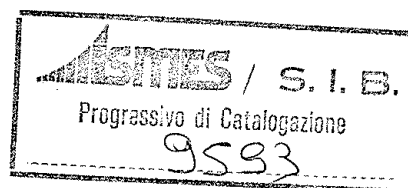


P.P. Rossi

464

*Il ruolo del monitoraggio
negli interventi di
miglioramento e
rinforzo dei terreni
e delle rocce*



IL RUOLO DEL MONITORAGGIO NEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO E RINFORZO DEI TERRENI E DELLE ROCCE

Pier Paolo Rossi, ISMES S.p.A., Bergamo

SOMMARIO

Le tecniche di misura per il controllo degli interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni e delle rocce nei principali settori dell'ingegneria geotecnica (scavi in sotterraneo, versanti e fondazioni) vengono esaminate con riferimento a recenti significativi esempi.

Sono descritti dapprima i metodi di controllo degli scavi in sotterraneo, sia in fase di esecuzione che in corso d'opera, nonché i criteri di utilizzo dei dati per la verifica delle ipotesi progettuali attraverso operazioni di "back analysis". Particolare attenzione viene dedicata al problema del controllo delle deformazioni sul fronte di scavo di gallerie scavate in ammassi molto deformabili.

Vengono poi descritte le tecniche di controllo della stabilità dei versanti e degli interventi sulle fondazioni di grandi strutture, utilizzando due esempi importanti: la rupe del Santuario della Verna (Arezzo) e la Cattedrale Metropolitana di Città del Messico.

1. PREMESSA

Gli interventi di miglioramento e rinforzo dei terreni e delle rocce presentano sovente complesse situazioni geotecniche che rendono indispensabile il ricorso ad osservazioni strumentali, sia in fase di analisi che durante e dopo l'intervento. Nella fase di progettazione, il monitoraggio consente di ricavare gli elementi per il progetto di intervento e di disporre di una base di raffronto per valutare l'efficacia delle opere di consolidamento; durante la costruzione consente di verificare la correttezza delle ipotesi progettuali attraverso il confronto fra il comportamento reale e quello previsto in fase di progettazione; durante la vita dell'opera è in grado di valutare costantemente le condizioni di sicurezza delle strutture e il grado di efficienza degli interventi di rinforzo.

Il controllo assume un ruolo essenziale nel metodo di progetto di tipo "osservazionale" il quale è caratterizzato da un elevato grado di flessibilità in quanto le scelte progettuali sono effettuate in corso d'opera proprio sulla base delle indicazioni fornite dalle misure di controllo.

Durante la fase di realizzazione delle opere si adotta sovente un sistema di monitoraggio di tipo manuale il quale presenta minori problemi di protezione rispetto ad un sistema di monitoraggio automatico. Un sistema di monitoraggio di tipo manuale è caratterizzato da:

- rapidità di installazione;
- facilità di protezione;
- costo limitato;
- limitata interferenza con le operazioni di cantiere.

La gestione di questo sistema richiede per contro la presenza in cantiere di operatori idonei ad eseguire le letture periodiche degli strumenti con frequenza variabile in relazione alle diverse fasi di avanzamento dei lavori.

Per il controllo del comportamento dell'opera durante l'esercizio, si ricorre di norma all'installazione di sistemi di monitoraggio di tipo automatico i quali, a fronte di un costo di installazione più elevato, consentono un controllo continuo in tempo reale della struttura con possibilità di inserimento di soglie di allertamento. Un sistema di monitoraggio di tipo automatico richiede però un efficace sistema di protezione degli strumenti e una precisa definizione del programma di gestione e di manutenzione dell'intero sistema di misura. Esistono altri problemi connessi all'utilizzo di sistemi di acquisizione automatici quali:

- difficoltà di disporre di apparecchiature e di elaboratori capaci di sopportare severe condizioni ambientali;
- necessità di provvedere a sistemi di alimentazione;
- necessità di ricorrere a gruppi di continuità allorché si temano problemi di interruzione delle linee elettriche.

La progettazione dettagliata del controllo deve essere sviluppata in stretto contatto con lo specialista della strumentazione. Nella scelta della strumentazione si deve tener conto non solo della precisione richiesta ma anche della robustezza e della stabilità nel tempo. Questi ultimi due fattori sono particolarmente importanti nella selezione degli strumenti destinati a controlli a lungo termine e portano talora a preferire sistemi semplici nei quali si possa escludere la possibilità di "derive" interne.

In zone di importanza critica è opportuna una certa ridondanza della strumentazione sia per tener conto degli inevitabili danneggiamenti che gli strumenti possono subire, sia per potere essere certi che eventuali indicazioni anomale siano da attribuire effettivamente al terreno e non al malfunzionamento delle apparecchiature.

È essenziale che venga predisposta una detta-

gliata specifica delle modalità di fornitura e di installazione delle apparecchiature di misura, che includano:

- modalità di collaudo della strumentazione e della sua installazione;
- calibrazione strumenti;
- garanzia;
- riparazione, ricambi e manutenzione;
- tempi e servizi richiesti per l'installazione evidenziando le eventuali interferenze con l'attività di costruzione generale;
- modalità di protezione.

Sempre nella fase di progettazione dettagliata, devono essere predisposte le modalità di lettura degli strumenti con l'indicazione del responsabile del controllo, della frequenza del controllo e del tempo richiesto per le varie operazioni.

Un altro punto importante riguarda la predisposizione delle modalità di elaborazione dei dati e di rappresentazione dei risultati. Molto spesso il tempo richiesto da questa attività viene largamente sottostimato, il che può portare ad un accumulo di dati non elaborati praticamente inutilizzabili almeno nel breve periodo. In questo caso diviene impossibile sia apportare con tempestività interventi correttivi in corso d'opera sia valutare le condizioni di sicurezza del cantiere. Un notevole contributo alla risoluzione di questo problema può essere fornito dalle tecniche informatiche di gestione delle banche dati che consentono di ottenere in breve tempo i dati già elaborati e rappresentati graficamente nella forma più opportuna. In questo modo risulta più facile apprezzare il reale comportamento della struttura e mettere in evidenza fenomeni anomali.

Il monitoraggio degli interventi di rinforzo dei terreni e delle rocce costituisce argomento di grande vastità e complessità e risulta pertanto impossibile fornire in questa sede una trattazione completa e organica. Mi limiterò quindi ad illustrare, anche con l'aiuto di recenti esempi, le tecniche di misura che ritengo più interessanti e innovative nei diversi settori dell'ingegneria geotecnica (scavi in sotterraneo, pendii e fondazioni).

2. IL MONITORAGGIO NEGLI SCAVI IN SOTTERRANEO

2.1 Misure di controllo durante le fasi di scavo

Durante l'esecuzione di scavi in sotterraneo, le misure hanno lo scopo principale di verificare l'affidabilità del modello di calcolo adottato e dei parametri che definiscono il comportamento meccanico dell'ammasso. Costituiscono inoltre, come già osservato nel paragrafo 1, l'unico valido strumento atto a valutare costantemente le condizioni di sicurezza del cantiere.

Durante l'esecuzione dei lavori, il montaggio degli strumenti deve essere eseguito in tempi molto rapidi al fine di rallentare il meno possibile le operazioni di scavo della galleria. Non è consigliabile installare in questa fase un sistema di monitoraggio di tipo automatico per la evidente difficoltà di proteggere in modo efficace gli strumenti e il sistema di misura senza interferire troppo pesantemente con le operazioni di scavo. Si preferisce pertanto controllare l'avanzamento dello scavo con tecniche di misura di tipo manuale.

2.1.1 Misura delle deformazioni sulla superficie dello scavo

Il metodo di controllo più semplice a disposizione del progettista per esaminare il comportamento deformativo dell'ammasso roccioso nel corso dell'esecuzione degli scavi è costituito dalle misure di convergenza.

A questo scopo speciali ancoraggi vengono posti in opera a ridosso del fronte di scavo e le misure di convergenza vengono eseguite mediante distometri a nastro o a filo. I due tipi di distometri sono illustrati nella Fig. 1 ove sono riportati anche alcuni possibili schemi di installazione delle basi di misura.

L'esame delle misure di convergenza permette di seguire l'evoluzione dei processi deformativi in funzione del tempo e di individuare il momento più opportuno per la posa del rivestimento provvisorio e definitivo.

Questa strumentazione permette di evidenziare eventuali discordanze fra il comportamento reale e le previsioni di progetto e quindi di apportare tempestivamente le necessarie modifiche progettuali.

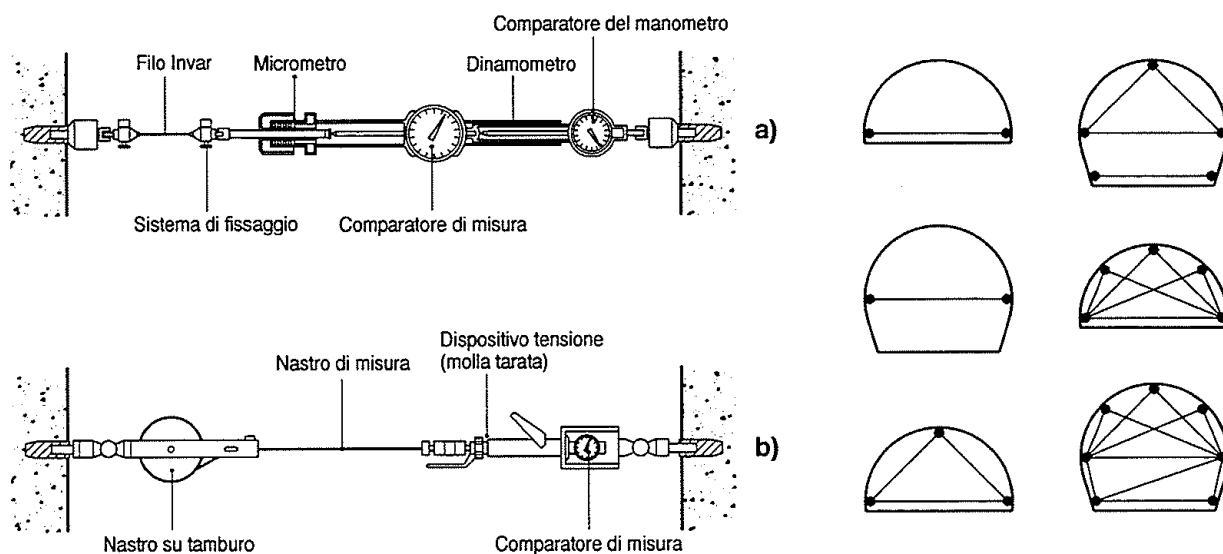


Fig. 1 - Misure di convergenza con distometro a filo (a) e a nastro (b) e schemi tipo di disposizione delle basi di misura

Una recente e interessante metodologia di controllo delle deformazioni radiali e assiali della superficie dello scavo prevede l'impiego di una tecnica ottica tridimensionale.

L'apparecchiatura di misura è costituita da un teodolite elettronico integrato da un sistema coassiale per la misura delle distanze. Il sistema di misura prevede l'utilizzo di "stazioni libere" per il posizionamento dello strumento. Il teodolite, supportato da un tripode, può essere situato in un punto qualunque con la sola condizione che si possano eseguire alcune letture per definire le coordinate della stazione. Dopo aver collimato il traguardo, le letture vengono automaticamente rilevate e trasferite ad un dispositivo di elaborazione automatica in grado di ridurre al minimo le sorgenti di errore. L'accuratezza della misura dipende dalla configurazione geometrica, dalla ridondanza della rete e dei punti di riferimento e dalle caratteristiche tecniche dello strumento. Tipicamente l'errore medio per la determinazione delle coordinate tridimensionale risulta essere compreso tra 0.7 - 1.5 mm.

