiore a 0,01°.

(c) L'apparecchiatura dovrebbe essere progettata in modo tale che la sua accuratezza non sia influenzata dalle normali operazioni manuali, dalla pressione dell'acqua e dagli ambienti corrosivi in cui potrebbe trovarsi.

(d) Il cavo di collegamento deve essere robusto e non deve manifestare dispersione o subire eccessivi allungamenti sotto la tensione esercitata dal peso proprio, dal peso della sonda e dall'attrito tra questa e le guide del tubo inclinometrico. Il cavo deve essere graduato chiaramente in modo indelebile. La graduazione deve essere tale da posizionare la sonda, con un'accuratezza migliore di 5 mm o pari allo 0.05% della profondità a cui la sonda opera (anche se questo valore supera i 5 mm).

6. Attrezzatura per la taratura, comprendente:

(a) Un banco di taratura che consenta un frequente controllo dell'apparecchiatura. Il banco di taratura è progettato in modo da inserire la sonda in uno spezzone di tubo identico a quello in cui la sonda opererà in situ. L'inclinazione dello spezzone di tubo inclinometrico deve essere regolabile dalla verticale sino al massimo angolo di funzionamento che si presume possa raggiungere la sonda, con almeno una posizione di arresto (su entrambi i lati) rispetto alla verticale. Il banco di taratura deve essere munito di un sistema di misura indipendente dall'angolo di inclinazione che abbia un'accuratezza migliore di ±0,01°.

Procedura

7. Indagini preliminari:

(a) Le caratteristiche del sito e del progetto dovrebbero essere esaminate dettagliatamente per specificare le prestazioni richieste alla strumentazione.

(b) L'ubicazione e la profondità dei fori inclinometrici dovrebbero essere scelte sulla base di uno studio delle condizioni geotecniche del sito, prendendo in esame l'entità e la direzione presunte degli spostamenti e le caratteristiche degli altri strumenti da installare[4].

8. Installazione:

(a) I sondaggi devono essere eseguiti secondo l'ubicazione e fino alla profondità richieste. Se per sostenere il foro si usa un rivestimento in acciaio, questo dovrebbe essere completamente ritirato durante l'installazione del tubo inclinometrico.

(b) Prima dell'installazione del tubo inclinometrico si dovrebbe accertare la natura del sottosuolo sulla base dell'esame delle carote e/o del foro. Inoltre si dovrebbe preparare una stratigrafia geotecnica del sondaggio in cui si evidenzino in special modo le fasce potenzialmente in movimento.

(c) Gli spezzoni di tubo vengono progressivamente connessi e inseriti nel tubo con la giusta orientazione[5]. Il fondo del tubo va chiuso con un tappo a tenuta. Se si prevedono movimenti verticali si deve consentire l'accorciamento o l'allungamento del tubo in corrispondenza di tutte le giunzioni. Queste devono essere sigillate per prevenire l'ingresso del cemento dall'intercapedine foro-tubo. Se il foro è pieno d'acqua o di fango di perforazione o se vi è stato già versato il cemento, riempiendo il tubo d'acqua se ne facilita l'inserzione nel foro[6]. Se il foro è asciutto, il peso del tubo va sostenuto con un cavo fissato sul fondo del tubo e legato lungo il fusto ad intervalli regolari.

(d) Dopo aver inserito il tubo nel foro, si misura l'orientazione delle guide (azimut) con un'accuratezza di ±3°. Il tubo inclinometrico va bloccato e, qualora sia necessario se ne controlla la spiralatura con un'apposita sonda[7].

(e) L'intercapedine tra il tubo e le pareti del foro viene cementata. Nei fori pieni d'acqua, per evitare che questa si mescoli con il cemento, si utilizza un tubo per getti subacquei; nei fori profondi l'uso di tale tubo è obbligatorio. Sono anche disponibili delle valvole di fondo a perdere, che consentono di iniettare il cemento dal fondo del tubo inclinometrico attraverso le aste di perforazione. In questo caso, una volta completata la cementazione, l'interno del tubo va lavato energicamente con acqua pulita e, se necessario, spazzolato. Il tubo può essere lasciato pieno d'acqua o può essere svuotato dopo che il cemento abbia fatto presa[8].

(f) Per evitare l'ingresso di detriti nel tubo e prevenire atti di vandalismo, l'estremità del tubo posta in superficie (testa) va protetta con un tappo od un pozzetto muniti di serratura. L'ubicazione e la quota

della testa di ogni tubo, da utilizzare successivamente come riferimento per le misure di profondità, vanno rilevati con una precisione di ±5 mm.

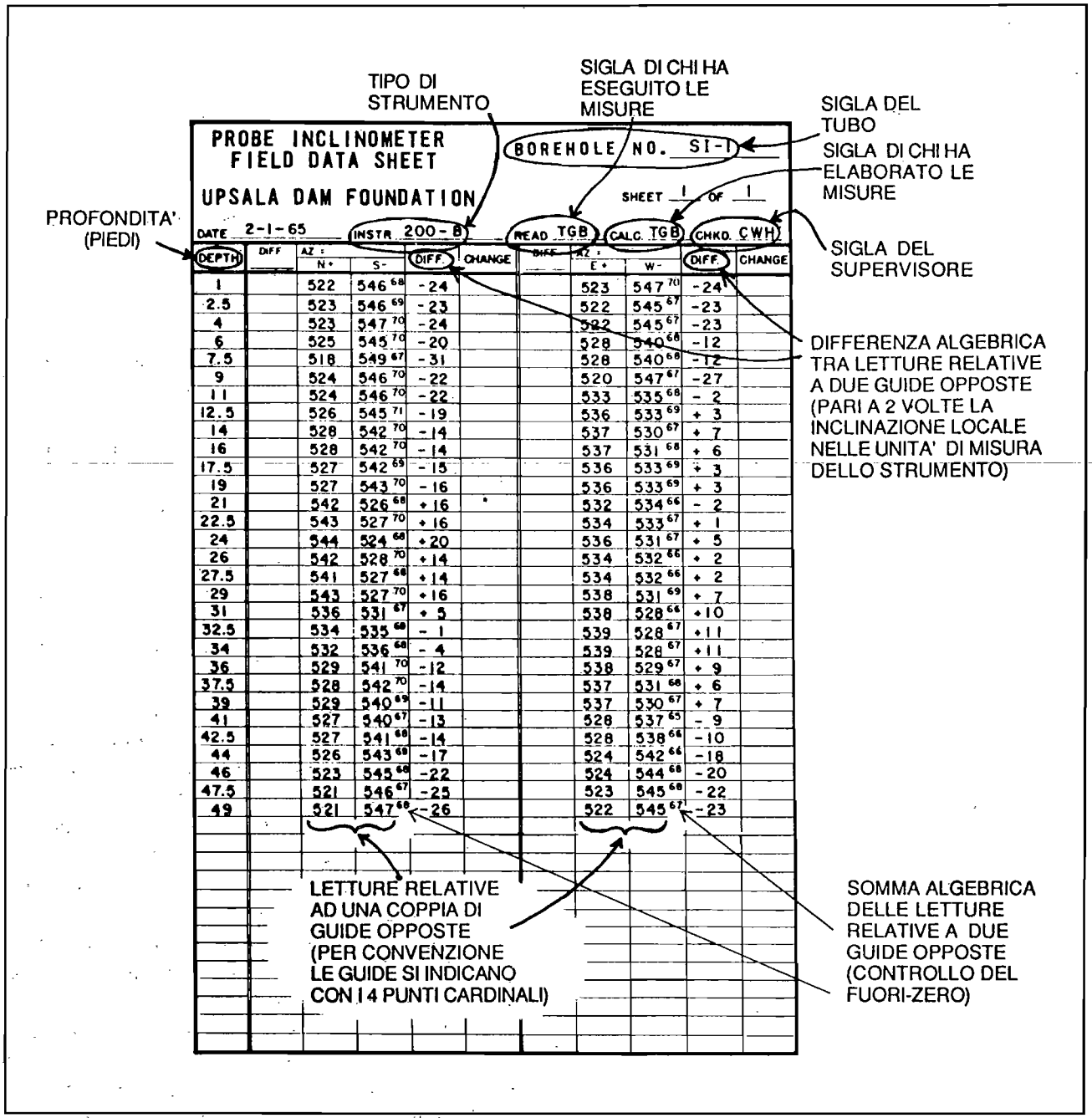
9. Misure:

(a) La sonda dovrebbe essere controllata in situ all'inizio ed al termine di una sessione giornaliera di misure. Qualsiasi anomalia di funzionamento dovrebbe essere immediatamente analizzata e corretta; ugualmente sarebbe opportuno annotare su un apposito libretto le tarature e gli interventi di riparazione della sonda. Gli interventi non strettamente necessari dovrebbero essere evitati.

(b) Diverse letture di zero dovrebbero essere effettuate non appena il cemento abbia fatto presa. La media di queste letture costituirà un riferimento per ogni successiva misura. La cadenza delle letture va programmata dal progettista sulla base delle caratteristiche del sito[9]. Ogni lettura dovrebbe comprendere almeno le operazioni ai punti 9(c) e 9(d) esposti di seguito.

(c) La sonda viene immessa nel tubo con le rotelline inserite in una coppia di guide opposte e calata fino a fondo foro.

