

8. RILIEVI INCLINOMETRICI

INDICE

8.1. PREMESSA	pag.	121
8.2. PROBLEMATICHE E METODOLOGIE	"	121
8.3. RILIEVI	"	123

Data l'eccezionale profondità, è stato necessario affrontare e risolvere notevoli problemi sia in fase esecutiva, per ottenere una corretta installazione, sia in fase di elaborazione dei dati, per tener conto dell'influenza che i diversi fattori in gioco hanno esercitato agli effetti della precisione.

8.1. PREMESSA

Allo scopo di seguire e valutare gli spostamenti del versante in frana, si è provveduto ad attrezzare le perforazioni di sondaggio con altrettante tubazioni inclinometriche.

L'ubicazione è riportata sulla planimetria di Fig. 8.1, mentre le profondità risultano dalla Tab. 8.1.

8.2. PROBLEMATICHE E METODOLOGIE

Come è noto i rilievi inclinometrici vengono eseguiti facendo risalire, dall'interno di uno speciale tubo guida, una sonda recante una coppia di servo-accelerometri disposti a 90° e ortogonalmente all'asse.

La sonda, a mezzo di un cavo elettrico, invia ad una apposita centralina dei segnali analogici ("digits");

stazione	AN-1	AN-2	AN-3	AN-4	AN-5	AN-8	AN-9
prof. m	124	101	110	94	122	37	120
ril. n.	data (1983-84)						
0	23/3	28/3	22/4	22/4	19/5	18/6	27/6
1	30/3	31/3	28/4	28/4	25/5	27/6	6/7
2	6/4	6/4	11/5	11/5	1/6	6/7	16/7
3	13/4	13/4	1/6	25/5	13/6	16/7	30/7
4	21/4	21/4	17/6	1/6	17/6	1/8	5/8
5	1/5	1/5	6/7	17/6	6/7	22/8	20/8
6	10/5	10/5	15/7	6/7	16/7	31/8	31/8
7	1/6	1/6	4/8	5/8	5/8	15/9	15/9
8	18/6	18/6	22/8	22/8	22/8	30/9	30/9
9	15/7	15/7	31/8	31/8	15/9	17/10	17/10
10	5/8	4/8	15/9	15/9	5/10	5/11	5/11
11	5/9	5/9	5/10	5/10	7/11	5/12	5/12
12	5/10	5/10	5/11	5/11	5/12	5/1	5/1
13	7/11	5/11	5/12	5/12	5/1	5/2	5/2
14	5/12	5/12	5/1	5/1	5/2	5/3	5/3
15	5/1	5/1	5/2	5/2	5/3	5/4	5/4
16	5/2	5/2	—	5/3	5/4	5/5	—
17	5/3	5/3	—	—	5/5	5/6	—

Tabella 8.1 - Calendario dei rilievi.

(*)Dott. Ing. BRUNO BIANCO. Ing. G. RODIO & C. S.p.A. - Casalmiocco (Milano).