In Fig. 2 è illustrato lo schema di funzionamento del sistema di misura di tipo ottico. I punti indicati alla destra dello strumento sono utilizzati per determinare le coordinate del punto di stazione; i punti alla sinistra dello strumento rappresentano

invece le basi per la misura delle deformazioni della superficie dello scavo.

2.1.2 Misura delle deformazioni dell'ammasso nell'intorno dello scavo

L'analisi del comportamento deformativo dell'ammasso nell'intorno dello scavo viene eseguita mediante l'impiego di estensimetri multibase installati entro fori radiali realizzati in una sezione della galleria il più possibile vicina al fronte di scavo. Questi strumenti, oltre a misurare gli spostamenti assoluti di alcuni punti della superficie della galleria, permettono di determinare anche lo spessore dell'anello di roccia rilasciato nell'intorno dello scavo e la sua evoluzione nel tempo.

L'installazione degli estensimetri richiede una interruzione delle operazioni di scavo per permettere l'esecuzione delle perforazioni. Per cercare di ridurre il più possibile questi tempi di attesa, sono stati messi a punto estensimetri di piccolo diametro, a due basi di misura, di facilissima installazione i quali richiedono fori di diametro 35 mm che possono essere eseguiti mediante perforatore in tempi molto brevi. Questi estensimetri possono raggiungere una profondità massima pari a circa 10 m e prevedono l'effettuazione

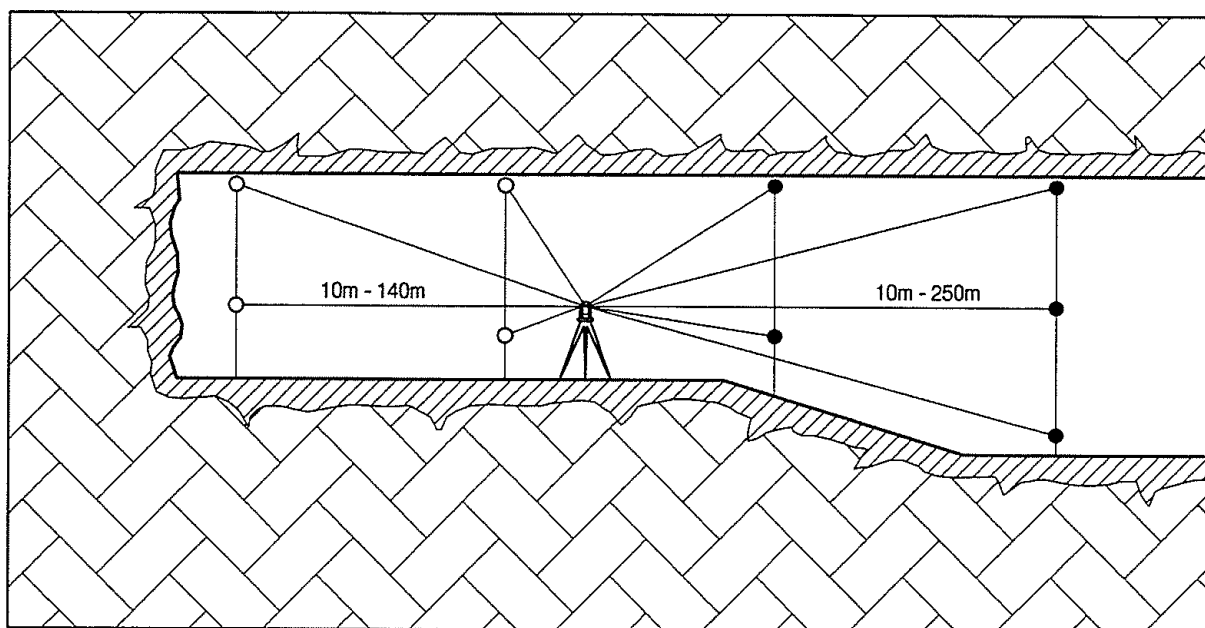


Fig. 2 - Sistema di misura di tipo ottico per il rilievo delle deformazioni della superficie dello scavo

di letture manuali mediante comparatore meccanico.

Lo schema dell'estensimetro, composto da due tubi coassiali con ancoraggi ad espansione meccanica, è illustrato in Fig. 3.

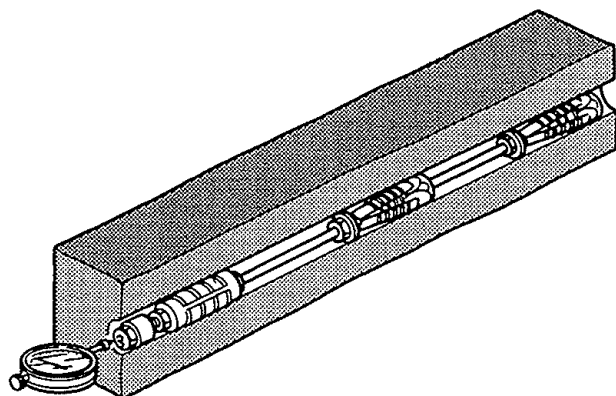


Fig. 3 - Estensimetro meccanico a due basi di misura installato entro un foro di diametro 35 mm

Quando si vuole conoscere con maggiore dettaglio il comportamento deformativo dell'ammasso roccioso in funzione della profondità, si consiglia l'impiego dello speciale estensimetro multibase rimovibile "sliding deformeter" ISETH.

Lo strumento, illustrato nello schema di Fig. 4, prevede l'installazione di una catena di basi estensimetriche della lunghezza di 1 m ciascuna realizzate in PVC con ancoraggi metallici cementati entro un foro di diametro 100 mm. Le misure di deformazione sono realizzate mediante una speciale sonda di tipo rimovibile provvista di trasduttore elettrico. L'accoppiamento fra le due teste della sonda estensimetrica e gli anelli metallici posizionati lungo il foro è di tipo sferico e consente quindi una precisione molto elevata (0.005 mm/m).

Una versione più recente e più economica di questo strumento è utilizzabile in fori di diametro 56 mm e profondità fino a 30 m con precisione di 0.02 mm/m. Questo strumento è particolarmente interessante per le misure delle deformazioni nell'intorno di una galleria in quanto consente di ottenere una elevata precisione pur riducendo fortemente i costi di perforazione e di installazione.

È opportuno rilevare che, allorché gli estensimetri o le basi distometriche vengono installate a ridosso del fronte di scavo, l'ammasso roccioso ha già subito una deformazione non certo trascurabile la quale non può in alcun modo essere determinata. L'unico mezzo a disposizione per valutare questa deformazione è quello di installare estensimetri multibase prima dell'esecuzione dello scavo.

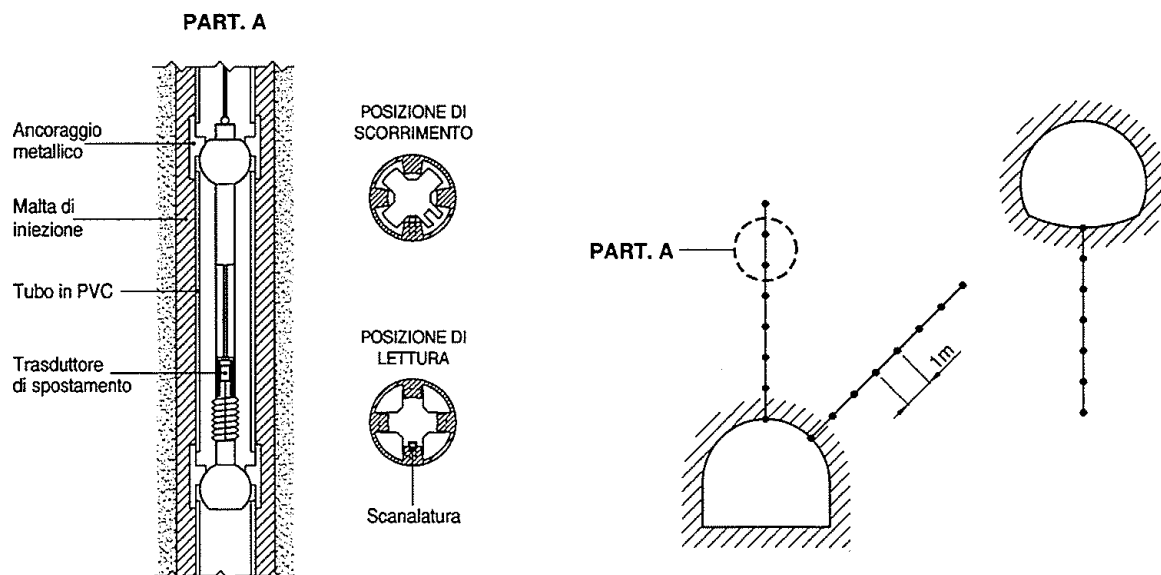


Fig. 4 - Estensimetro multibase rimovibile "Sliding Deformeter" ISETH e schemi tipo di installazione nell'intorno dello scavo

Mentre nel caso di gallerie stradali o ferroviarie scavate entro ammassi rocciosi questa operazione è praticamente impossibile, essa diviene di più facile esecuzione nel caso di gallerie per linee metropolitane dal momento che lo spessore del terreno di copertura è in generale piuttosto modesto.

2.1.3 Utilizzo del monitoraggio per la valutazione dei parametri geomeccanici con tecniche di "back-analysis"

La "back-analysis" dei dati relativi al comportamento di una galleria o, in generale, di uno scavo in sotterraneo è una procedura di calibrazione di un modello matematico del sistema ammasso-cavità. Attraverso l'uso di metodi numerici, quali quelli degli elementi finiti e degli elementi distinti, vengono condotte diverse simulazioni delle operazioni di scavo. Ciò permette di ricercare, per tentativi successivi, un insieme di valori dei parametri meccanici dell'ammasso e delle condizioni al contorno che diano luogo a spostamenti e deformazioni simili a quelli misurati. A questo proposito un tipico problema è quello di definire accuratamente i parametri meccanici globali dell'ammasso roccioso (caratteristiche di resistenza, di deformabilità e comportamento reologico) e le condizioni al contorno cui esso è sottoposto (stato tensionale originario e posizione della superficie piezometrica). Generalmente, per tener conto dei fenomeni di plasticizzazione dell'ammasso nell'intorno dello scavo, si adottano modelli non lineari. Le soluzioni diventano quindi onerose e la ricerca della soluzione diventa difficile. Una ulteriore difficoltà proviene anche dal fatto che, con tali modelli, la soluzione generalmente non è unica. Tuttavia se, oltre alle misure di spostamento e deformazione, si dispone anche di una valutazione dello stato tensionale originario, il problema si semplifica notevolmente e la qualità della soluzione viene notevolmente incrementata.

Per ottenere i parametri globali dell'ammasso con metodi di "back-analysis" possono essere individuate, durante l'esecuzione dello scavo, sezioni di galleria rappresentative in cui vengono misurati spostamenti e deformazioni nell'intorno

dello scavo, installando estensimetri radiali multi-base (sliding deformer di piccolo diametro) e basi di misura distometriche e viene valutato lo stato di sollecitazione originario. Poiché in una galleria lunga diversi chilometri, lo stato tensionale originario può essere molto diverso nelle varie sezioni, è opportuno misurare lo stato di sollecitazione esistente in corrispondenza di ciascuna sezione di misura mediante la tecnica della fratturazione idraulica. Viene proposta a tale scopo la prova di fratturazione idraulica con apparecchiatura "Minifrac" la quale utilizza fori di diametro 38 mm eseguiti in avanzamento sul fronte di scavo. Questo foro e quelli radiali di diametro 56 mm necessari per l'installazione degli estensimetri multibase vengono eseguiti in tempi molto rapidi in modo da ridurre fortemente le interferenze con le operazioni di avanzamento dello scavo.