Procedendo dal fondo foro, verso la superficie, si esegue una serie di misure ad intervalli di profondità regolari lungo tutto il tubo; durante la misura la sonda viene tenuta ferma e si trascrivono la profondità ed il valore visualizzato sulla centralina, come mostrato in Fig. 3a[10]. Oltre ai valori misurati va presa nota della data, dell'ora, dell'ubicazione del tubo e



DEPTH	DIFF	AZ: N+	S-	DIFF.	CHANGE	DIFF	AZ: E+	W-	DIFF.	CHANGE
1		522	546 68	-24			523	547 70	-24	
2.5		523	546 69	-23			522	545 67	-23	
4		523	547 70	-24			522	545 67	-23	
6		525	545 70	-20			528	540 68	-12	
7.5		518	549 67	-31			528	540 68	-12	
9		524	546 70	-22			520	547 67	-27	
11		524	546 70	-22			533	535 68	- 2	
12.5		526	545 71	-19			536	533 69	+ 3	
14		528	542 70	-14			537	530 67	+ 7	
16		528	542 70	-14			537	531 68	+ 6	
17.5		527	542 69	-15			536	533 69	+ 3	
19		527	543 70	-16			536	533 69	+ 3	
21		542	526 68	+16			532	534 66	- 2	
22.5		543	527 70	+16			534	533 67	+ 1	
24		544	524 68	+20			536	531 67	+ 5	
26		542	528 70	+14			534	532 66	+ 2	
27.5		541	527 68	+14			534	532 66	+ 2	
29		543	527 70	+16			538	531 69	+ 7	
31		536	531 67	+ 5			538	528 66	+10	
32.5		534	535 68	- 1			539	528 67	+11	
34		532	536 68	- 4			539	528 67	+11	
36		529	541 70	-12			538	529 67	+ 9	
37.5		528	542 70	-14			537	531 68	+ 6	
39		529	540 69	-11			537	530 67	+ 7	
41		527	540 67	-13			528	537 65	- 9	
42.5		527	541 68	-14			528	538 66	-10	
44		526	543 68	-17			524	542 66	-18	
46		523	545 68	-22			524	544 68	-20	
47.5		521	546 67	-25			523	545 68	-22	
49		521	547 68	-26			522	545 67	-23	

Fig. 3a - Modulo di campagna per la raccolta dei dati di misure effettuate con sonde inclinometriche (vedi Nota 10).

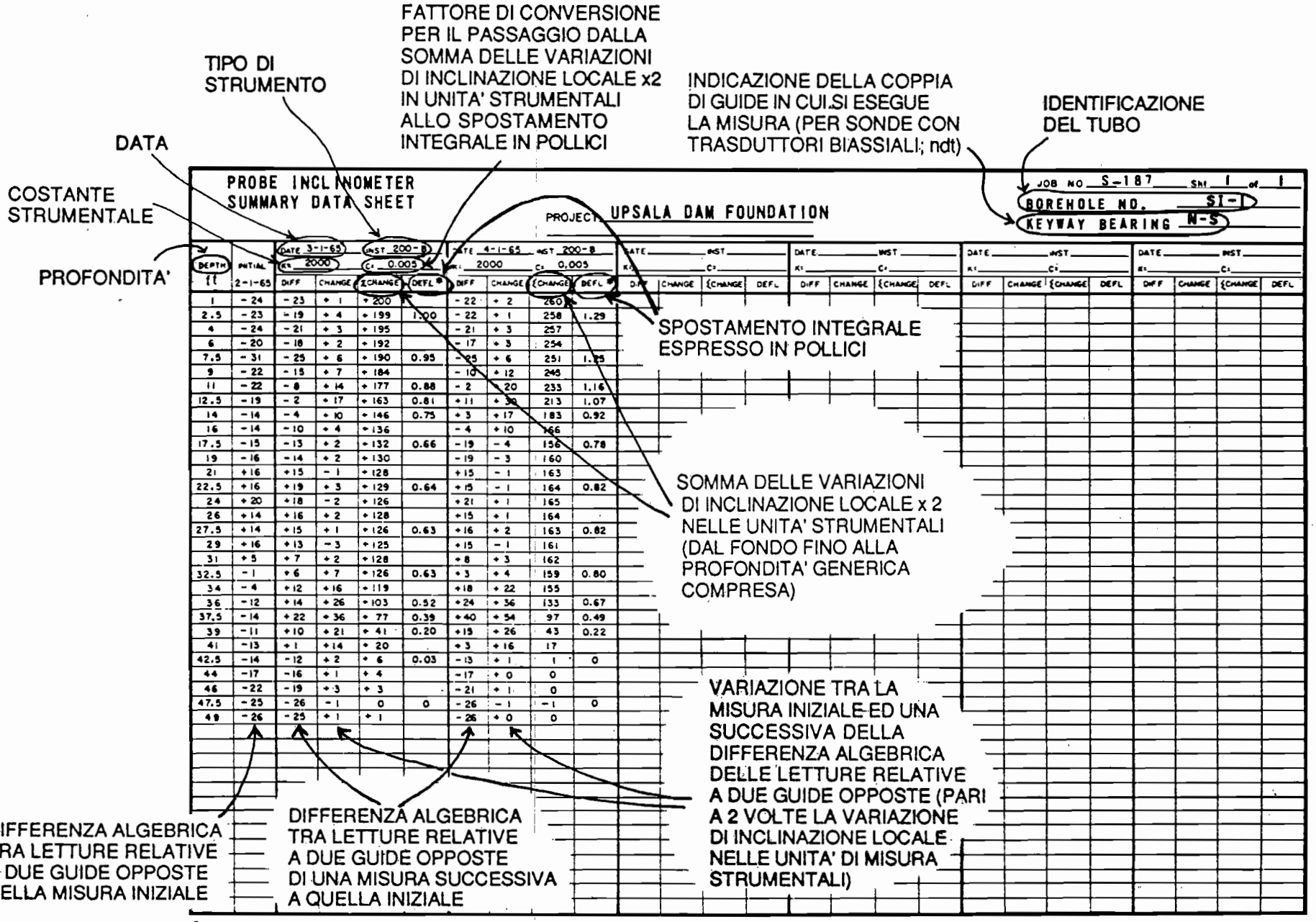


Fig. 3b - Modulo riassuntivo per la raccolta di dati da misure effettuate con sonda inclinometrica.

della direzione delle guide. L'intervallo tra due misure dovrebbe corrispondere, generalmente, alla distanza tra le coppie di rotelline della sonda anche se, in molti casi, si possono eseguire misure ad intervalli pari a due volte tale distanza con una minima perdita di accuratezza.

(d) La sonda viene estratta, ruotata di 180°, immessa di nuovo nel tubo con le rotelline inserite nella stessa coppia di guide e calata fino a fondo foro. Viene eseguita una seconda serie di letture con la stessa procedura riportata al punto 9(c). Le profondità a cui si effettuano le letture devono essere le stesse della prima serie di misure; così facendo si può calcolare il fuori zero associato ad una coppia di letture effettuate alla stessa profondità (pari alla somma algebrica tra i valori delle letture a 0° e 180°; n.d.t.) che dovrebbe rimanere pressoché costante al variare della profondità. Questo dato costituisce un importante controllo in situ sulla bontà delle misure.

(e) Se richiesto[2], possono essere realizzate due ulteriori serie di misure secondo le modalità esposte ai punti 9(c) e 9(d) inserendo la sonda nell'altra coppia di guide.

Elaborazione dei dati

10. (a) A meno che non sia specificato diversamente, i dati dovrebbero essere elaborati entro 24 ore dall'esecuzione delle misure[11].

(b) Si verificano i dati di campagna[12] segnando sul modulo di lettura gli errori evidenti. Eventuali correzioni devono essere chiaramente indicate.

(c) Si calcola la media delle due letture eseguite sulla stessa coppia di guide con la sonda a 0° e 180°. Poiché la convenzione dei segni e la procedura di calcolo dettagliata variano da uno strumento all'altro, è opportuno consultare attentamente il manuale d'uso dello strumento (nella maggior parte degli strumenti si calcola il valore medio della differenza algebrica della coppia di letture; n.d.t.). Si deve controllare attentamente e registrare la direzione del movimento.

(d) Le letture così corrette vengono sottratte da quelle di zero alla medesima profondità per determinare la variazione locale dell'inclinazione o dello spostamento.

(e) Queste variazioni locali di inclinazione ($\delta\theta$ in gradi) possono essere, se richiesto, trasformate in spostamenti locali (Δ in mm) usando la seguente espressione:

$$\Delta = L \cdot \text{sen}\,(\delta\theta)$$

(dove L è la distanza in mm tra due profondità di lettura consecutive).