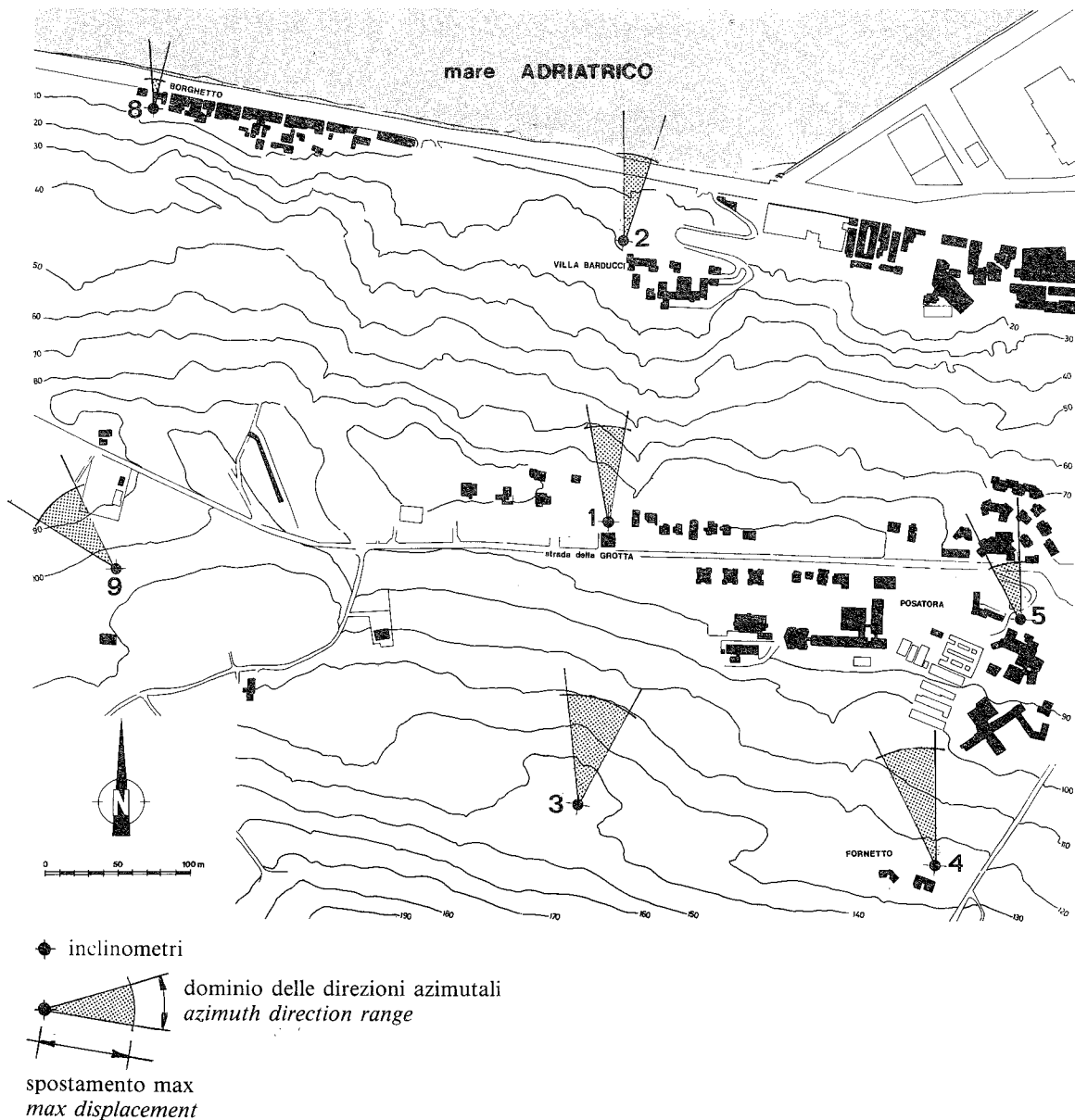


Fig. 8.1 - Planimetria con ubicazione degli inclinometri.
Inclinometers location.

$1 \text{ digit} = 1/20000 \cdot \sin \alpha$, proporzionali all'inclinazione del suo asse rispetto alla verticale (Fig. 8.2).

Noto l'intervallo di lettura "L", si determinano i successivi spostamenti incrementali

$$(1) s_1 = L \cdot \sin \alpha_1$$

il cui integrale fornisce la deformata del tubo $S(z)$.

Il confronto tra le deformate relative a due successivi rilievi fornisce la misura dello spostamento verificatosi (calcolo differenziale).

La precisione dei servo-accelerometri, in condizioni ideali di operatività, è di circa 1-2 *digits*, pari a circa 0,1-0,2 mm/m.

Su profondità notevoli, tuttavia, l'errore può risultare non più trascurabile (ad esempio su 100 m potrebbe essere di alcuni centimetri).