La combinazione fra le misure di deformazione e le misure dello stato tensionale, secondo lo schema tipo illustrato in Fig. 5, consente quindi di valutare i parametri meccanici globali dell'ammasso roccioso attraverso una operazione di "back-analysis" di elevata affidabilità.

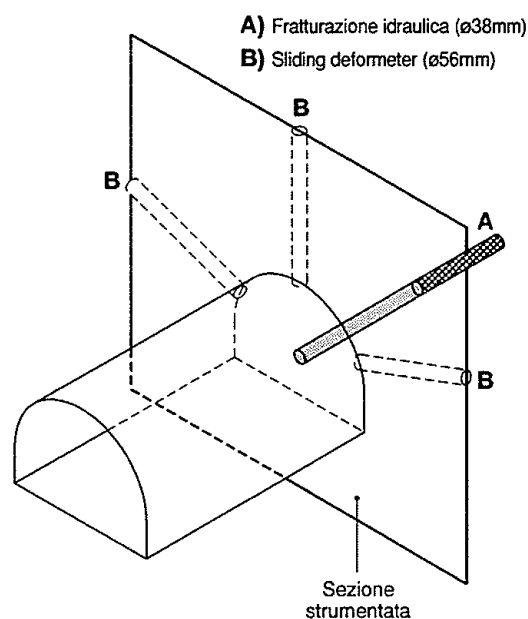


Fig. 5 - Sezione tipo di misura per "back-analysis" con l'indicazione delle perforazioni per l'installazione degli estensimetri multibase (Sliding Deformer) e per l'esecuzione delle prove di fratturazione idraulica con tecnica Minifrac

2.1.4 Il monitoraggio del fronte di scavo

Lo scavo di una galleria in un ammasso roccioso strutturalmente complesso e molto deformabile comporta, nella maggior parte dei casi, la necessità di eseguire interventi di preconsolidamento al fronte prima dell'avanzamento dello scavo. In questo caso, l'analisi del comportamento deformativo dell'ammasso così consolidato assume un ruolo di grande importanza nella valutazione del grado di efficienza degli interventi.

Un significativo esempio di monitoraggio del fronte di scavo è stato eseguito di recente dall'ISMES durante lo scavo della galleria S. Vitale della linea ferroviaria Caserta - Foggia. La galleria è scavata entro la formazione delle "Argille varicolori" costituita da argille scagliose rigonfianti con intercalazioni calcaree e marnose. Questa formazione caotica è stata interessata da eventi tettonici che hanno dato luogo a fenomeni di sovraconsolidazione di differente intensità.

Il metodo di scavo, eseguito a piena sezione, prevede la realizzazione di interventi di pre-consolidamento al fronte e in calotta fino alla profondità di 18 m dal fronte di scavo. Il consolidamento del nucleo è eseguito mediante barre in vetroresina cementate mentre in calotta sono installati elementi strutturali in vetroresina valvolati e iniettati

in pressione con miscele cementizie. Al termine di ciascuna fase di scavo, per una profondità pari a $0.70 \div 0.90$ m, viene posta in opera una centina metallica e, ogni 3 centine, viene prolungato l'arco rovescio fino al fronte di scavo; a tergo segue il rivestimento definitivo.

In considerazione della grande variabilità delle caratteristiche della formazione caotica, si è ritenuto indispensabile predisporre un sistema di monitoraggio che consentisse di analizzare il comportamento deformativo del terreno oltre il fronte di scavo, nelle diverse fasi di avanzamento, allo scopo di verificare l'efficacia degli interventi di pre-consolidamento e di apportare eventuali modifiche progettuali in corso d'opera. Il monitoraggio è stato eseguito mediante un estensimetro multibase "sliding deformeter", già descritto al paragrafo 2.1.2, installato in asse alla galleria a partire dal fronte di scavo per una profondità di 22 m, con basi di misura di lunghezza 1 m cadauna (Fig. 6). È stato scelto questo tipo di strumento poiché è l'unico che consente di operare anche durante le fasi di scavo in quanto l'asportazione progressiva delle basi estensimetriche più superficiali non compromette il funzionamento delle rimanenti basi di misura.

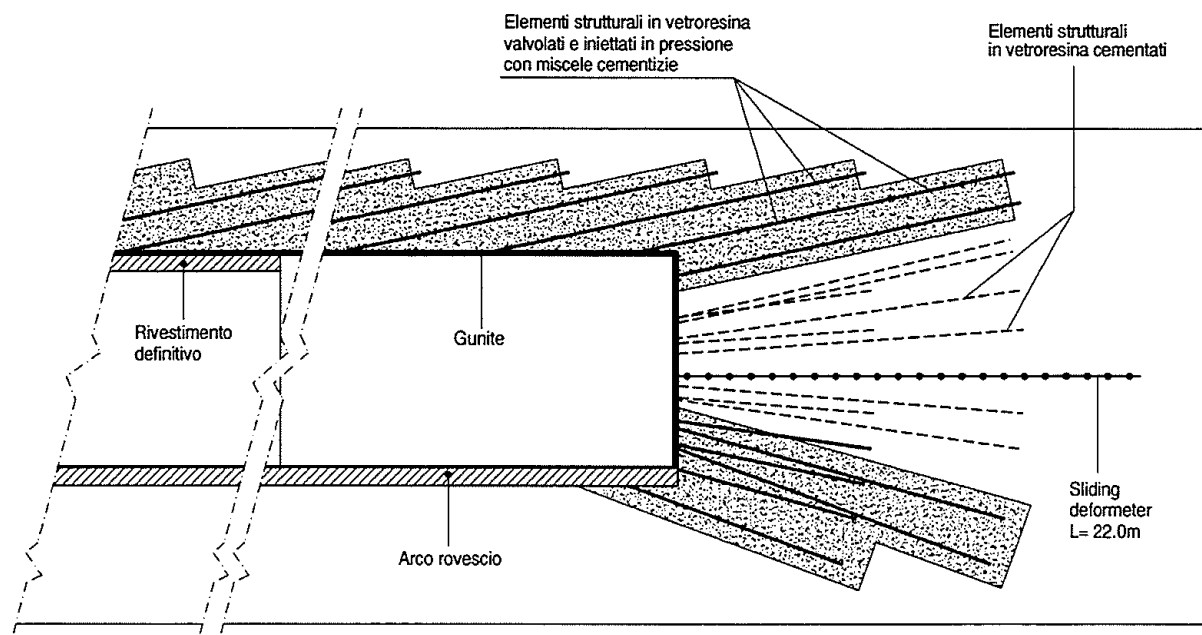


Fig. 6 - Schema degli interventi di preconsolidamento al fronte di scavo in terreno argilloso e ubicazione dell'estensimetro multibase rimovibile (Sliding Deformeter) utilizzato per l'analisi del comportamento deformativo

In Fig. 7 sono riportati i diagrammi tipo delle deformazioni di estrusione rilevate durante le fasi di scavo e la successiva installazione delle centine metalliche contrassegnate con i numeri 1÷9.

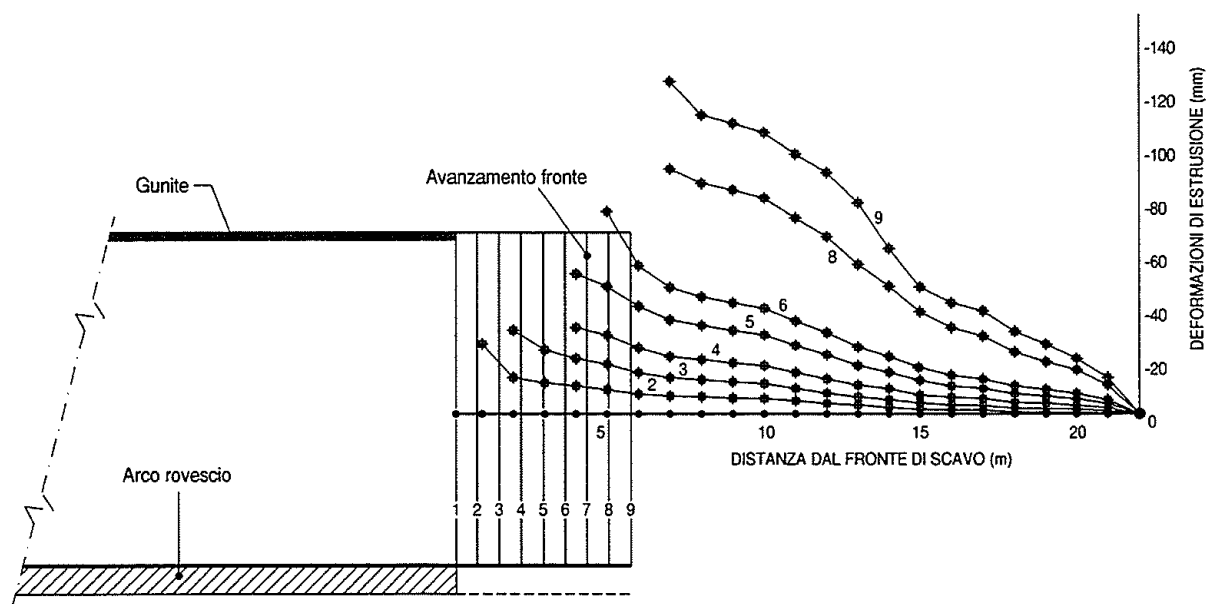


Fig. 7 - Diagrammi delle deformazioni di estrusione del fronte, rilevate mediante estensimetro multibase rimovibile, durante le successive fasi di scavo di un tratto della galleria S. Vitale della linea ferroviaria Caserta - Foggia

Mediante prove di laboratorio e modelli ad elementi finiti, è stato messo a punto dal progettista un modello di comportamento del terreno pre-consolidato al fronte di scavo. In Fig. 8 sono riportati i valori massimi e minimi di estrusione previsti dal modello per tre successive fasi di avanzamento dello scavo. Queste curve teoriche sono poste a confronto con quelle misurate sperimentalmente mediante il sistema di monitoraggio. In Fig. 8 a) è riportato a titolo di esempio un caso nel quale le curve di estrusione rilevate sperimentalmente per tre fasi di scavo sono in buon accordo con quelle previste dal modello di calcolo mentre nell'esempio riportato in Fig. 8b) la curva di deformazione relativa alla 2ª fase di

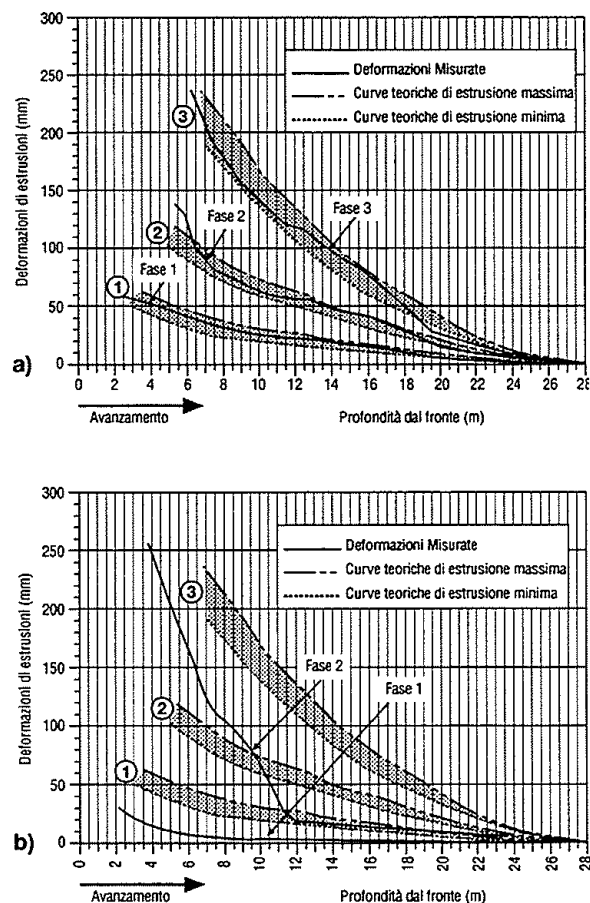


Fig. 8 - Confronto fra le curve teoriche di estrusione e quelle rilevate sperimentalmente mediante estensimetro multibase su un tratto della galleria S. Vitale

- a) le deformazioni misurate sono comprese fra i valori minimi e massimi previsti dal calcolo
- b) la deformazione misurata nella fase 2 è molto più elevata di quella teorica

Questo innovativo sistema di monitoraggio si è dimostrato molto efficace in quanto ha consentito di operare in condizioni di sicurezza anche in presenza di condizioni geologiche molto severe e di eseguire attraverso una "back-analysis" un controllo costante delle ipotesi progettuali pervenendo ad una ottimizzazione della lunghezza, della spaziatura e della sovrapposizione delle barre di pre-consolidamento in relazione alle diverse caratteristiche dei terreni attraversati.