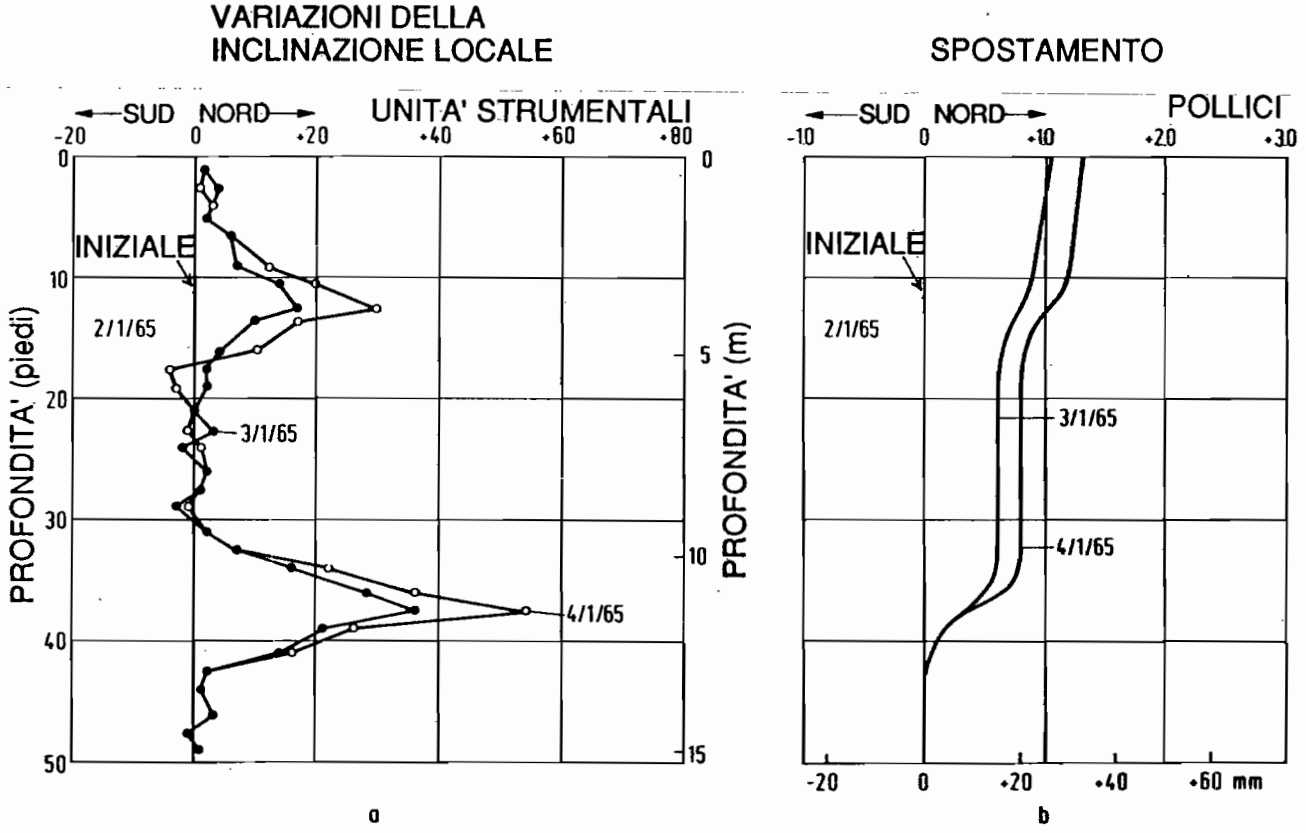


Fig. 4 - Grafici delle variazioni di inclinazione locale (a) e degli spostamenti integrali (b) in funzione della profondità, ottenuti da misure inclinometriche.

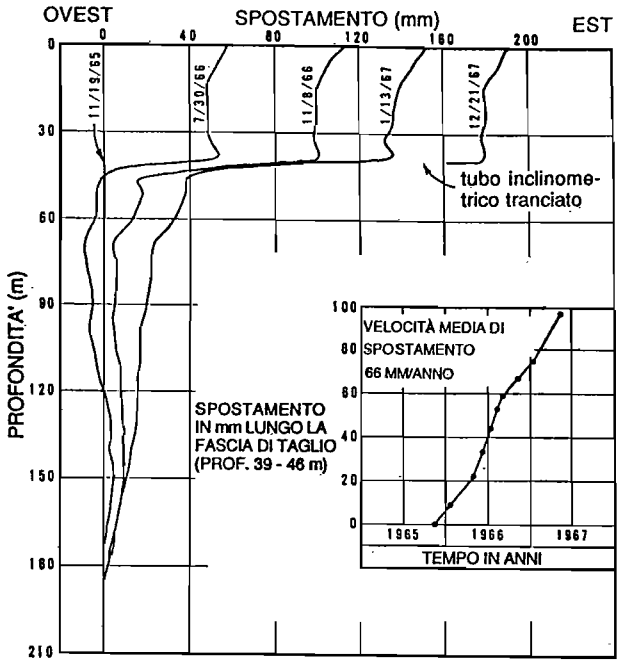


Fig. 5 - Grafici degli spostamenti integrali in funzione della profondità in una scarpata in roccia ed andamento degli spostamenti lungo la fascia di taglio compresa tra 30-46 m di profondità in funzione del tempo.

(f) Le variazioni di inclinazione locale o le variazioni di spostamento* locale vengono successivamente sommate, generalmente a partire dalla misura più profonda, costruendo così un grafico degli spostamenti integrali in funzione della profondità (ad es. Figg. 4, 5 e 6). Spesso è utile disegnare le variazioni di inclinazione locale (o gli spostamenti locali) in funzione della profondità (Fig.4) per evidenziare le zone in movimento.

(g) A partire dai grafici degli spostamenti in funzione della profondità, si disegnano dei grafici in cui si riportano gli spostamenti ad una determinata[13] profondità in funzione del tempo (ad es. Fig.5).

Presentazione dei risultati

11. I risultati dovrebbero essere presentati nelle due seguenti forme, a meno che non sia specificato diversamente: un Rapporto sull'Installazione, contenente i dati sulla strumentazione installata, seguito da Rapporti sulle Misure in cui siano presentati periodicamente i risultati dei rilievi in situ. I Rapporti sulle Misure dovranno essere redatti con una certa frequenza per minimizzare il ritardo che intercorre tra il momento in cui si riconosce un comportamento preoccupante della strumentazione e l'attuazione di qualsiasi intervento che si renda necessario.

12. Il Rapporto sull'Installazione dovrebbe contenere le seguenti informazioni:

(a) la descrizione degli strumenti impiegati ed i relativi schemi costruttivi e di installazione, ivi comprese delle particolareggiate specifiche di funzionamento e la letteratura tecnica prodotta dal costruttore sulla propria strumentazione.

(b) Particolari sui metodi di installazione, taratura e misura. Si può far riferimento a queste raccomandazioni segnalando solamente le differenze rispetto alle procedure raccomandate.

c) Una planimetria con l'ubicazione dei sondaggi in cui siano riportati la profondità, il diametro e le coordinate plano-altimetriche della testa di ogni tubo.

(d) Per ogni tubo deve essere preparata una stratigrafia geotecnica del terreno in cui è stato installato nella quale siano indicate anche la posizione, le profondità a cui si trovano i manicotti di giunzione e le profondità a cui si effettuano le letture. Deve, inoltre, essere indicato l'azimut delle guide del tubo, specificando chiaramente la convenzione adottata per il segno dei movimenti e per le misure degli angoli.

(e) Per ciascun tubo deve essere preparato un grafico che mostri i due profili iniziali del tubo inclinometrico (secondo le due direzioni individuate dalle coppie di guide opposte; n.d.t.). Le letture di zero devono essere presentate anche sotto forma di tabella. È consigliabile riportare anche le misure di spiralatura di ciascun tubo.

13. Il Rapporto sulle Misure dovrebbe comprendere le seguenti voci:

(a) L'insieme dei moduli di lettura utilizzati in situ, contenenti le informazioni riportate in Fig.3; i moduli devono riguardare tutte le letture successive all'ultima lettura riportata nel rapporto precedente.

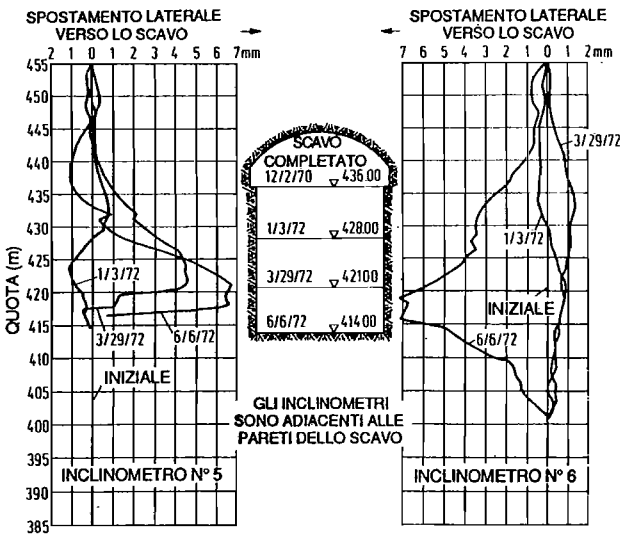


Fig. 6 - Spostamento nelle adiacenze dello scavo di una grande centrale in caverna.

* In realtà non esistono le «variazioni di spostamento» ma solo lo «spostamento», pertanto questo termine va interpretato come una svista dei redattori delle Raccomandazioni (n.d.t.).

(b) Grafici sull'andamento degli spostamenti con la profondità e con il tempo, sufficienti a localizzare tutti gli spostamenti significativi ed a mostrarne chiaramente l'entità, la velocità e la direzione[14].

(c) Un breve commento dei dati che richiami l'attenzione sugli spostamenti significativi e sugli inconvenienti occorsi durante l'esecuzione di tutte le misure effettuate dopo l'emissione del rapporto precedente.

Parte II

II. Raccomandazioni per il controllo dei movimenti dell'ammasso roccioso mediante inclinometri fissi

Scopo

1. (a) Un inclinometro fisso consiste in una serie di sensori muniti di rotelline guida, contenenti ognuno un trasduttore di inclinazione uniassiale o biassiale eccitato dalla forza di gravità, che genera un segnale elettrico. I sensori, uniti da barre snodate e sospesi lungo un tubo inclinometrico cementato in un foro di sondaggio (Fig.7), misurano variazioni dell'angolo di inclinazione dell'asse del sondaggio. Ogni sensore è derivato in superficie tramite cavi elettrici.

(b) Lo strumento misura solo movimenti del terreno perpendicolari all'asse del sondaggio. La maggior parte degli strumenti in commercio sono concepiti per funzionare in sondaggi sub-verticali; in questo caso possono essere registrati solo movimenti orizzontali.

(c) In superficie, una centralina acquisisce i dati di ogni sensore ad intervalli di tempo prefissati e, nel caso vengano rilevate inclinazioni superiori a quelle normalmente misurate, può attivare un sistema di allarme. La centralina può essere interfacciata con un telefono o con altri sistemi per la trasmissione dei dati a distanza. I sensori possono essere letti anche singolarmente con una centralina portatile, specie durante l'installazione e la messa a punto della strumentazione.