All'errore strumentale possono inoltre sommarsi altri errori, sia di tipo sistematico che accidentale, la cui entità tende ad aumentare con la profondità del tubo: le possibili cause di questi errori sono:

- alterazione del valore di fondo scala, dovuta alla non verticalità del foro, per cui i servo-accelerometri non operano più nella corretta posizione orizzontale;
- alterazione dell'orientamento azimutale, dovuta in primo luogo alla torsione delle gole del tubo guida, che si può verificare durante l'installazione;
- variazioni termiche, sia lungo la verticale che tra rilievi successivi, che alterano i segnali analogici;
- umidità sul cavo o all'interno della sonda, con modifica del campo di impedenza e alterazione dei segnali (specie in presenza di pressioni idrostatiche superiori a 5 atm.);
- disassamento dei servo accelerometri a seguito di urti

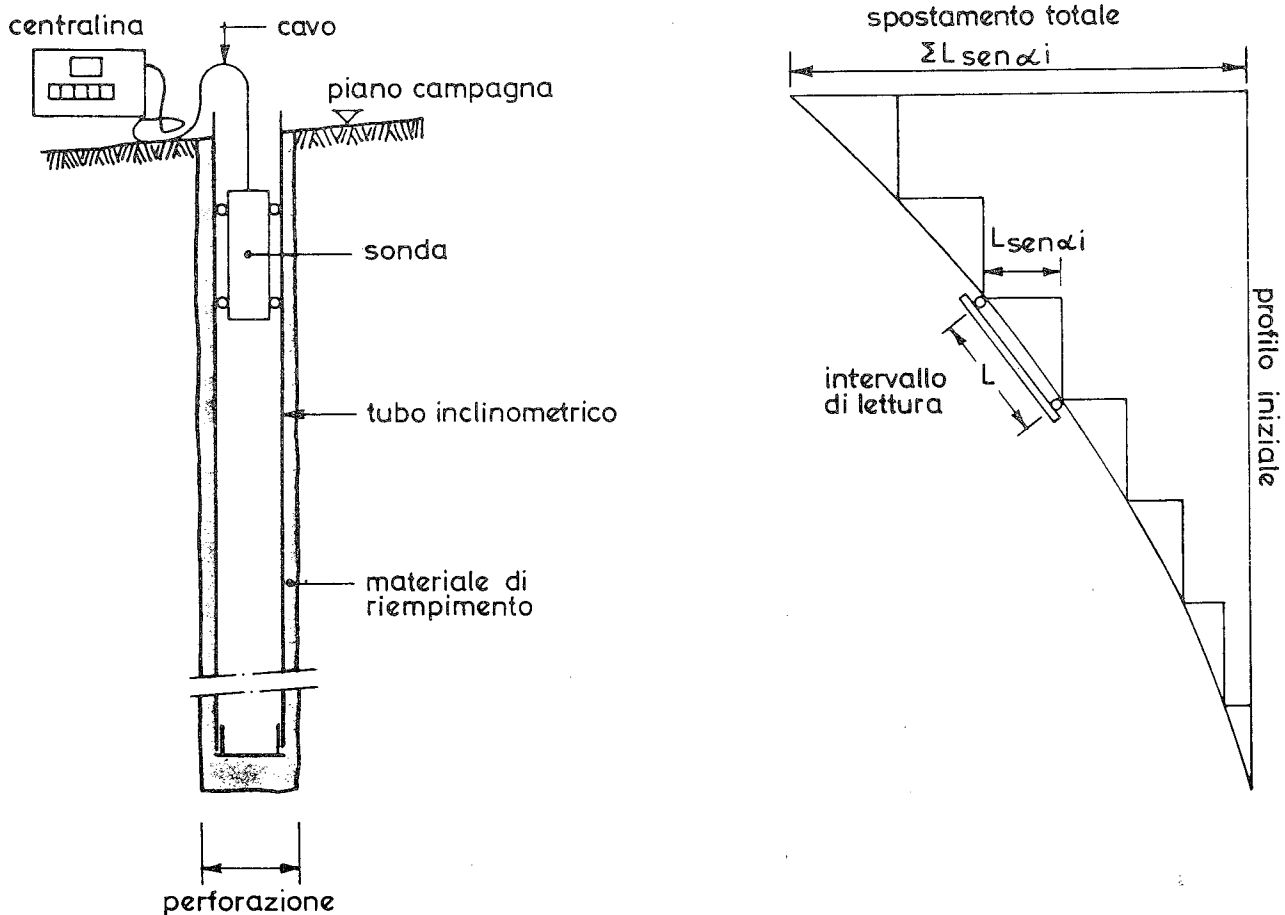


Fig. 8.2 - Attrezzatura e schema di funzionamento dell'inclinometro.
Equipment and inclinometer principle.

o di altri inconvenienti accidentali, con modifica dell'azimut.