2.1.5 Scavo di gallerie per linee metropolitane

Come già osservato al paragrafo 2.1.2, durante lo scavo di gallerie per linee metropolitane è indi-

spensabile predisporre, prima dello scavo, un sistema di monitoraggio idoneo a rilevare il comportamento deformativo dei terreni durante tutte le fasi del lavoro. Poiché in questo caso le coperture sono molto modeste, è possibile installare dalla superficie del terreno, prima dello scavo, una strumentazione in grado di misurare le deformazioni del terreno nell'intorno dello scavo e di tenere sotto controllo eventuali cedimenti degli edifici ubicati in prossimità della linea metropolitana.

Per questo tipo di controllo risulta particolarmente interessante l'impiego dell'estenso-inclinometro TRIVEC il quale viene installato all'interno di fori verticali ed è provvisto di un estensimetro per la misura delle deformazioni (z) lungo l'asse del foro

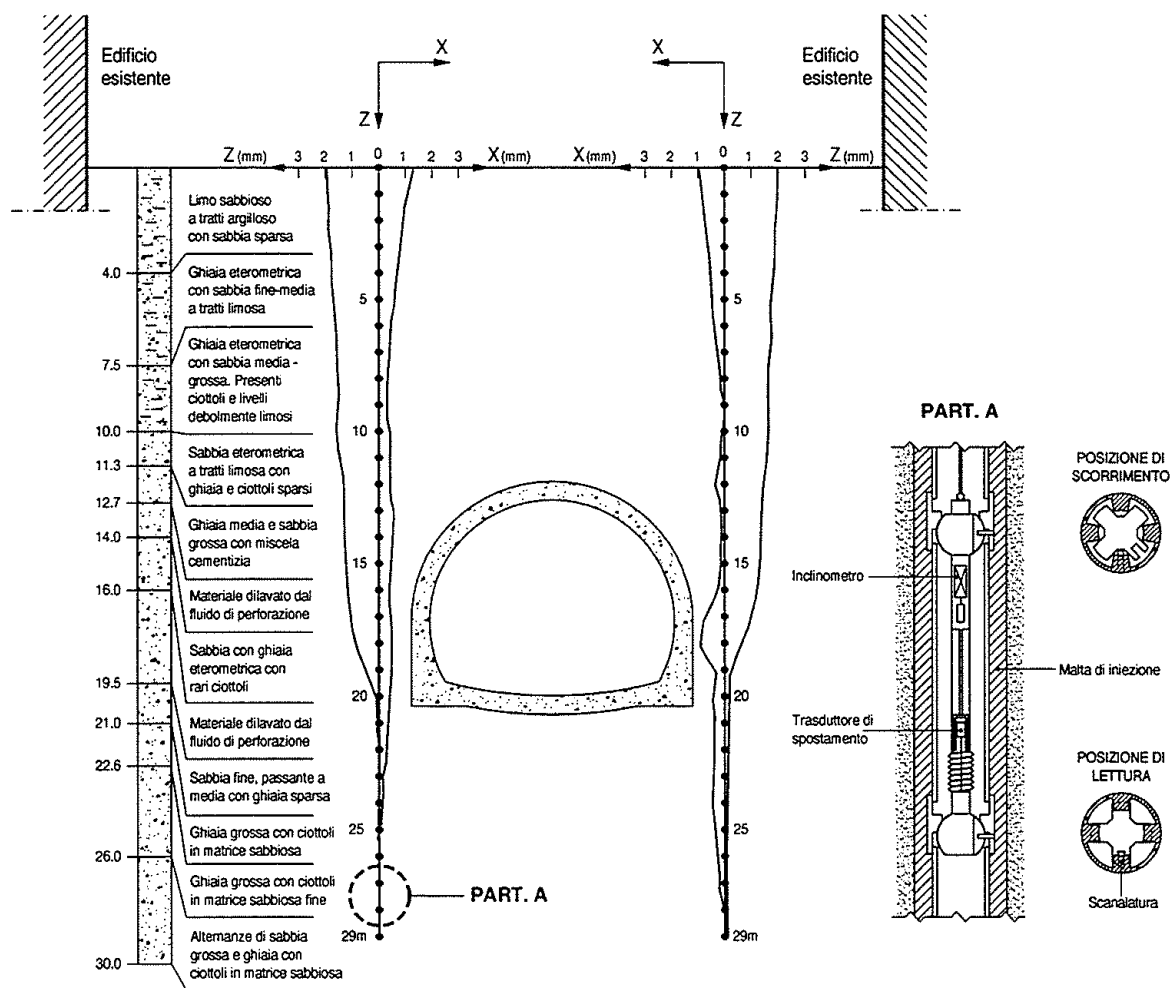


Fig. 9 - Analisi del comportamento deformativo dei terreni interessati dallo scavo di un tratto della Linea 3 della Metropolitana Milanese eseguito mediante due estenso-inclinometri TRIVEC. Sono riportati i diagrammi delle deformazioni integrate verticali (z) e orizzontali (x). Nella figura è pure indicato lo schema di funzionamento dello strumento

e di un inclinometro per la misura delle due componenti di spostamento orizzontale (x e y). La precisione della misura estensimetrica è pari a 0.005 mm/m mentre quella dell'inclinometro è pari a 0.05 mm/m. La possibilità di disporre di una catena di basi di misure di lunghezza 1 m consente di ottenere un quadro di grande dettaglio del comportamento deformativo dei diversi livelli di terreno interessati dallo scavo.

Questo tipo di monitoraggio è stato di recente realizzato su alcune tratte della Linea 3 della Metropolitana Milanese. In Fig. 9 si riportano i diagrammi integrati delle deformazioni verticali (z) e orizzontali (x) rilevate mediante due estenso-inclinometri TRIVEC installati ai due lati della galleria in corrispondenza di un tratto sperimentale in Viale Stelvio. Le deformazioni verticali integrali sono risultate dell'ordine di 2 mm e appaiono concentrate nella fascia di terreno interessato dallo scavo, fra le quote 12 m e 20 m.

I diagrammi degli spostamenti integrali in direzione orizzontale mostrano una deformazione più accentuata nella fascia di terreno direttamente interessata dallo scavo e in particolare sul lato destro della galleria che risente della maggiore vicinanza degli edifici. Nella fascia di terreno compresa fra le quote 7.50 m e 10.00 m le deformazioni orizzontali sono risultate trascurabili poiché in questo strato di ghiaie le iniezioni hanno prodotto un sensibile consolidamento del terreno. Al di sopra di questa quota, nello strato di terreno più corticale non interessato da interventi di consolidamento, si osservano nuovamente fenomeni deformativi del terreno in direzione orizzontale con valori massimi in sommità non superiori a 1 mm.

Nello scavo di gallerie per linee metropolitane è spesso indispensabile eseguire interventi di pre-consolidamento del terreno prima di procedere alle operazioni di scavo. In questo caso diviene estremamente importante verificare l'efficacia degli interventi di consolidamento prima di dare l'avvio alla escavazione; non si può correre il rischio di eseguire questa verifica solo attraverso una "back-analysis" basata sulle osservazioni strumentali.

Per controllare il grado di consolidamento rag-

giunto dai terreni si può operare in modo efficace utilizzando fori di sondaggi entro i quali vengono eseguite sia misure geofisiche di carotaggio sonico e cross-hole sia prove dilatometriche che consentono di determinare il modulo di deformabilità dei terreni prima e dopo il consolidamento.

Si riportano a titolo di esempio in Fig. 10 i risultati di prove dilatometriche eseguite sui terreni interessati dallo scavo della Linea 3 della Metropolitana Milanese. I diagrammi carichi-deformazioni riportati in figura sono relativi a prove dilatometriche eseguite su tre tipi di terreno:

- A)** terreno consolidato;
- B)** terreno non consolidato;
- C)** terreno scarsamente consolidato.

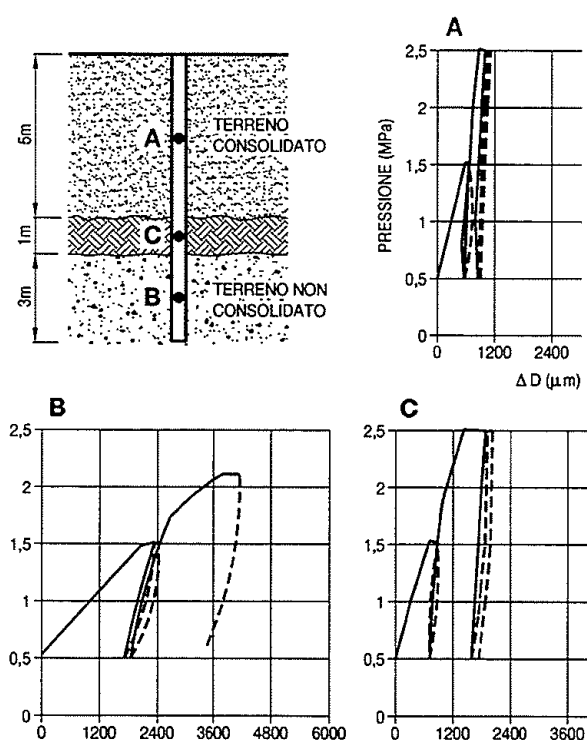


Fig. 10 - Prove dilatometriche per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità eseguite sui terreni interessati dallo scavo di una galleria della Linea 3 della Metropolitana Milanese: confronto fra i risultati ottenuti su terreni consolidati e non consolidati

Il confronto fra i diagrammi relativi alle prove **A** e **B** mostra chiaramente il sensibile incremento del modulo di deformabilità del terreno a seguito degli interventi di consolidamento.

2.2 Il monitoraggio ad opera ultimata

Le misure di controllo descritte al punto 2.1 sono relative alla fase di scavo e vengono interrotte all'atto dell'installazione del rivestimento definitivo. Sarebbe tuttavia un grave errore ritenere esaurito il compito del monitoraggio allorché l'opera è stata portata a compimento. È opportuno invece continuare a seguire la struttura durante la sua vita predisponendo nelle sezioni più rappresentative un sistema di monitoraggio in grado di tenere sotto controllo il comportamento statico della struttura.