(d) L'inclinometro fisso, a differenza della sonda inclinometrica descritta nella prima parte, può essere usato per rilevare i movimenti del terreno in modo continuo ed automatico, anche a distanza. Lo strumento non rileva l'andamento dettagliato dei movimenti con la profondità a meno che i sensori siano estremamente ravvicinati, cosa generalmente costosa. Una serie di sensori installati in un tubo può essere recuperata alla fine del periodo di misura. Se è necessario avere un profilo dettagliato dei movimenti si dovrà installare un altro tubo accanto a quello esistente oppure si dovrà togliere l'inclinometro fisso dal tubo inclinometrico in cui era installato e rilevare quest'ultimo con una sonda inclinometrica.

Strumentazione

2. Attrezzatura per la perforazione e l'ispezione del foro.

(a) Una perforatrice per roccia in grado di realizzare un foro del diametro richiesto, usualmente 75 mm o più grande, fino alla profondità a cui si deve spingere la misura. Il foro deve essere realizzato a carotaggio continuo a meno che non sia specificato diversamente.

(b) Una telecamera per riprese in foro o un'attrezzatura per misure geofisiche in foro potrebbe essere utilizzata per ispezionare il sondaggio, specie se non si dispone di carote.

3. Tubo inclinometrico e manicotti di giunzione

(a) Le dimensioni e la forma del tubo inclinometrico dovrebbero accordarsi con la sonda da impiegare. Solitamente i tubi inclinometrici sono in plastica o in alluminio rivestito in resina epossidica e presentano quattro guide (scanalature) a 90° tra loro nelle quali si alloggiano le rotelle della sonda. In ambiente corrosivo si preferiscono i tubi in plastica, caratterizzati da una più lunga durata. I tubi inclinometrici dovrebbero essere montati in spezzoni di lunghezza massima di 3 m raccordati con manicotti o giunti telescopici.

(b) La forma dei manicotti, la loro corsa telescopica ed il sistema di fissaggio dovrebbero essere tali da consentire al tubo inclinometrico installato di deformarsi assialmente con facilità di una quantità pari alla deformazione del terreno. La giunzione dovrebbe essere impermeabile per impedire l'ingresso del cemento nel tubo. I manicotti telescopici dovrebbero essere utilizzati solo se sono attesi movimenti assiali; infatti i tubi giuntati con manicotti rivettati guidano meglio le rotelline e consentono un più facile controllo della profondità.

(c) Dopo l'installazione ci si deve assicurare che le rotelle della sonda scorrano agevolmente nelle guide. Queste devono essere il più possibile rettilinee garantendo che la sonda non ruoti di più di 1° su 3 m di tubo e, preferibilmente non più di 5° su tutto il tubo inclinometrico. Spesso è difficile raggiungere queste tolleranze per problemi legati alla profilatura ed all'installazione dei tubi, specie in sondaggi profondi (più di 30 m). La spiralatura dovrebbe essere limitata il più possibile e, se necessario, dovrebbe essere misurata e tenuta nel debito conto durante il calcolo degli spostamenti (va comunque ri-

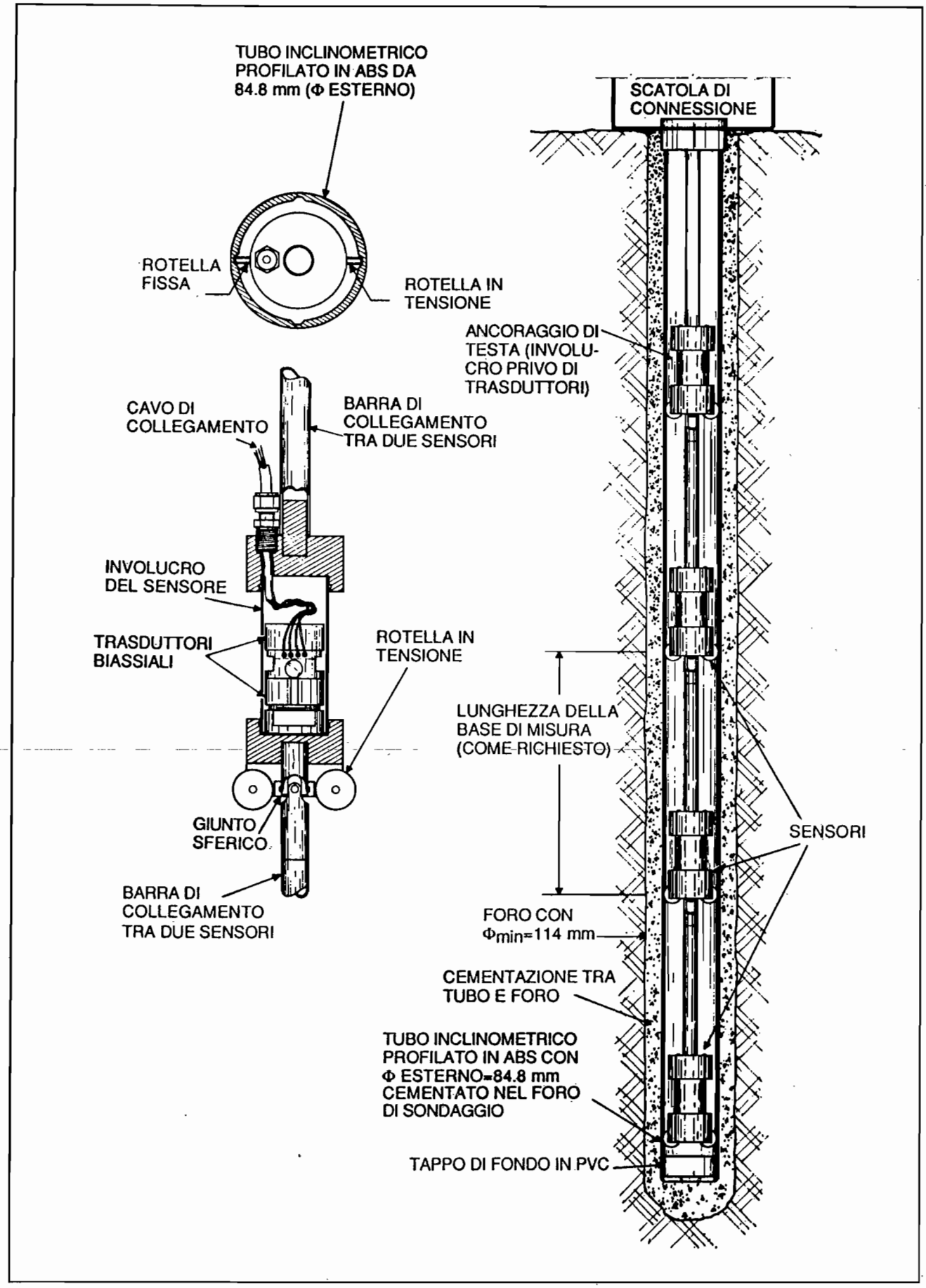


Fig. 7 - Installazione di un inclinometro fisso con i particolari della strumentazione.

cordato che l'errore di spiralatura altera l'azimut del vettore spostamento ed il valore delle componenti di spostamento lungo le guide ma non il modulo del vettore spostamento; n.d.t.).

(d) Il tubo inclinometrico montato dovrebbe essere sufficientemente flessibile da seguire i cambiamenti di curvatura che saranno prodotti dai movimenti del terreno. Il tubo inclinometrico non dovrebbe interferire con i movimenti del terreno, influenzandone l'entità, ed allo stesso tempo non dovrebbe subire distorsioni o fenomeni di instabilità strutturale che impediscano il passaggio della sonda.

4. Attrezzatura di installazione comprendente:

(a) Adesivo oppure rivetti e rivettatrice, utensili per l'allineamento delle guide e per l'accoppiamento ed il montaggio dei tubi e dei manicotti. Tappi di fondo, materiale sigillante e valvole di fondo a perdere.

(b) Materiali per la cementazione; ovvero una miscela cementante che riempia l'intercapedine tra tubo e pareti del foro ed abbia, dopo la presa, una rigidezza confrontabile con quella della roccia in cui è installato il tubo.

(c) Attrezzatura per la miscelazione e l'incisione del cemento adatta ad eseguire le operazioni esposte al punto precedente (4b).

5. Apparecchiatura costituente l'inclinometro fisso (vedi ad es. Fig.7) comprendente:

(a) I sensori. Questi sono costituiti da un involucro cilindrico provvisto di rotelline tenute in tensione da molle che consentano di posizionarli lungo le guide del tubo in modo riproducibile. Ogni involucro contiene un trasduttore di inclinazione[15] uniassiale per misurare l'angolo tra la verticale e l'asse del sensore nel piano individuato dalle rotelline guida. Alla base, ogni sensore è collegato, tramite uno snodo sferico, al tratto di barra sottostante di lunghezza inferiore ai 3 m; in questo modo può essere montata una serie di sensori, sospesi lungo il tubo inclinometrico. Da ogni sensore parte un cavo elettrico impermeabile che termina in una scatola di collegamento in superficie.

(b) Una centralina situata in posizione opportuna campiona, in sequenza, i segnali provenienti da ciascun sensore. La centralina può essere programmata per confrontare l'inclinazione misurata dal sensore con un valore di soglia prestabilito; se questa soglia viene superata, la centralina può emettere un segnale di allarme. Un sistema di trasmissione a distanza può essere usato per accedere ai dati attraverso una linea telefonica pubblica. In questo modo effettuando una chiamata sulla linea telefonica la centralina risponde e trasmette i dati all'altro capo della linea dove possono essere stampati.

(c) Il campo di misura, la frequenza di lettura, la sensibilità e la precisione del sistema sensore-centralina dovrebbero essere specificati in funzione delle esigenze dello studio. La ripetitività del sistema di misura nelle condizioni in situ dovrebbe essere migliore di $\pm 0{,}01°$.