Tra questi, i primi due errori sono di tipo sistematico, gli altri, invece, sono di tipo accidentale; entrambi i tipi comportano delle ripercussioni sulla precisione dell'intero rilievo per effetto dell'incrementalità del calcolo.

Gli errori di tipo accidentale sono in genere più facilmente identificabili, soprattutto seguendo le procedure corrette di misura (doppia o quadrupla lettura, calcolo differenziale, etc.), e comunque, poiché si incrementano proporzionalmente alla radice quadrata del numero di misure

$$(2) n_m = Z_{\max}/L$$

hanno in genere effetti meno sensibili degli errori sistematici, che invece si incrementano in proporzione diretta con n_m .

Per evitare il verificarsi di errori accidentali sono state adottate delle accurate misure di salvaguardia, quali il controllo periodico dell'attrezzatura in laboratorio, l'impiego di più adeguate protezioni sia sul cavo che sulla sonda, ed infine sono state approntate delle idonee curve di taratura della strumentazione.

Per gli errori sistematici, invece, si è provveduto a rilevare l'esatta geometria dei tubi, misurandone la

torsione delle gole e la deviazione iniziale della verticale, che numericamente equivale ad un insieme di valori $\text{sen} \alpha_i = 0$.

L'analisi delle possibili fonti di errore ha costituito un momento essenziale e qualificante della elaborazione dei dati in quanto, data la lunghezza delle tubazioni, gli errori avrebbero potuto assumere valori di entità non tollerabile.

Ad esempio, infatti, un errore di assetto azimutale $= 1^\circ$, dovuto alla torsione delle gole o ad un minimo disassamento dei servo-accelerometri, supponendo una "spiombatura" del foro pari all'1,5% e approssimando il calcolo seno-tangente-corda-arco, darebbe luogo ad un errore

$$(3) e = R \cdot \alpha^{\text{rad}} = 0,015 \cdot 1/180 \cdot \pi = 2,6 \cdot 10^{-4}$$

vale a dire circa 0,26 mm/m/grado. Per una profondità di 100 m, dunque, per ogni grado di errore azimutale si potrebbe avere un errore nella valutazione dello spostamento a piano campagna di circa 26 mm.

8.3. RILIEVI

La strumentazione è stata tenuta sotto controllo per circa un anno, provvedendo ad effettuare periodi-

camente dei rilievi. In Tab. 8.1 è riportato il relativo calendario; con il numero 0 si è indicato il rilievo assunto come riferimento per il calcolo differenziale.

La mole dell'indagine svolta può essere sintetizzata con le seguenti cifre:

- 708 m di tubazione inclinometrica installata,
- 121 rilievi eseguiti,
- 500.000 dati elaborati.

L'elaborazione è stata eseguita con l'ausilio di un computer, che ha permesso di ottenere per ogni inclinometro e per ogni rilievo un grafico riprodotto, in opportuna scala, le deformate assunte dal tubo.

Il grafico in Fig. 8.3, che si riferisce alla stazione AN-1, riporta le deformate relative ai rilievi che hanno fornito gli spostamenti più significativi.