Poiché nelle gallerie in esercizio è molto difficile eseguire un monitoraggio di tipo manuale, si preferisce fare ricorso, in questa fase, ad un monitoraggio di tipo automatico cercando di predisporre efficaci protezioni per i trasduttori di misura, i cavi di collegamento e l'unità di acquisizione.

Al termine del monitoraggio eseguito durante la fase di scavo della galleria si sceglieranno le sezioni più significative in corrispondenza delle quali verranno predisposti i seguenti controlli:

a) controllo del rivestimento definitivo

- analisi delle deformazioni subite dal rivestimento mediante speciali estensimetri (generalmente a corda vibrante) annegati nel getto in calcestruzzo. Questi estensimetri dovranno essere installati in diversi punti della sezione sia in prossimità della superficie di intradosso che in quella di estradosso;
- misura delle sollecitazioni al contatto fra rivestimento e ammasso mediante speciali celle di pressione installate durante il getto del rivestimento.

b) controllo dell'ammasso nell'intorno dello scavo

- analisi del comportamento deformativo dell'ammasso mediante estensimetri multi-base;
- controllo delle condizioni idrauliche mediante celle piezometriche.

Il controllo delle caratteristiche dell'ammasso durante l'esercizio è particolarmente importante nel caso di rocce rigonfianti le quali potrebbero dare luogo a vistosi fenomeni deformativi nella eventualità di variazioni delle condizioni idrauliche.

3. IL MONITORAGGIO NEGLI INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE DEI PENDII

Nei problemi di stabilità dei pendii in terra o roccia, esiste una notevole incertezza nella definizione dei parametri che governano il comportamento meccanico dei materiali costituenti il pendio. Il monitoraggio gioca quindi un ruolo fondamentale sia in fase di definizione delle scelte progettuali, sia durante l'esecuzione degli interventi. In fase di definizione del progetto, il monitoraggio consente di determinare:

- le caratteristiche geometriche dell'area interessata dal dissesto (profondità, forma, estensione)
- l'evoluzione dei processi deformativi del pendio
- le variazioni delle grandezze esterne (condizioni idrauliche, temperatura, ecc.).

La pianificazione del sistema di controllo deve essere compresa nell'ambito della pianificazione delle indagini conoscitive divenendone parte integrante. I fori utilizzati per l'installazione degli strumenti sono in genere gli stessi utilizzati per indagini geotecniche, geostrutturali e geofisiche. Durante l'esecuzione degli interventi di stabilizzazione, oltre al proseguimento delle misure di cui sopra, vengono predisposti controlli atti a verificare l'efficacia delle opere e a controllare le ipotesi progettuali. Si predispongono in questa fase misure di:

- sollecitazioni agenti sulle opere di sostegno;
- deformazioni delle opere;
- variazioni delle pressioni interstiziali.

Questo controllo dovrebbe essere proseguito per tempi molto lunghi al fine di valutare l'efficacia degli interventi in funzione del tempo. In genere però questo aspetto è trascurato dai progettisti e i dati disponibili in letteratura sono piuttosto scarsi.

I sistemi di monitoraggio dei pendii sono sovente basati su misure di tipo manuale eseguite, con periodicità prefissata, da operatori scrupolosi e diligenti. In taluni casi è necessario installare sistemi di monitoraggio di tipo automatico con trasmissione dei dati via radio ad una unità di acquisizione locale che può gestire automatica-

mente i dati o colloquiare con un centro di elaborazione remoto. Appare evidente che l'installazione di un sistema di monitoraggio automatico su un pendio presenta problematiche di maggiore complessità rispetto ad una installazione in galleria a causa delle maggiori difficoltà di garantire una efficace protezione a tutto il sistema. In taluni casi esistono però situazioni di grave pericolo per l'incolumità di persone o abitati che rendono necessario il ricorso ad un sistema di rilevamento automatico in grado di svolgere funzione di allarme. Ciò consente di individuare in tempo reale eventuali superamenti di soglie di rischio e di avviare le procedure di allertamento.

3.1 Controllo dei fattori esterni

Il sistema di controllo deve prevedere in primo luogo l'osservazione dei fattori "esterni" che possono condizionare la stabilità di un pendio: precipitazione meteoriche, temperatura dell'aria, deflussi dei corsi d'acqua, variazioni del livello di invaso di bacini, ecc.

3.2 Controllo del comportamento del pendio

Il controllo del comportamento deformativo del pendio può essere realizzato attraverso misure eseguite sia sulla superficie del pendio che all'interno dell'ammasso.

a) Misure in superficie

- fotogrammetria (aerea e terrestre)
- misure topografiche (livellazioni, triangolazioni, trilaterazioni)
- misure di spostamenti relativi (collimatori, distanziometri, estensimetri a filo e a barra).

Le misure degli spostamenti relativi possono essere eseguite con strumenti di tipo rimovibile o di tipo fisso. La Fig. 11 riportata a titolo di esempio, le due diverse tecniche per le misure dell'apertura di una frattura sulla superficie di un pendio roccioso. A sinistra è visibile un estensimetro meccanico rimovibile mentre a destra è riportato un estensimetro fisso predisposto per la misura delle tre componenti di spostamento del giunto.

La misura degli spostamenti relativi su lunga base viene eseguita mediante estensimetri a filo o a nastro di tipo rimovibile o fisso.

Particolarmente interessante si è rivelato il controllo eseguito con estensimetro rimovibile a nastro, del tipo indicato in Fig. 12, sul pendio sovrastante il ciglio della frana di Val Pola in Valtellina. Le catene estensimetriche (indicate in Fig. 13), installate subito dopo l'evento franoso del Luglio '87, hanno consentito di raccogliere preziose informazioni sull'evoluzione del movimento franoso durante la fase di installazione del sistema di monitoraggio di tipo automatico.

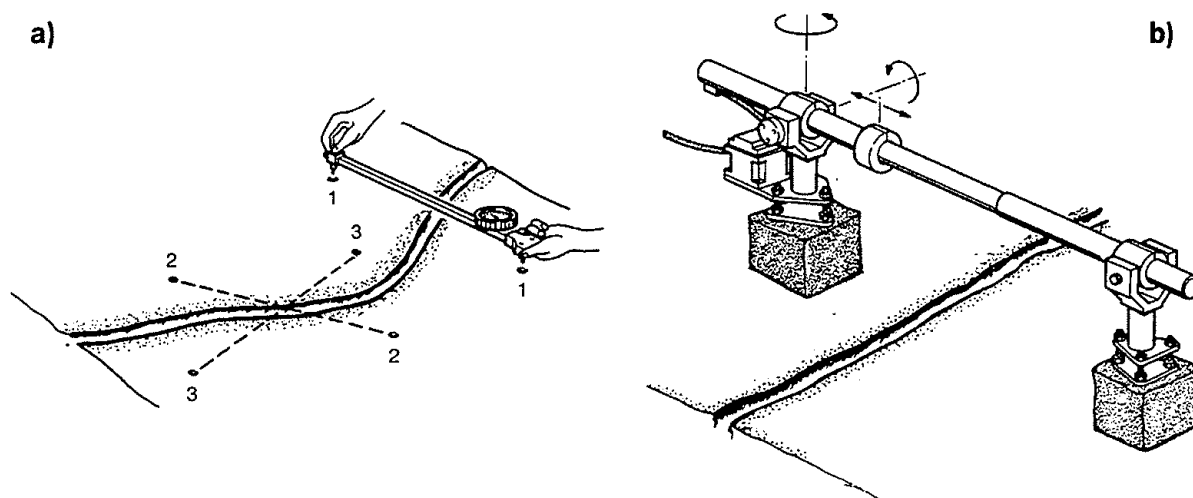


Fig. 11 - Controllo dell'apertura di una frattura su un pendio roccioso
a) estensimetro meccanico rimovibile
b) estensimetro elettrico fisso a tre componenti di spostamento

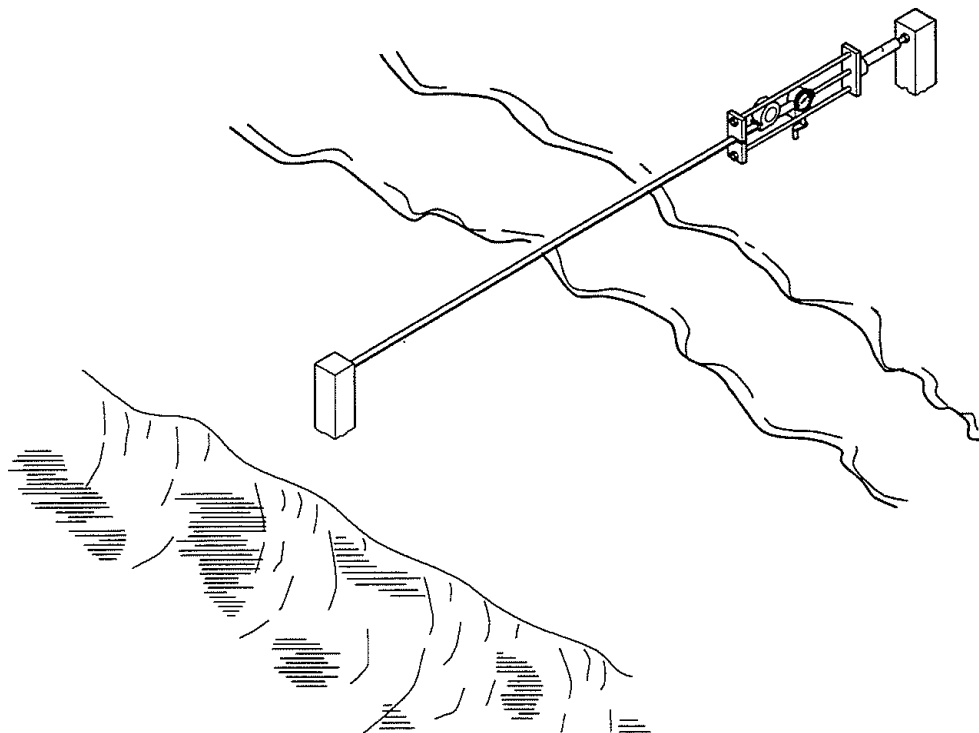


Fig. 12 - Schema dell'estensimetro a nastro a lunga base per il controllo delle deformazioni sulla superficie di un pendio

Nella Fig. 13 è riportato un esempio dei diagrammi delle deformazioni rilevate, con estensimetro rimovibile, su alcune basi estensimetriche (D12, D13, D14) ubicate al di sopra del ciglio di frana. I diagrammi delle deformazioni riportate in figura sono relativi al periodo di osservazione Gen-

naio-Giugno 1988. Si può chiaramente osservare come il diagramma relativo alla base D14, ubicata in prossimità del ciglio del pendio, mostri una velocità di apertura progressivamente crescente fino al distacco di una massa di terreno di volume di circa 300.000 m³ verificatosi nel Giugno 1988.