(d) La strumentazione dovrebbe essere progettata in modo da mantenere la precisione richiesta anche dopo le normali operazioni di installazione anche in presenza della pressione esercitata dall'acqua o di un ambiente corrosivo. A differenza della sonda inclinometrica descritta nella prima parte, l'inclinometro fisso non può essere ruotato di 180° per eliminare l'errore di «fuori zero», cosicché delle variazioni del «fuori zero» saranno a torto considerate dei movimenti.

(e) In genere l'intero sistema di inclinometri fissi può essere estratto dal tubo inclinometrico per essere riparato e recuperato o per consentire la lettura del tubo con una sonda inclinometrica.

6. Attrezzatura per la taratura comprendente:

(a) Un banco di taratura che consenta di controllare separatamente ogni sensore prima del montaggio delle barre di collegamento e dell'inserimento della catena di inclinometri fissi nel tubo inclinometrico. Il banco di taratura deve essere progettato in modo da poter inserire il sensore in uno spezzone di tubo identico a quello in cui il sensore opererà in situ. L'inclinazione dello spezzone di tubo inclinometrico deve essere regolabile dalla verticale sino al massimo angolo di funzionamento che si presume possa raggiungere il sensore, con almeno una posizione di arresto (su entrambi i lati) rispetto alla verticale. Il banco di taratura deve essere munito di un sistema di misura indipendente dall'angolo di inclinazione che abbia un'accuratezza migliore di $\pm 0{,}01°$.

Procedura

7. Indagini preliminari:

(a) Le caratteristiche del sito e del progetto dovrebbero essere dettagliatamente esaminate per specificare le prestazioni richieste alla strumentazione.

(b) L'ubicazione e la profondità dei fori inclinometrici dovrebbero essere scelte sulla base di uno studio delle condizioni geotecniche del sito, prendendo in esame l'entità e la direzione presunte degli spostamenti e le caratteristiche degli altri strumenti da installare[4].

8. Installazione:

(a) I sondaggi devono essere eseguiti con l'ubicazione e fino alla profondità richieste. Se per sostenere il foro si usa un rivestimento in acciaio, questo

dovrebbe essere completamente ritirato durante l'installazione del tubo inclinometrico.

(b) Prima dell'installazione del tubo inclinometrico si dovrebbe accertare la natura del sottosuolo sulla base dell'esame delle carote e/o del foro. Inoltre si dovrebbe preparare una stratigrafia geotecnica del sondaggio in cui si evidenzino in special modo le fasce potenzialmente in movimento.

(c) Gli spezzoni di tubo vengono progressivamente connessi e inseriti nel tubo con la giusta orientazione[5]. Il fondo del tubo va chiuso con un tappo a tenuta. Se si prevedono movimenti verticali si deve consentire l'accorciamento o l'allungamento del tubo in corrispondenza di tutte le giunzioni, che devono essere sigillate per prevenire l'ingresso del cemento dall'intercapedine foro-tubo. Se il foro è pieno d'acqua o di fango di perforazione o se vi è già stato versato il cemento, l'inserzione del tubo nel foro può essere facilitata riempiendo il tubo d'acqua[6]. Se il foro è asciutto, il peso del tubo va sostenuto con un cavo fissato sul fondo del tubo e legato lungo il fusto ad intervalli regolari.

(d) Dopo aver inserito il tubo nel foro, si misura l'orientazione delle guide (azimut) con un'accuratezza di $\pm 3°$. Il tubo inclinometrico va bloccato e, qualora sia necessario, se ne controlla la spiralatura con un'apposita sonda[7].

(e) L'intercapedine tra il tubo e le pareti del foro viene cementata. Nei fori pieni d'acqua, per evitare che questa si mescoli con il cemento, si utilizza un tubo per getti subacquei; nei fori profondi l'uso di tale tubo è obbligatorio. Sono anche disponibili delle valvole di fondo a perdere, che consentono di iniettare il cemento dal fondo del tubo inclinometrico attraverso le aste di perforazione. In questo caso, una volta completata la cementazione, l'interno del tubo inclinometrico va lavato energicamente con acqua pulita e, se necessario, spazzolato. Il tubo può essere lasciato pieno d'acqua o può essere svuotato dopo che il cemento abbia fatto presa[8].

(f) Per evitare l'ingresso di detriti, l'estremità del tubo posta in superficie va protetta con un tappo od un pozzetto. Una scatola di collegamento con un coperchio impermeabile munito di serratura dovrebbe essere installata in superficie sopra il tubo inclinometrico.

(g) Dopo che il cemento è stato iniettato e prima di calare il sistema di inclinometri fissi nel tubo, l'assetto iniziale del tubo inclinometrico deve essere rilevato tramite una sonda inclinometrica del tipo descritto nella I parte di queste Raccomandazioni. In tal modo si ottiene un riferimento per eventuali rilievi successivi da effettuare con una sonda inclinometrica.

(h) Si controllano il funzionamento e la taratura di ogni sensore e della centralina. La catena di inclinometri fissi, distanziati in funzione della presunta posizione delle zone in movimento, viene montata ed inserita nel tubo con l'orientazione stabilita. Il sistema di inclinometri fissi, una volta montato, dovrebbe essere sospeso dall'alto all'interno del tubo inclinometrico facendo attenzione che i cavi elettrici non intralcino le guide del tubo inclinometrico.

9. Letture:

(a) Per un periodo di circa una settimana dopo l'installazione, si effettuano delle letture manuali giornaliere di ogni sensore per controllarne la stabilità e verificare l'affidabilità del sistema. Sulla centralina possono essere selezionati dei valori di soglia, diversi da sensore a sensore, oltrepassati i quali, si attiva un allarme. Se si usa un sistema per la trasmissione dei dati a distanza, questo va controllato.

(b) Ad intervalli fissati dal responsabile del progetto si leggono manualmente o automaticamente tutti i sensori del sistema di monitoraggio.

(c) Se dopo un certo periodo di tempo si verificano eccessivi movimenti o se uno o più sensori registrano dei valori di inclinazione in costante cambiamento, attribuibili ad un fenomeno di deriva dello strumento, il sistema di inclinometri fissi deve essere rimosso per ritarare i sensori. Contemporaneamente dovrebbero essere eseguite una o più letture con una sonda inclinometrica come quella descritta nella parte I.

Calcoli ed elaborazione dei dati

10. (a) Tutti i dati dovrebbero essere elaborati entro 24 ore dall'esecuzione delle letture, a meno che non sia specificato altrimenti.

(b) Si verificano i dati di campagna segnando sul modulo di lettura gli errori evidenti. Eventuali correzioni devono essere chiaramente indicate.

(c) Le variazioni di inclinazione locale ($\delta\theta$ in gradi) possono essere, se richiesto, convertite in spostamenti locali (Δ in mm) usando la seguente formula:

$$\Delta = L \cdot \text{sen } \delta\theta$$

(in cui L è la distanza in mm tra due sensori successivi).

(d) Le variazioni degli spostamenti locali possono essere sommate a partire dal fondo del tubo inclinometrico per costruire un grafico degli spostamenti integrali in funzione della profondità.

(e) I grafici degli spostamenti in funzione delle profondità così ottenuti [paragrafi 10(c) e 10(d)] possono dare, in funzione della distanza tra i sensori, solamente un'indicazione approssimata sull'andamento degli spostamenti in profondità; può essere

utile preparare dei grafici delle variazioni di inclinazione locale o delle variazioni di spostamento* in funzione del tempo relativi ad ogni sensore[13] (ad es. vedi Fig. 8).

Presentazioni dei risultati

11. I risultati dovrebbero essere presentati nelle due seguenti forme, a meno che non sia specificato diversamente: un Rapporto sull'Installazione, contenente i dati sulla strumentazione installata, seguito da Rapporti sulle Misure in cui siano presentati periodicamente i risultati dei rilievi in situ. I rapporti sulle misure saranno richiesti, in particolare, immediatamente dopo degli allarmi o dei movimenti significativi per minimizzare il ritardo che intercorre tra il momento in cui si riconosce un comportamento preoccupante e l'attuazione di qualsiasi intervento che si renda necessario.

12. Il Rapporto sull'Installazione dovrebbe contenere le seguenti informazioni:

a) la descrizione degli strumenti impiegati ed i relativi schemi costruttivi e di installazione, ivi comprese delle dettagliate specifiche di funzionamento e la letteratura tecnica prodotta dal costruttore sulla propria strumentazione.

(b) Particolari sui metodi di installazione, taratura e misura. Si può far riferimento a queste raccomandazioni segnalando solamente le differenze rispetto alle procedure raccomandate.

(c) Una planimetria con l'ubicazione dei sondaggi in cui siano riportati la profondità, il diametro e le coordinate plano-altimetriche della testa di ogni tubo.

(d) Per ciascun tubo deve essere preparata una stratigrafia geotecnica del terreno in cui è stato installato, nella quale siano indicate anche la posizione, la profondità a cui si trovano i manicotti di giunzione ed i sensori. Deve inoltre essere indicato l'azimut delle guide del tubo specificando chiaramente la convenzione adottata per il segno dei movimenti e per la misura degli angoli.

(e) Per ogni tubo deve essere preparato un grafico che riporti i due profili iniziali del tubo (secondo le due direzioni individuate dalle coppie di guide opposte, n.d.t.) rilevati con una sonda inclinometrica. Le letture di zero debbono essere riportate anche sotto forma di tabelle. È consigliabile riportare anche le misure di spiralatura di ciascun tubo.