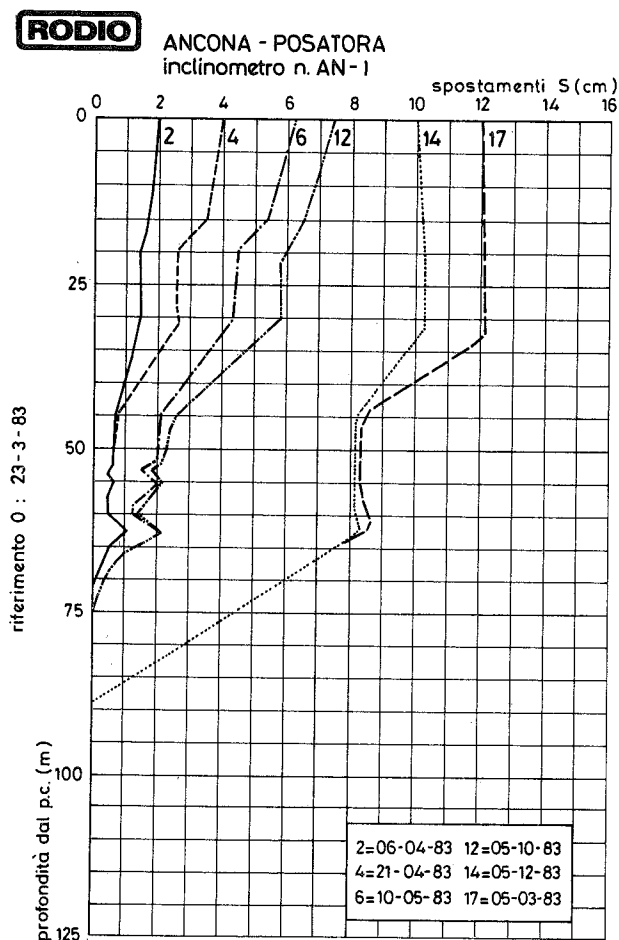


Fig. 8.3 - Grafici "spostamenti-profondità" ottenuti con le misure inclinometriche.

Displacements-depth diagrams derived from inclinometer measurement.

Questi grafici forniscono un'immagine quasi fotografica degli spostamenti del versante in frana, e danno un'idea anche della velocità di traslazione.

Essi, inoltre, consentono di evidenziare anche fenomeni locali di plasticizzazione, caratterizzati da scorrimenti relativi di diversa velocità tra strati adiacenti. È stato interessante verificare che detti fenomeni si sono verificati in corrispondenza di significative variazioni della stratigrafia del terreno.

Le informazioni acquisite con i rilievi inclinometrici hanno consentito di definire con sufficiente precisione la profondità del substrato stabile non interessato dal fenomeno franoso, e soprattutto hanno fornito elementi utili a definire il cinematismo della frana, caratterizzato da scorrimenti sia di tipo traslativo che rotazionale.

Nella Tab. 8.2 sono stati sintetizzati i suddetti elementi, espressi come profondità dei piani di "plasticizzazione" e di "scivolamento", e sono state inoltre indicate anche le quote alle quali, per alcuni tubi, si è verificata la rottura.

stazione I	profondità dei piani di			rottura
	plasticizzazione	scivolamento		
AN-1	I 32	63	75	—
AN-2	I 17	23	55	17
AN-3	I	52	80	64
AN-4	I 9	40	45-50	50
AN-5	I	45	95	—
AN-8	I	8	37(?)	—
AN-9	I	75	10	70

Tabella 8.2 - Elementi geometrici del cinematismo della frana.

I vettori "spostamento", in linea generale, presentano i seguenti elementi caratteristici:

- valori decrescenti con la profondità, per cui il valore massimo di ogni deformata si è generalmente verificato a piano campagna; la "mono-tonia" delle relative curve è interrotta in corrispondenza dei piani di plasticizzazione;
- direzioni delle massime componenti (azimut) piuttosto costanti e convergenti verso il piede della frana, secondo quanto illustrato in Fig. 8.1; fa eccezione la stazione AN-9, che però è limitrofa all'adiacente versante occidentale.

Per le tubazioni interessate da rottura, i rilievi sono proseguiti assumendo come nuova data di riferimento quella corrispondente al primo rilievo effettuato a rottura accertata.

I rilievi successivi alle rotture, seppure utili per il controllo dell'evoluzione della frana, forniscono tuttavia solo delle informazioni parziali, relative al solo tratto di tubazione agibile. Inoltre, poiché il piede delle tubazioni non è più fisso, le misure sono in difetto di un valore pari allo spostamento "rigido assoluto" del masso instabile. (L'assenza di incastro al piede si è probabilmente verificata anche per la stazione AN-8, data la sua minore profondità).