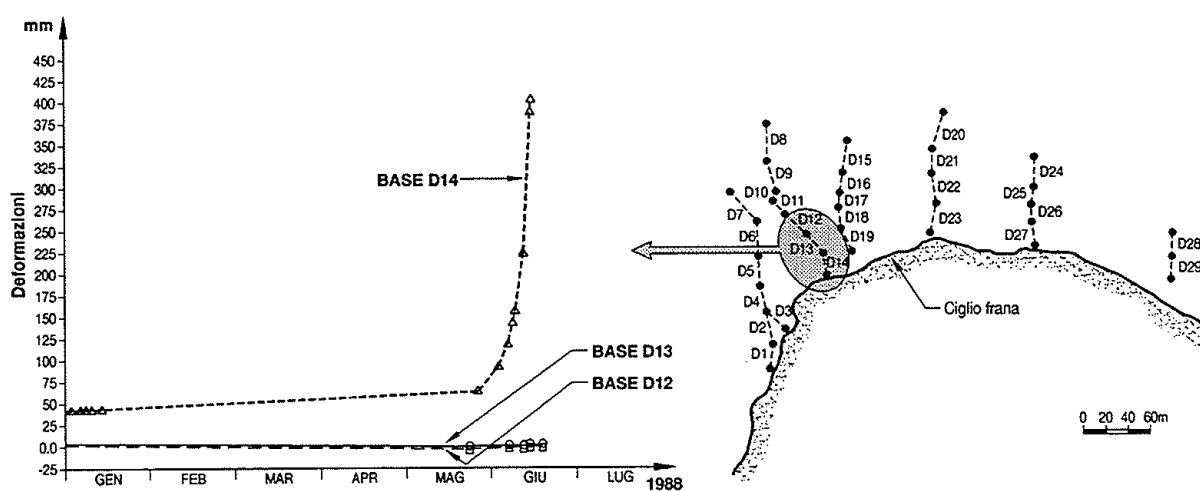


Fig. 13 - Ubicazione delle catene di misura per estensimetro a lunga base di tipo rimovibile installate sul pendio sovrastante il ciglio della frana di Val Pola (Valtellina) e diagrammi delle deformazioni rilevate sulle basi di misura D12, D13, D14. È chiaramente visibile la progressiva apertura di una frattura compresa entro la base D14 nella fase precedente il franamento di una porzione del pendio

b) Misure nell'interno dell'ammasso

Gli strumenti per il controllo nell'interno dell'ammasso vengono messi in opera di norma entro fori di sondaggio eseguiti a partire dalla superficie del terreno oppure all'interno di cunicoli sperimentali o di gallerie esistenti nella parte del pendio interessata dal movimento. Questi strumenti hanno lo scopo principale di individuare la superficie di scorrimento entro l'ammasso e di segnalare il verificarsi di uno scorrimento superiore ad un valore critico.

Le misure principali effettuate all'interno dell'ammasso sono le seguenti:

- Spostamenti lungo l'asse dello strumento
 - estensimetri multibase
 - sonde estensimetriche "Sliding deformer", estensimetri induttivi, ecc.)
- Spostamenti perpendicolari all'asse del foro
 - inclinometri a sonda
 - inclinometri fissi
 - sonda estenso-inclinometrica TRIVEC
 - pendoli
- Misure idrauliche
 - piezometri (idraulici, pneumatici, a corda vibrante, elettrici).

3.3 Controllo del comportamento delle opere di stabilizzazione

Gli interventi di stabilizzazione di un movimento franoso potenziale o in atto, oltre all'abbassamento della pressione interstiziale, prevedono di norma la realizzazione di opere di sostegno, tiranti, pali, ecc.. Diviene quindi importante il controllo del comportamento di queste opere attraverso una idonea strumentazione messa in opera durante l'esecuzione degli interventi.

- Misura della pressione al contatto fra terreno e struttura, eseguita mediante celle di pressione, del tipo illustrato in Fig. 14 costituite da martinetti piatti con celle di misura di differenti tipi (meccanica, elettrica, a corda vibrante, pneumatica).
- Misura del carico sulle teste dei tiranti, eseguita con celle di carico di tipo: meccanico, estensimetrico, idraulico o a corda vibrante.

- Analisi del comportamento deformativo delle strutture di sostegno mediante estensimetri elettrici (a corda vibrante) annegati nel calcestruzzo in modo del tutto analogo a quanto osservato al paragrafo 2.2.

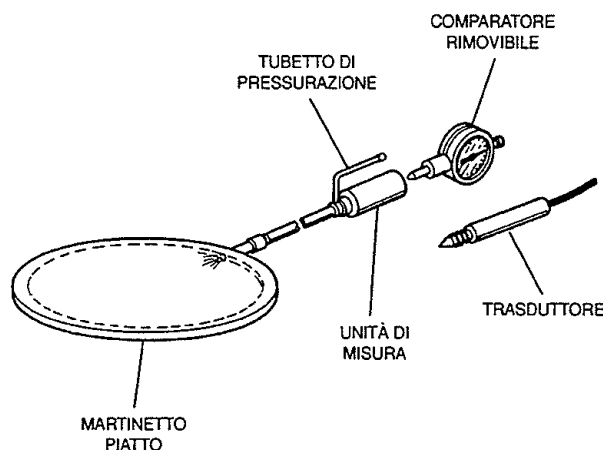


Fig. 14 - Schema di cella di pressione per la misura della sollecitazione al contatto fra terreno e opera di sostegno

3.4 Un esempio significativo: il monitoraggio del Santuario della Verna (Arezzo)

Il Santuario della Verna sorge su una placca calcarenitica intensamente fratturata la quale poggia su una formazione argillosa. I fenomeni di dissesto presenti nella placca calcarenitica (fratturazioni, cedimenti differenziali, scivolamenti e ribaltamenti) sono in fase di continua evoluzione e sono oggi di entità tale da compromettere la sicurezza di alcuni dei luoghi più celebri del Santuario (Sasso Spicco, Grotta di S. Francesco, ecc). Ciò ha indotto le Autorità a chiudere questi luoghi di culto e a dare corso ad una campagna di indagini diagnostiche e all'installazione di un sistema di monitoraggio idoneo a seguire l'evoluzione dei processi deformativi del pendio in funzione del tempo. Le indagini diagnostiche, eseguite dall'ISMES nel 1990, comprendono:

- rilievo geologico e geostrutturale
- sondaggi meccanici e prove di laboratorio
- indagini soniche (carotaggio sonico)
- indagini con tecnica radar.

Questa campagna di indagini ha consentito di acquisire gli elementi necessari alla valutazione delle condizioni strutturali della rupe e alla progettazione del sistema di monitoraggio. Lo schema della strumentazione di misura, installata dall'ISMES all'inizio del 1991, è illustrato nella planimetria di Fig. 15. Per il controllo delle grandi fratture esistenti nella placca calcarenitica sono stati installati, con l'aiuto di esperti scalatori, 15 estensimetri a filo a lunga base (Fig. 16) in posizioni tali da rendere minimo l'impatto visivo. Due estensimetri a barra sono stati installati sulle lesioni presenti nelle strutture murarie del Santuario. Il controllo dei movimenti all'interno dell'ammasso roccioso è stato eseguito mediante 3 estenso-inclinometri (TRIVEC) due dei quali sono stati installati nel pendio sottostante la rupe per una profondità di circa 30 m e il terzo è stato installato sulla parte superiore della rupe a partire dal piazzale di ingresso del Santuario per una

profondità di 70 m. Completano la strumentazione, un piezometro Casagrande installato entro un foro alla profondità di 60 m dal piazzale del Santuario, 8 trasduttori di temperatura, un pluviometro e alcune basi di misura per estensimetri meccanici rimovibili. Il sistema di acquisizione dei dati è di tipo automatico e comprende 4 unità che provvedono all'alimentazione degli strumenti, all'acquisizione periodica dei dati, alla loro conversione in unità ingegneristiche e alla memorizzazione. Queste unità sono collegate via modem telefonico con una unità remota (installata nella sede dell'ISMES) la quale provvede alla gestione dei dati.

Si è fatto ricorso in questo caso ad un sistema di acquisizione automatico in considerazione della grave situazione di pericolo che richiedeva un controllo costante delle condizioni strutturali della rupe. Un sistema di misura di tipo manuale sarebbe stato difficilmente gestibile a causa delle diffi-

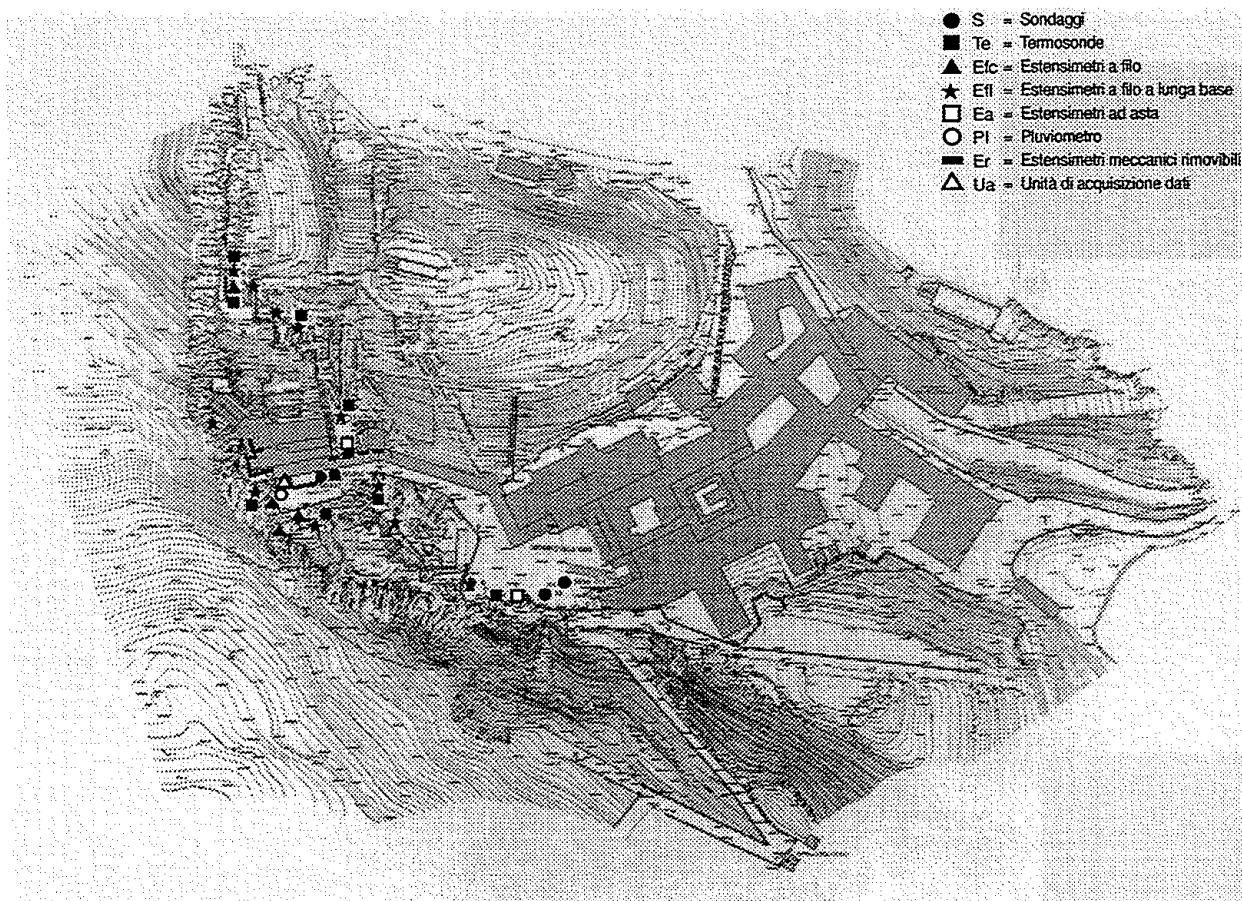


Fig. 15 - Santuario della Verna (Arezzo). Schema degli strumenti installati per il monitoraggio della rupe