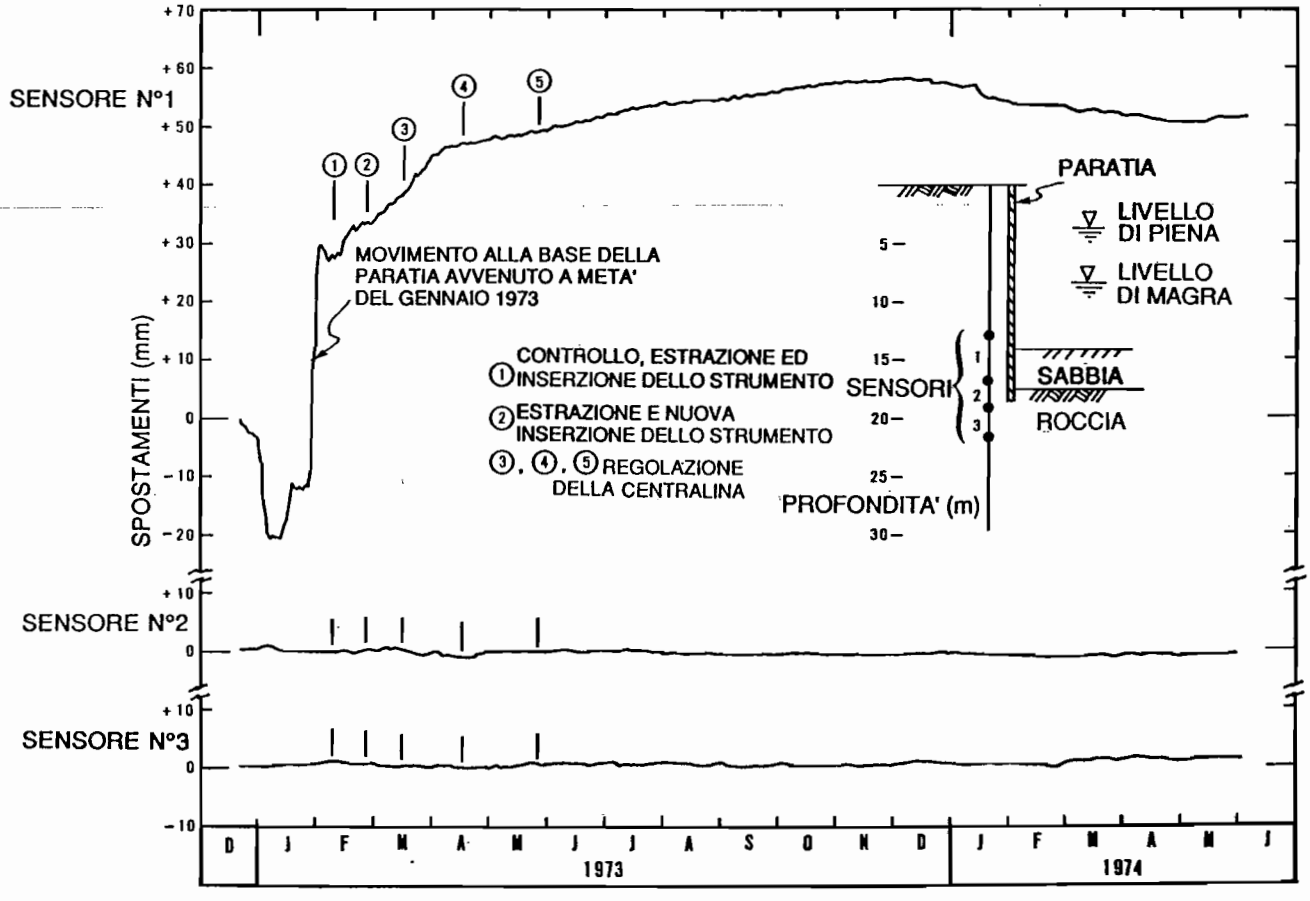


Fig. 8 - Registrazione di un inclinometro fisso posto a tergo di una paratia fondata in roccia.

* In realtà non esistono le «variazioni di spostamento», ma solo lo «spostamento», pertanto questo termine va interpretato come una svista dei redattori delle Raccomandazioni (n.d.t.).

13. Il Rapporto sulle Misure dovrebbe comprendere le seguenti voci:

(a) l'insieme dei moduli di lettura, utilizzati in situ, contenenti i dati fondamentali. I moduli devono riguardare tutte le letture successive all'ultima inclusa nel rapporto precedente.

(b) Grafici sull'andamento degli spostamenti con la profondità e con il tempo, sufficienti a localizzare tutti gli spostamenti significativi ed a mostrarne chiaramente l'entità, la velocità e la direzione[14].

(c) Un breve commento dei dati che richiami l'attenzione sugli spostamenti significativi e sugli inconvenienti occorsi durante l'esecuzione di tutte le misure effettuate dopo l'emissione del rapporto precedente.

Parte III

Raccomandazioni per il controllo dei movimenti in roccia tramite clinometri

Scopo

1. (a) Un clinometro è costituito da un contenitore nel quale è montato un trasduttore eccitato dalla forza di gravità che rilevi inclinazioni statiche o dinamiche in un punto. Normalmente un clinometro portatile è posto temporaneamente su una piastra di riferimento (Fig.9) incollata o bullonata su roccia integra posta in superficie o in galleria o cunicolo[17]. Dalla misura periodica dell'inclinazione di ogni piastra si può risalire all'entità ed alla velocità delle deformazioni angolari.

(b) Sono disponibili anche clinometri non portatili che possono essere usati per misurare variazioni angolari statiche o dinamiche e sono in grado di fornire un controllo continuo dei movimenti[18]. Questi sensori sono montati in un involucro stagno e vengono incollati oppure bullonati e cementati direttamente sulla superficie della roccia. Per la lettura si può prevedere sia un accesso diretto allo strumento sia un sistema di trasmissione del segnale a distanza.

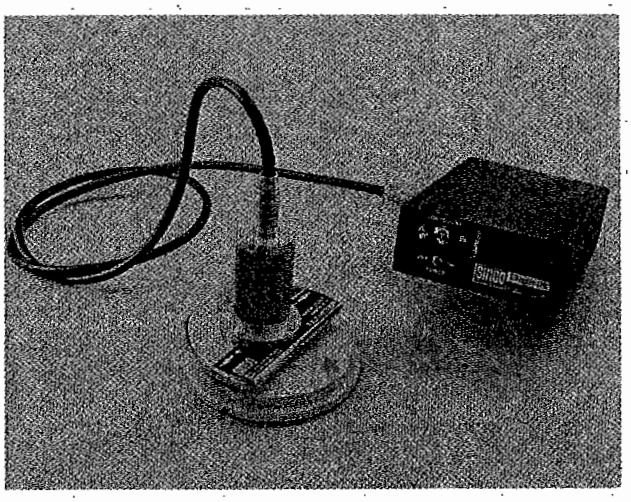


Fig. 9 - Clinometro portatile con piastra di riferimento e centralina.

(c) I clinometri, a differenza delle sonde inclinometriche o degli inclinometri fissi descritti nella I e II parte, misurano solamente l'inclinazione in un singolo punto, generalmente accessibile. Questi strumenti non sono utilizzabili in profondità lungo sondaggi, anche se, in alcuni casi, possono essere interrati in modo permanente.

(d) La piastra di riferimento deve essere ancorata su una superficie che rispecchi effettivamente i movimenti dell'ammasso roccioso oggetto dell'indagine. I primi metri superficiali in roccia alterata possono essere evitati poggiando la piastra di riferimento su un tubo o su un pilastro di calcestruzzo fondato sulla roccia integra 1 o 2 metri al di sotto della superficie. Il pilastro non deve essere in contatto con il terreno circostante al di sopra del piano di fondazione. Un'insufficiente protezione della piastra di riferimento dagli effetti della temperatura e dalle variazioni di umidità può portare a letture errate.

Strumentazione

2. Preparazione della superficie e attrezzatura di perforazione comprendente:

(a) scalpelli, mazza e martello pneumatico per preparare una superficie in roccia fresca pulita e regolare, priva di detriti.

(b) Una perforatrice per realizzare fori del diametro di 15-40 mm fino a circa 300 mm di profondità per la messa in opera di bulloni.

(c) Una perforatrice per realizzare un foro superficiale di diametro adatto a contenere un tubo di ancoraggio in acciaio del diametro di 70-150 mm, lungo fino a 3 m. È preferibile realizzare il foro a carotaggio continuo ma se non si dispone di un carotiere si può usare una sonda periscopica per ispezionare il foro.

(d) Una perforatrice per realizzare un foro superficiale di largo diametro per la posa in opera di un pilastro di calcestruzzo isolato. Si deve evitare l'uso di esplosivo.

3. Piastre superficiali di riferimento e attrezzatura di installazione:

(a) La piastra sulla quale il clinometro portatile viene temporaneamente collocato deve essere costruita in metallo indeformabile, roccia o ceramica. La superficie della piastra deve resistere alla corrosione, deve essere facile da pulire e difficilmente danneggiabile. La superficie della piastra deve essere completa di un sistema di posizionamento preciso,

adattabile al sensore, che ne consenta la regolazione in due direzioni perpendicolari. Il sistema di posizionamento deve permettere la rotazione del sensore di 180° per poterne correggere il «fuori zero». Per un clinometro sensibile un riposizionamento non accurato può costituire la maggior fonte di errore.

(b) Resina epossidica o al poliestere, cemento Portland o simile per il fissaggio della piastra sulla superficie rocciosa o su una superficie metallica.

(c) Bulloni, se è richiesto un ancoraggio supplementare.

(d) Tubo di acciaio dai 70 ai 150 mm di diametro, lungo fino a 3 m, da cementare in un foro superficiale, isolato dai primi 1 o 2 m di roccia alterata in superficie. Il tubo deve avere una piastra di riferimento saldata nella posizione più opportuna.

(e) I materiali per costruire un pilastro di calcestruzzo o un plinto fondato al di sotto della superficie della roccia, isolato dai primi 1 o 2 metri di roccia alterata in superficie.