Con il proseguimento dei rilievi è stato quindi possibile continuare a seguire l'evoluzione dei fenomeni deformativi, soprattutto in termini di tendenza delle velocità di traslazione. L'analisi dell'incremento delle deformazioni nel tempo è stata condotta con riferimento agli spostamenti misurati a varie quote, e in particolare a quota testa tubo, alla quale, generalmente, si è verificata la massima deformazione.

Nella Fig. 8.4 sono riportati grafici relativi a tre inclinometri, scelti tra i più significativi.

Il 1° grafico mostra la progressione dello spostamento a piano campagna registrato sulla stazione di controllo AN-1. Nei primi due mesi successivi all'installazione si è avuto uno spostamento crescente con notevole uniformità, con velocità media di circa 1,3 mm/giorno.

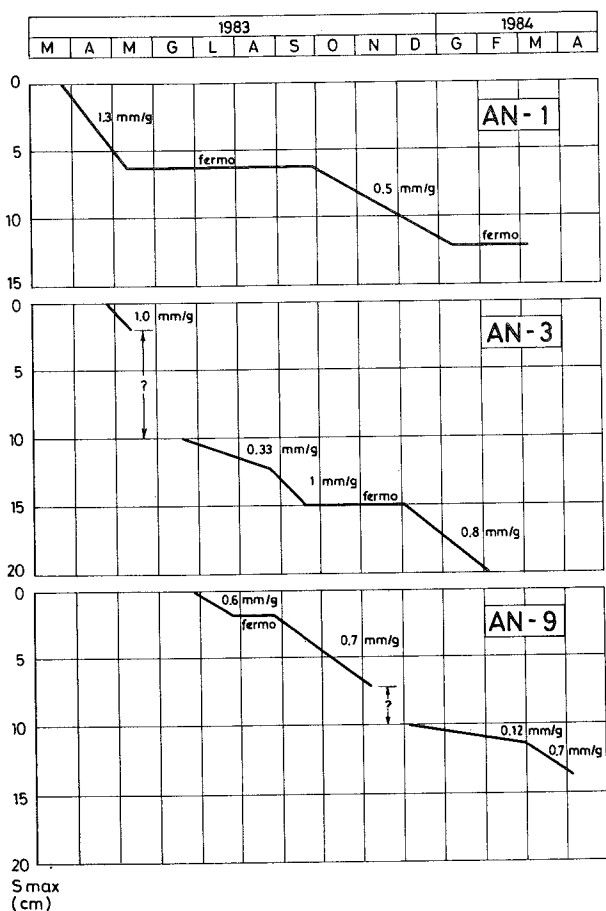


Fig. 8.4 - Grafici "spostamenti max-tempo" e indicazione delle velocità.

Max displacements versus time and relevant speeds.

Si è avuto quindi un periodo di sostanziale stabilità durato circa quattro mesi, seguito da un nuovo periodo di incremento degli spostamenti, ma con velocità attenuata (circa 0,5 mm/g), in occasione della stagione autunnale.

Le ultime misure, eseguite da gennaio a marzo 1984, hanno invece mostrato una nuova fase di sostanziale stabilità.

Il 2° grafico si riferisce alla stazione AN-3 sulla quale, inizialmente, si è avuta una velocità di progressione dello spostamento a piano campagna di circa 1 mm/g che ha portato rapidamente alla rottura del tubo.

In effetti lo spostamento maggiore si è verificato, per questa tubazione, ad una profondità inferiore, con formazione di una gobba piuttosto stretta.

In giugno il tubo inclinometrico era esplorabile solo sino a 64 m di profondità, e pertanto, per proseguire i controlli, è stato necessario adottare una nuova data di riferimento (2a parte del grafico). La composizione

del grafico è stata quindi ottenuta, con sufficiente approssimazione, prolungando idealmente il primo tratto, tenendo altresì conto di tutte le informazioni già acquisite.