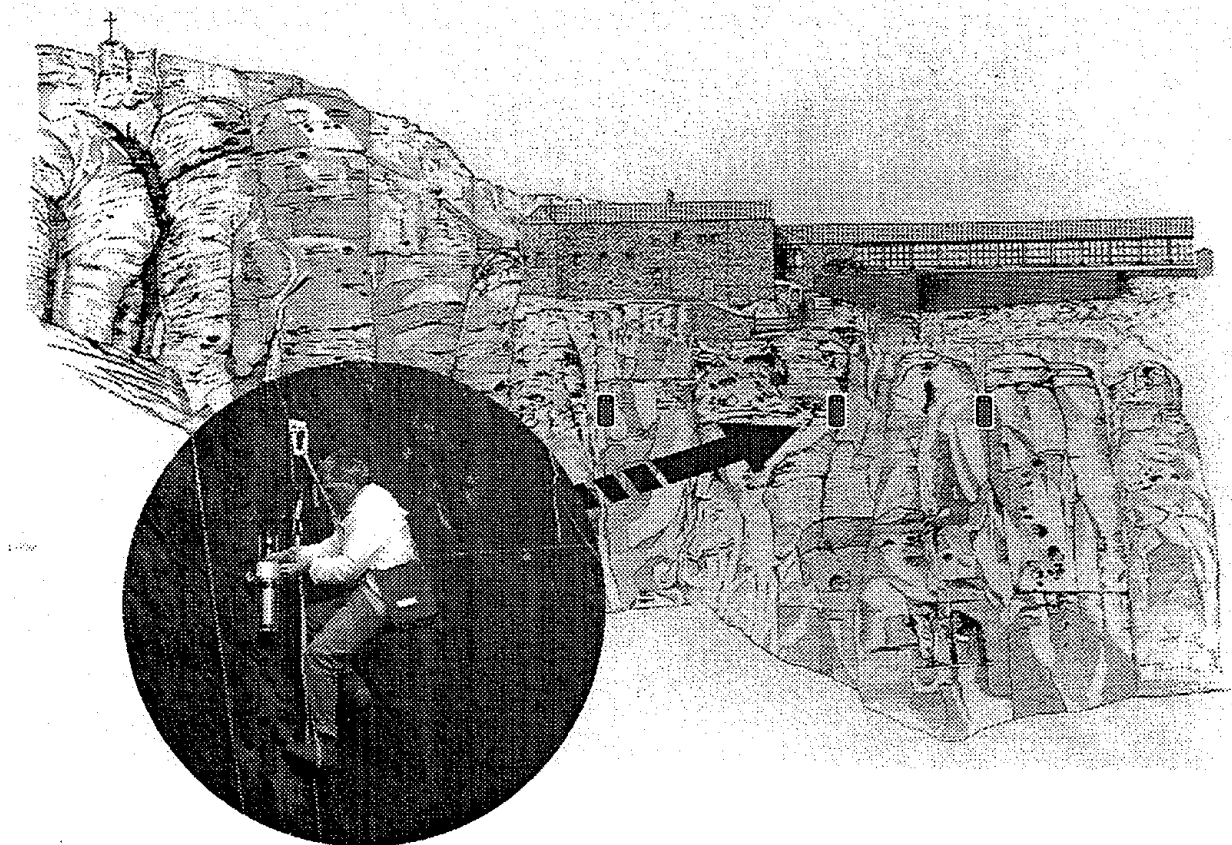


Fig. 16 - Installazione di un estensimetro a filo su una frattura verticale nella parete sottostante il Santuario della Verna

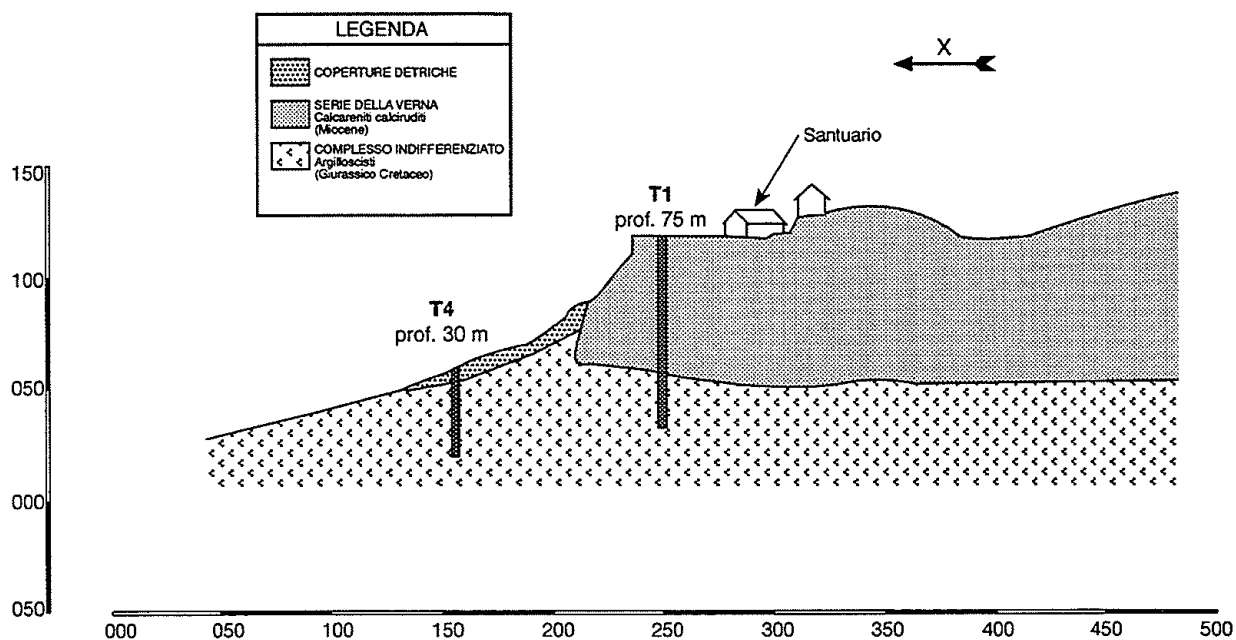
cili condizioni di accessibilità degli strumenti. Solo le misure delle catene estenso-inclinometriche TRIVEC sono state eseguite, come ovvio, con tecnica manuale.

Queste ultime misure sono risultate di grande interesse ai fini di una valutazione dei processi deformativi in atto nella rupe (Fig. 17). L'inclinometro TRIVEC T4 ha subito nell'arco di 2 anni (Febbraio '91 - Marzo '93) uno spostamento verso valle di circa 10 mm in direzione (x) concorde con la massima pendenza. La deformazione interessa un piano di scorrimento posto alla profondità di circa 10 m dal piano di campagna. Anche l'inclinometro T1, ubicato sul piazzale antistante il Santuario mostra nello stesso periodo uno spostamento integrale in superficie pari a circa 10 mm. In questo caso l'andamento è più irregolare rispetto a quello dello strumento T4 in relazione alla complessa situazione geostrutturale della placca la quale è interessata da un intenso stato di fessurazione.

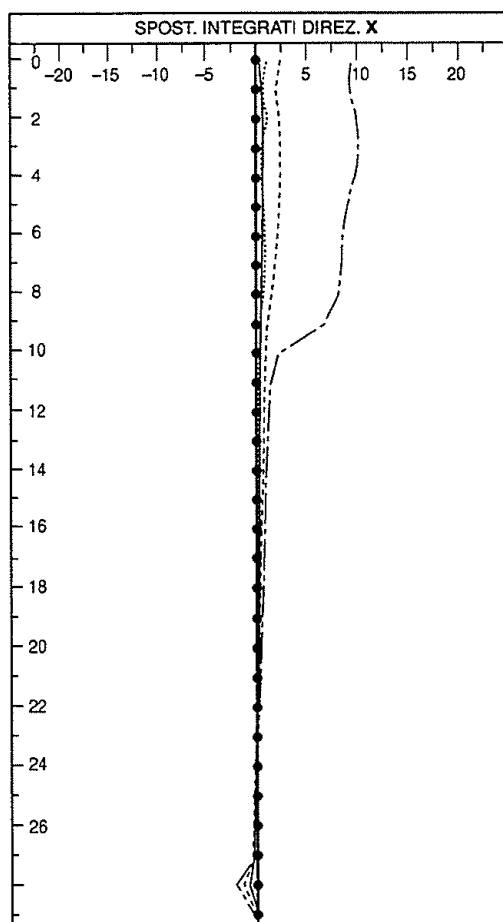
Una relazione diretta fra piovosità e spostamenti è stata inoltre rilevata dall'esame dei dati acquisiti

da alcuni estensimetri e in particolare quello installato su una lesione che interessa il muro di sostegno del piazzale. In Fig. 18 è riportato il diagramma delle deformazioni relative all'estensimetro sopra citato e quello delle precipitazioni rilevate dal pluviometro installato sul piazzale del Santuario.

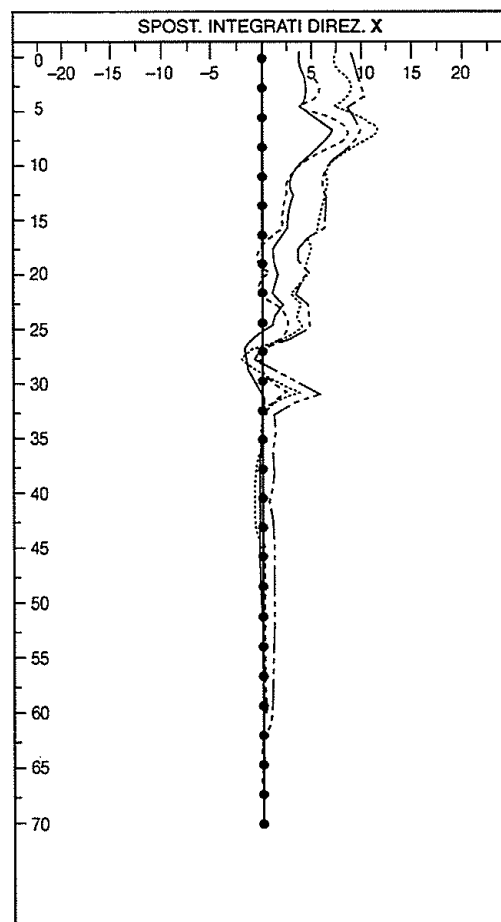
I dati acquisiti dalla campagna di indagini e dal sistema di monitoraggio sono stati utilizzati per la progettazione degli interventi di consolidamento della rupe iniziando dalle aree a più elevato rischio. Sono stati già eseguiti i primi interventi di somma urgenza per rimuovere situazioni di grave pericolo (disgaggi, tiranti, ancoraggi, dreni). Il consolidamento della rupe è tutt'ora in corso e il sistema di misura automatico installato sarà in grado di valutare costantemente gli effetti degli interventi di stabilizzazione e la loro efficacia nel tempo. Già si è potuto osservare che i primi interventi di consolidamento eseguiti in alcune porzioni periferiche della rupe hanno consentito di ridurre in modo apprezzabile i fenomeni deformativi in atto.



TRIVEC T4



TRIVEC T1



Date Letture

Installaz. 26.2.91
 — 20.5.91
 - - - 09.10.91
 - - - 11.12.91
 - - - 04.03.91

Fig. 17 - Diagrammi degli spostamenti nella direzione di massima pendenza misurati mediante due estenso-inclinometri TRIVEC installati in due diversi punti del pendio. La posizione degli strumenti è indicata nella sezione geologica

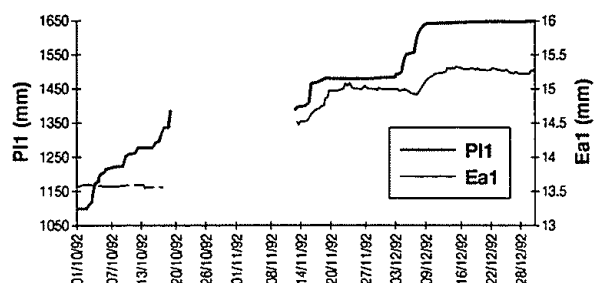


Fig. 18 - Correlazione fra i dati pluviometrici **PI1** e le deformazioni di apertura **Ea1** misurate mediante estensimetro elettrico installato su una lesione presente nel muro sottostante il piazzale del Santuario della Verna

4. IL MONITORAGGIO NEGLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE DI GRANDI STRUTTURE

Le problematiche relative agli interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di grandi strutture sono varie e complesse e risulta difficile racchiuderle in una trattazione sistematica poiché le soluzioni progettuali sono strettamente legate al

problema specifico.