5. Sensore e centralina del clinometro (per esempio, Fig.9) comprendenti:

(a) Nel caso di clinometri portatili. Un involucro contenente il trasduttore[19], la cui base sia completa di un sistema di posizionamento compatibile con la piastra di riferimento. La base del sensore deve essere in materiale anti-corrosivo, facile da pulire e difficile da danneggiare.

(b) Nel caso di clinometri fissi, il sensore deve essere elettrico, racchiuso in un involucro stagno concepito per essere fissato alla superficie della roccia in modo permanente. Il sensore elettrico è collegato con un cavo permanente ad una centralina di acquisizione. L'involucro del sensore dovrebbe avere, preferibilmente, una superficie di riferimento su cui possa essere applicato un clinometro portatile per il controllo periodico del «fuori zero» e di altri eventuali malfunzionamenti del clinometro permanente.

(c) Il campo di misura, la sensibilità e l'accuratezza del clinometro e della centralina di acquisizione dovrebbero essere specificati in relazione alle esigenze progettuali. Il campo e la risoluzione dei clinometri variano considerevolmente; ±30° e 10 secondi, ±0,7° e 2 secondi sono delle specifiche tipiche.

(d) L'attrezzatura dovrebbe essere progettata in modo che l'accuratezza richiesta non risenta delle normali manipolazioni, della pressione dell'acqua e degli ambienti corrosivi.

6. Attrezzatura per la taratura comprendente:

(a) Dispositivo che consenta il controllo iniziale dei clinometri fissi o il controllo periodico in situ dei clinometri portatili e delle relative centraline. Il dispositivo di taratura dovrebbe consentire di porre il sensore nella normale posizione di funzionamento e di regolarlo dall'orizzontale fino al massimo angolo di funzionamento con almeno una posizione di arresto su entrambi i lati rispetto alla verticale.

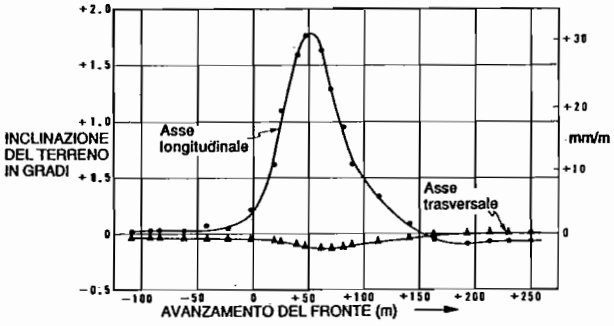


Fig. 10 - Inclinazioni della superficie del terreno causate dall'avanzamento del fronte di una coltivazione mineraria in sotterraneo per taglio lungo.

Il banco di taratura dovrebbe essere provvisto di un apparecchio che misuri l'angolo di inclinazione con accuratezza migliore della risoluzione del sensore del clinometro portatile[20].

Procedura

7. Indagini preliminari:

(a) Le caratteristiche del sito e del (progetto) dovrebbero essere esaminate dettagliatamente per poter specificare le prestazioni richieste alla strumentazione.

(b) L'ubicazione dei clinometri dovrebbe essere decisa in base alle condizioni geotecniche del sito, prendendo in esame l'entità e la direzione presunta degli spostamenti e le caratteristiche degli altri strumenti da installare[4].

(c) Si dovrebbero accertare l'entità e la profondità dell'alterazione della fascia superficiale della roccia per poggiare o ancorare il clinometro su roccia integra. Se non si riesce ad eliminare l'influenza dei movimenti superficiali localizzati o della disomogeneità del terreno, si possono inficiare le misure, specie se i veri movimenti del sottosuolo sono modesti. Se l'alterazione è diffusa è preferibile posizionare i clinometri in sotterraneo (in galleria o in cunicolo).

8. Installazione:

(a) Se in superficie la roccia è fresca, dura e non allentata, il lavoro di preparazione per ottenere una superficie di roccia livellata e priva di detriti è minimo.

(b) I fori per la posa dei bulloni dovrebbero essere eseguiti solo se l'adesione tra roccia e cemento non è affidabile. In alternativa, si può perforare o scavare un foro superficiale per l'installazione di un tubo metallico di ancoraggio o di un pilastro di cemento armato, isolato dalla roccia alterata superficiale e fondato su roccia fresca.

(c) La base della piastra di riferimento o del clinometro fisso, dopo essere stata attentamente pulita e raschiata, viene orientata secondo la direzione di misura richiesta e cementata o incollata nella giusta posizione sulla roccia, sull'ancoraggio o sul pilastro, dopodiché viene messa a livello. L'azimut dovrebbe essere annotato con un'accuratezza di $\pm 3°$.

(d) Un tappo od un coperchio di protezione dovrebbe essere installato sulla piastra di riferimento o sul clinometro per evitarne il danneggiamento.

9. Letture:

(a) I clinometri rimovibili dovrebbero essere tarati prima dell'installazione

(b) I clinometri portatili dovrebbero essere controllati in sito prima e dopo ogni lettura giornaliera. Gli errori strumentali dovrebbero essere analizzati prontamente e corretti; dovrebbe inoltre essere predisposto un libretto delle tarature e degli interventi. Gli interventi superflui devono essere evitati.

(c) Diverse letture di zero dovrebbero essere effettuate non appena il cemento abbia fatto presa. Queste letture, mediate, costituiranno un riferimento per ogni successiva lettura. La cadenza delle letture va programmata dal progettista sulla base delle caratteristiche del sito[9]. Ogni lettura dovrebbe comprendere almeno le operazioni ai punti 9(e) e 9(d) esposti di seguito.

(d) La piastra di riferimento ed il clinometro portatile vengono puliti con un panno asciutto ed ispezionati per verificare la presenza di danni o di sporcizia. Il clinometro viene accuratamente posto sulla piastra di riferimento e si effettuano le letture. Il clinometro viene rimosso, e, dopo aver nuovamente pulito le superfici di contatto, riposizionato sulla piastra. Questa procedura si ripete tre o quattro volte fino a che non si ottengono delle letture tra loro congruenti. Dopo aver ruotato il clinometro di 180° si ripetono le letture, pulendo ogni volta le superfici di contatto.

(e) La procedura 9(d) viene ripetuta con il clinometro posto a 90° rispetto alla posizione iniziale.

(f) Un clinometro permanente può essere letto manualmente o automaticamente ad intervalli di tempo convenienti. L'apparecchio dovrebbe, se possibile, essere controllato periodicamente con un clinometro portatile come descritto ai punti 9(d) e 9(e).

Calcoli ed elaborazione dei dati

10. (a) A meno che non sia specificato diversamente, i dati dovrebbero essere elaborati entro 24 ore dall'esecuzione delle misure[11].

(b) Si verificano i dati di campagna[12] segnando sul modulo di lettura gli errori evidenti. Eventuali correzioni devono essere chiaramente indicate.

(c) Le coppie di letture opposte eseguite con il clinometro portatile vengono mediate per eliminare gli errori di fuori zero. La direzione delle rotazioni angolari deve essere controllata e registrata attentamente.

(d) Le letture singole ottenute con i clinometri permanenti possono essere depurate dall'errore di fuori zero sulla base di letture periodiche effettuate con un clinometro portatile in entrambe le direzioni opposte.

(e) Le letture corrette vengono confrontate con le letture iniziali della stessa postazione per determinare le variazioni di angolo o di spostamento.

(f) Si eseguono i grafici delle variazioni angolari o di spostamento in funzione del tempo, per ciascuna piastra di riferimento.

Presentazione dei risultati

11. I risultati dovrebbero essere presentati nelle due seguenti forme, a meno che non sia specificato diversamente: un Rapporto sull'Installazione, contenente i dati sulla strumentazione installata, seguito da Rapporti sulle Misure in cui siano presentati periodicamente i risultati dei rilievi in situ.

I Rapporti sulle Misure dovranno essere redatti con una certa frequenza in modo da minimizzare il ritardo che intercorre tra il momento in cui si riconosce un comportamento preoccupante della strumentazione e l'attuazione di qualsiasi intervento che si renda necessario.

12. Il rapporto sull'installazione dovrebbe contenere le seguenti informazioni:

(a) la descrizione e gli schemi costruttivi e di installazione degli strumenti impiegati, ivi comprese delle dettagliate specifiche di funzionamento e la letteratura tecnica prodotta dal costruttore sulla propria strumentazione.

(b) Una planimetria con l'ubicazione delle stazioni di misura completa di dati particolareggiati sulle piastre di riferimento e la loro posizione planimetrica ed altimetrica, rilevate topograficamente.

(c) Particolari sui metodi utilizzati per l'installazione, la taratura e la misura dei clinometri; si può far riferimento a queste Raccomandazioni ISRM segnalando solo le differenze rispetto alle procedure raccomandate.

(d) Un diagramma che mostri le caratteristiche geotecniche del terreno e la posizione della piastra di riferimento per ciascuna stazione. Si deve riportare l'azimut delle guide delle piastre di riferimento mettendo bene in evidenza le convenzioni adottate per il segno degli spostamenti e la misura degli angoli.

(e) Un tabulato contenente l'elenco delle letture iniziali dei clinometri.

13. Il Rapporto sulle Misure dovrebbe comprendere:

(a) Una serie di tabelle con i risultati delle misure di campagna; le tabelle debbono coprire tutte le osservazioni successive al rapporto precedente.

b) Grafici delle variazioni angolari o degli spostamenti in funzione del tempo sufficienti a mostrare chiaramente entità, velocità e direzione di tutti i movimenti significativi[8].

c) Un breve commento dei dati che richiami l'attenzione sugli spostamenti significativi e sugli inconvenienti occorsi durante l'esecuzione delle misure effettuate dopo l'emissione del rapporto precedente.

Note

1. Per misurare sia gli spostamenti orizzontali sia quelli verticali la sonda inclinometrica può essere usata insieme ad una sonda estensimetrica che agisce nel tubo inclinometrico.