La seconda parte del grafico, dunque, è da riguardarsi sostanzialmente come indicativa della tendenza dei successivi spostamenti; infatti, in linea teorica, il nuovo piede della tubazione, a quota 64 m, potrebbe non essere fisso. Tuttavia, sulla base del profilo stratigrafico accertato durante la perforazione, e dall'analisi della dinamica della rottura del tubo, si può ritenere che gli ultimi 12 m di tubazione inclinometrica siano infissi in una formazione stabile.

Il 3° grafico si riferisce alla stazione AN-9; spostamenti significativi sono stati misurati solo a partire dal mese di settembre, con una velocità media, relativamente alla deformazione a piano campagna, stimata in 0,7 mm/g.

Al termine della stagione autunnale si è riscontrata la rottura del tubo a quota 70 m di profondità, ovvero in corrispondenza di una zona ove i fenomeni di plasticizzazione si erano manifestati già in maniera piuttosto evidente.

Le successive misure hanno quindi confermato, seppure con le limitazioni interpretative di cui si è già detto, la tendenza ad un incremento delle deformazioni, nel tratto di tubazione ancora agibile, ma con velocità abbastanza attenuate.

Riepilogando, i periodi nei quali le velocità di traslazione sono risultate le maggiori corrispondono alla primavera del 1983 e all'autunno-inverno 1983/84.

La Tab. 8.3 riporta gli spostamenti massimi, valutati in mm, relativi a ciascuna stazione.

stazione	data di riferim.	data della misura		
		giu. 83	ott. 83	feb. 84
AN-1	24/3/83	68	73	120
AN-2	28/3/83	36	>40	>60
AN-3	22/4/83	>30	>70	>120
AN-4	22/4/83	25	32	>60
AN-5	19/5/83	15	28	45
AN-8	18/6/83	—	6	35
AN-9	27/6/83	—	37	>80

Tabella 8.3 - Spostamenti massimi misurati a varie date.

Il segno ">" indica che, essendosi verificata la rottura della tubazione, il valore misurato è probabilmente in difetto mancando la misura dello spostamento al di sotto della sezione di interruzione.

In termini di velocità media, sono stati valutati i dati riportati in Tab. 8.4; le velocità sono espresse in mm/giorno.

E' stato quindi possibile constatare che durante tutto l'arco di tempo dei controlli i movimenti maggiori si sono verificati soprattutto durante due periodi ben definiti, corrispondenti alle stagioni di maggiore piovosità, e per i quali si sono avute anche le maggiori ricariche delle falde acquifere.

stazione	dall'installazione a giugno 1983	da ottobre 1983 a febbraio 1984
AN-1	1,30	0,50
AN-2	0,60	0,10
AN-3	1,00	0,80
AN-4	0,40	0,50
AN-5	0,50	0,20
AN-8	—	0,30
AN-9	—	0,70

Tabella 8.4 - Velocità medie degli spostamenti massimi.

Alla omogeneità delle date fa riscontro una rilevante disuniformità degli spostamenti a piano campagna e delle relative velocità, in relazione alla complessità del fenomeno franoso (movimenti superficiali e profondi).

ABSTRACT

The investigation on the Posatora landslide, occurred in Ancona in December 1982, required the installation of 7 very

deep inclinometers, carried out by Rodio.

The instrumentation, kept under control over a full year, allowed significant and interesting data to be obtained on the geometry of the landslide and the evolution of the soil movements.

This paper, besides indicating the results obtained, presents a few considerations explaining the slope failure mechanism based on the comparative analysis of the different rates and depths of slip.

Given the remarkable depth of the inclinometers - altogether over 700 m of pipes were installed - considerable problems came up about the accuracy of the experimental data.

The theoretical-experimental analysis of the possible sources of error and the definition of adequate control measurements represented a highly qualifying aspect of the investigation.

OPERE CITATE

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1977) - *Suggested Methods for Monitoring Rock Movements using Inclinometers and Tiltmeters*. Rock Mechanics, **10**(1-2), 81-106, Springer Verlag.

MIKKELSEN P.E. & WILSON S.D. (1983) - *Field instrumentation: Accuracy Performance, Automation and Procurement*. Proc. Int. Symposium on Field Measurement in Geomechanics, **1**, 251-272, Zurich.