2. Il sensore può essere costituito, ad esempio, da un potenziometro rotante, da estensimetri elettrici, corde vibranti o da un servo-accelerometro [GREEN, 1973]. Il trasduttore può essere uniassiale o biassiale. Se nella sonda è montato un trasduttore biassiale si possono eseguire contemporaneamente letture su due direzioni perpendicolari. Questa caratteristica consente di inserire la sonda nel tubo inclinometrico due sole volte anziché quattro.

3. La centralina di acquisizione può essere costituita da un voltmetro a lettura diretta, da un ponte a bilanciamento di zero manuale, da un voltmetro digitale o da un ponte a bilanciamento di zero automatico accoppiati ad un display digitale ed un circuito integrato per sommare gli spostamenti locali. Sono reperibili sul mercato centraline con dispositivo di stampa o di registrazione su nastro magnetico.

4. Il foro di sondaggio deve essere profondo tanto da consentire l'installazione del tubo inclinometrico per almeno 3 m in terreno stabile; in questo modo gli spostamenti a profondità inferiore possono essere riferiti ad un dato certo. Se si registrano movimenti negli ultimi 3 m del tubo, la base del tubo deve ritenersi in terreno non stabile. Quando non si può evitare questa situazione la posizione della testa del tubo deve essere misurata periodicamente con dei rilievi topografici di precisione. La precisione di questi rilievi, che costituiscono la base per il calcolo dei valori assoluti di spostamento, dovrebbe essere idealmente migliore di ± 1 mm.

5. L'azimut corretto del tubo inclinometrico deve essere mantenuto dall'inizio alla fine dell'installazione del tubo nel foro di sondaggio. Un tubo installato inavvertitamente con un'orientazione errata, non deve essere ruotato per correggere l'azimut altrimenti si rischia di peggiorarne la spiralatura delle guide.

6. Poiché il peso dell'unità di volume dell'acqua con cui si riempie il tubo inclinometrico è inferiore a quello della boiacca di cemento circostante, normalmente, per mantenere il tubo a contatto col fondo foro, si deve applicare una forza verticale sulla testa del tubo fino a che il cemento non abbia fatto presa.

7. Se è richiesta l'esatta direzione del movimento, la spiralatura delle guide del tubo dovrà essere controllata per mezzo di appositi strumenti che possono essere noleggiati da alcuni costruttori. In tal modo le direzioni di spostamento possono essere corrette tenendo conto della spiralatura.

8. In fori molto profondi il pompaggio dell'acqua dal tubo può presentare delle difficoltà.

9. Generalmente la frequenza delle letture è scelta in base alla velocità dei movimenti registrati. Quando i movimenti sono rapidi od in accelerazione, la frequenza delle letture può essere maggiore di quanto richiesto in movimenti lenti o in fase di rallentamento.

10. I dati riportati nelle Figg. 2 e 3a, si riferiscono ad una sonda lunga 12 pollici (30 cm), inserita in un tubo inclinometrico in spezzoni da 10 piedi (~ 3,00 m) uniti con giunti «a filo». Lo schema della tabella riportato in Fig. 3 e 4 si è rivelato il più efficiente per l'elaborazione manuale dei dati letti con sonde inclinometriche, a prescindere dalle unità di misura impiegate.

11. I dati possono essere elaborati sia manualmente sia tramite calcolatore; in ogni caso le varie fasi del calcolo devono essere completamente supervisionate e controllate per prevenire errori di lettura e di trascrizione e per assicurare che venga colto il significato di qualsiasi comportamento anomalo. Ad esempio, spesso è difficile distinguere tra anomalie legate al comportamento del terreno e problemi dell'apparecchiatura.

12. L'individuazione di modesti movimenti della roccia in fori profondi pone dei problemi particolari. Se il tubo inclinometrico non è verticale, piccole variazioni dell'allineamento tra i trasduttori e le guide possono causare errori notevoli che danno luogo a movimenti apparenti. Per tenere conto di questi errori si dispone di tecniche di analisi numerica sofisticate. Se si sono verificati movimenti del terreno ed allo stesso tempo è cambiata l'orientazione dei trasduttori, è difficile stabilire un adeguato fattore di correzione e si richiede un attento giudizio.

13. Si richiedono cura ed esperienza per:
- Scegliere delle forme di presentazione dei risultati chiare ed economiche.
- Evidenziare nel miglior modo possibile i caratteri principali con cui si manifestano gli spostamenti.
- Evitare confusioni e grafici superflui.

14. In generale, tutti i movimenti che si manifestano con una velocità costante o con delle accelerazioni possono essere considerati significativi. Comunque la natura dei movimenti degni di nota ed il lasso di tempo intercorrente tra l'esecuzione delle misure ed il Rapporto sulle Misure dovrebbero essere chiaramente specificati all'inizio della campagna di misura e rivisti periodicamente alla luce dell'andamento dei movimenti. Il Rapporto sulle Misure dovrebbe essere il più semplice possibile per limtare i ritardi.

15. I trasduttori possono essere ad esempio a corda vibrante o dei servo accelerometri; entrambi i tipi sono stabili su lunghi periodi, fatto questo di fondamentale importanza. Normalmente si usano trasduttori uniassiali, attentamente orientati nella direzione lungo cui si suppone avverranno i movimenti. A volte possono essere usati dei trasduttori biassiali.

16. Nelle fasi iniziali, per assicurarsi che il sistema funzioni correttamente ed evitare troppi falsi allarmi, può essere richiesto un considerevole numero di supervisioni, di controlli dell'apparecchiatura e di riesami dei dati.

17. I clinometri possono anche essere installati su strutture fondate sulla roccia, ad esempio dighe in calcestruzzo o fondazioni di turbine.

18. Esistono anche clinometri molto sensibili con un fondo scala modesto, progettati per misurare angoli dell'ordine dei 10-8 radianti [SIMON *et al.*, 1968], usati principalmente per rilevare maree terrestri ed altri fenomeni sismici o geodetici.

19. Il trasduttore può essere, ad esempio, una livella elettrolitica ad alcool, un pendolo a corda vibrante o un servo-accelerometro o, altrimenti, una livella di precisione ad alcool con un sistema micrometrico manuale di tipo ottico-meccanico non adatto alla registrazione automatica.

20. È stato accertato che ciò è difficile da raggiungere usando un clinometro con fondo scala limitato e risoluzione di 1 o 2 secondi; sono necessari dei compromessi.

Ringraziamenti

Queste raccomandazioni sono state scritte da G.E. Green (U.S.A.). La parte della prima versione è stata riscritta da J.A. Franklin (Coordinatore) del Canada mentre degli estesi commenti sono stati ricevuti da C.J. Dunnicliff (U.S.A.). Contributi sono stati dati anche da: A.G. Bennet (Australia); J.F. Silveira (Bra-

sile); P. Egger (Svizzera); A.D.M. Perman e D.E. Sherwood (Gran Bretagna); W.J. Tesch e S.D. Wilson (U.S.A.)

BIBLIOGRAFIA

BROMWELL, L.G., RYAN C.R., and TOTH W.E. (1971) - *Recording inclinometer for measuring soil movement*. Proc. 4th Pan Amer. Conf. Soil Mech., Puerto Rico n. 2, pp. 333-343.

BURLAND, J.B., and MOORE J.F.A. (1973) - *The measurement of ground displacement around deep excavations*. Field instrumentation in Geotechnical Engineering, London, Butterworths, pp. 70-84.

CORNFORTH, D.H. (1973) - *Performance Characteristics of the Slope Indicator Series 200 B Inclinometer*. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, London, Butterworths, pp. 126-135.

DUNNICLIFF C.J. (1971) - *Equipment for field deformation measurements*. Proc. 4th Pan Amer. Conf. Soil Mech., Puerto Rico n. 2, pp. 319-332.

GREEN G.E. (1973) - *Principles and performance of two inclinometers for measuring horizontal movements*. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, London, Butterworths, pp. 166-179.

GOULD J.P., DUNNICLIFF C.J. (1971) - *Accuracy of field deformation measurements*. Proc. 4th Pan Amer. Conf. Soil Mech., Puerto Rico, n. 1, pp. 313-366.

KING G.C.P., BILHAM R.G. (1973) - *Strain measurement instrumentation and technique*. Phil. Trans. R. Soc., Lond., A., 274, pp. 209-217.

SHERWOOD D.E., CURRY B. (1973) - *Experience in using electric tiltmeters*. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, London, Butterworths, pp. 382-395.

SIMON I., EMSLIE A.G., STRONG P.F., MCCONNELL R.K. (1968) - *Sensitive tiltmeter utilizing a diamagnetic suspension*. Rev. Scientific Instru., 39, n. 11.

WITTAKER B.N., FORRESTER D.J. (1973) - *Measurement of ground strain and tilt arising from mining subsidence*. Field Instrumentation in Geotechnical Engineering, London, Butterworths, pp. 437-447.

WILSON S.D. (1959) - *Application of the principles of soil mechanics to open pit mining*. Quart. Colorado School of Mines, Symp. on Rock Mechs., Golden, Colo. 54, n. 3.

WILSON S.D. (1969) - *Field instrumentation for excavations*. Proc. 18th Annual Soils Conf., Kansas, Univ. of Kansas.

WILSON S.D. (1970) - *Observational data on ground movements related to slope instability*. 6th Terzaghi Lecture, Proc. Am. Soc.. Civ. Engrs., 96, SM5, pp. 1519-1544.

WILSON S.D. (1973) - *Equipment for the observation of settlements and stresses of bases: Speciality Session 1*. Proc. 8th Int. Conf. Soil Mechs. & Found. Eng., Moscow, vol. XXXXIII, pp. 7-11.

WILSON S.D., MIKKELSEN P.E. (1978) - *Chapter 5: Field Instrumentation*, in TRB Special Publication n. 29, Landslides, Revised Edition (in press).