Questo settore dell'ingegneria geotecnica è senza dubbio quello che più di ogni altro ha bisogno del supporto del monitoraggio, sia per valutare l'efficacia degli interventi durante le varie fasi di realizzazione, sia per tenere sotto costante controllo le condizioni di sicurezza della struttura le cui fondazioni sono oggetto di intervento. Le problematiche divengono più complesse nel caso in cui il progetto di consolidamento riguardi una struttura di grande interesse storico e monumentale.

4.1 Il problema della Cattedrale Metropolitana di Città del Messico

La costruzione della Cattedrale fu iniziata nel 1573 sui resti di costruzioni azteche e richiese 240 anni di lavoro. I terreni di fondazione sono caratterizzati da notevoli fenomeni di deformabilità e subsidenza e gli architetti che si avvicinarono nella conduzione dei lavori della Cattedrale dovettero lottare contro i continui cedimenti. In Fig. 19 è riportato il prospetto frontale della Cattedrale con la stratigrafia del terreno fino alla profondità di 60 m.

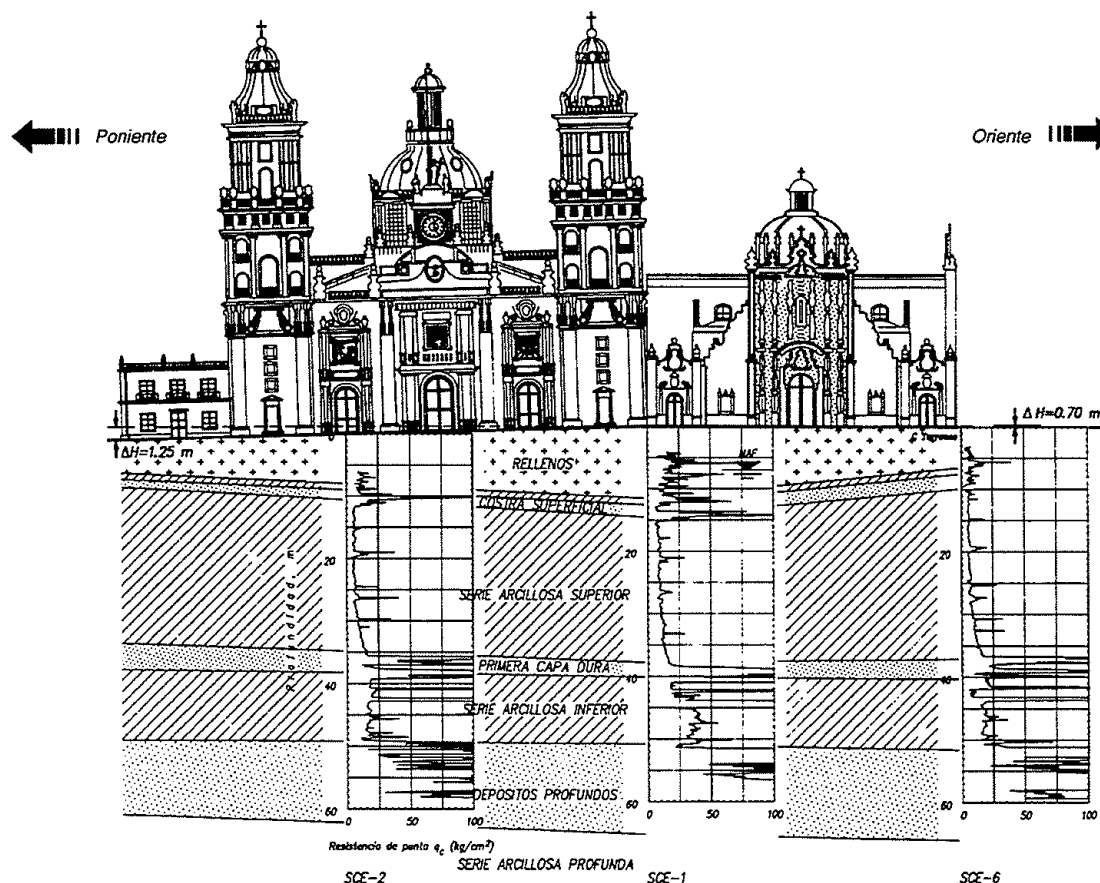


Fig. 19 - Prospetto frontale della Cattedrale di Città del Messico e stratigrafia del terreno di fondazione. Nella figura sono riportati i diagrammi delle prove penetrometriche eseguite con punta elettrica

I tre profili penetrometrici indicati in figura, ottenuti con punta elettrica, mostrano una maggior resistenza del suolo nella parte centrale e minore ai due lati; ciò ha provocato la rotazione della Cattedrale verso ponente e quella del Sacrario verso oriente. Il cedimento differenziale massimo misurato nel Dicembre 1989 era pari a 2.40 m come indicato dalle curve di livello degli assestamenti riportate in Fig. 20. Questi cedimenti differenziali hanno dato origine a vistose deformazioni e fessurazioni delle strutture portanti, di entità tale da richiedere l'installazione di strutture metalliche provvisorie di supporto degli archi e di cerchiatura delle colonne.

Per correggere questi fenomeni di cedimento furono esaminate numerose proposte e, dopo accurati studi, venne scelto l'intervento di sottoescavazione delle parti più alte della Cattedrale. Questa operazione, tutt'ora in corso, è effettuata a partire da 30 pozzi verticali di profondità circa 20 m e diametro 3.4 m, alla base dei quali vengono eseguite delle perforazioni radiali di lunghezza 6 m e diametro 150 mm secondo lo schema illustrato in Fig. 21. La ripetuta estrazione di materiale argilloso mediante queste perforazioni provoca progressivi assestamenti del terreno i quali possono essere facilmente controllati in quanto avvengono in modo lento.

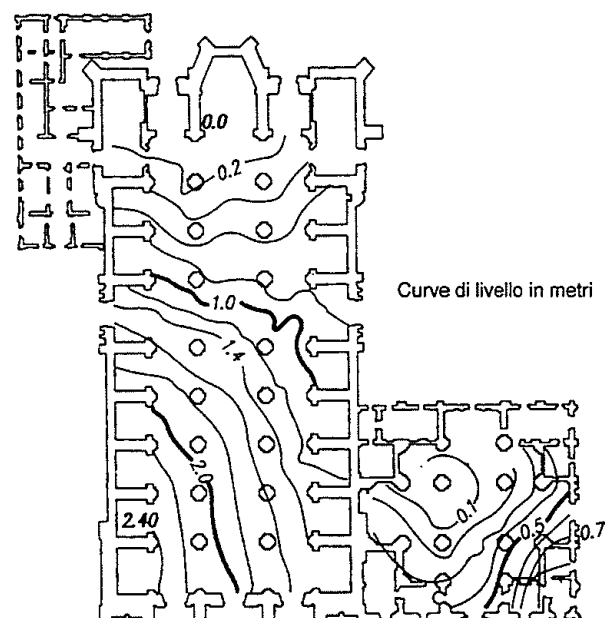


Fig. 20 - Curve di livello degli assestamenti differenziali (in metri) misurati nel Dicembre 1989 sui plinti delle colonne della Cattedrale di Città del Messico prima dell'inizio dei lavori

Un intervento così complesso ha richiesto una progettazione molto accurata e un attento controllo degli spostamenti della struttura al fine di controllare l'efficacia dell'intervento e prevenire eventuali danni strutturali. Con finanziamento

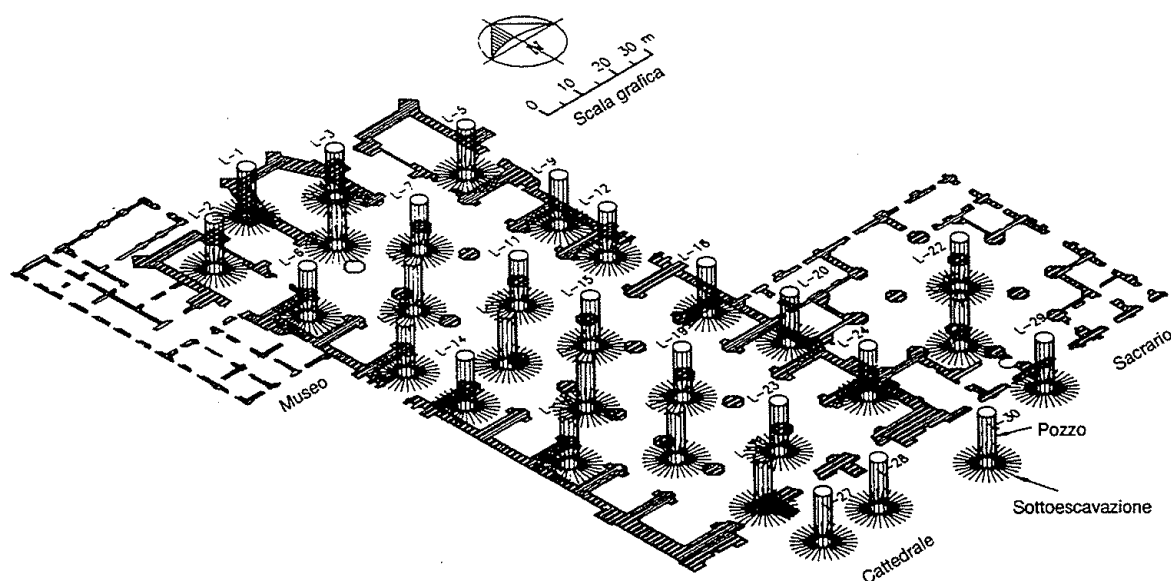


Fig. 21 - Schema dell'intervento di subsidenza controllata eseguito sui terreni di fondazione della cattedrale di Città del Messico. Sono visibili i 30 pozzi verticali alla base dei quali partono i sondaggi radiali di sottoescavazione

dell'ENEL, l'ISMES ha installato nell'estate del 1994 un sistema di monitoraggio automatico in grado di seguire in tempo reale gli effetti delle sottoescavazioni sul comportamento della struttura. Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi del comportamento delle colonne del Tiburio poiché l'aspetto più delicato del progetto è proprio la risposta delle colonne agli interventi correttivi di sottoescavazione.

Il sistema di monitoraggio installato sulle strutture portanti della Cattedrale è illustrato nella planimetria di Fig. 22. Esso comprende:

- 4 pendoli fissi con telecoordinometri installati sulle 4 colonne del Tiburio
- 10 estensimetri a filo a lunga base per la misu-

ra degli spostamenti relativi fra i pilastri delle navate

- 4 termosonde per la misura della temperatura dell'aria
- 1 radiometro per la verifica degli effetti dell'irraggiamento solare sulle strutture di copertura.

Tutti gli strumenti sono collegati ad un sistema di acquisizione automatica collegato, attraverso linea telefonica, sia con l'Università di Città del Messico sia con la sede dell'ISMES in Bergamo. Prima di procedere all'installazione del sistema di monitoraggio è stata anche eseguita una attenta analisi degli stati tensionali presenti nelle principali strutture portanti utilizzando la tecnica del mar-

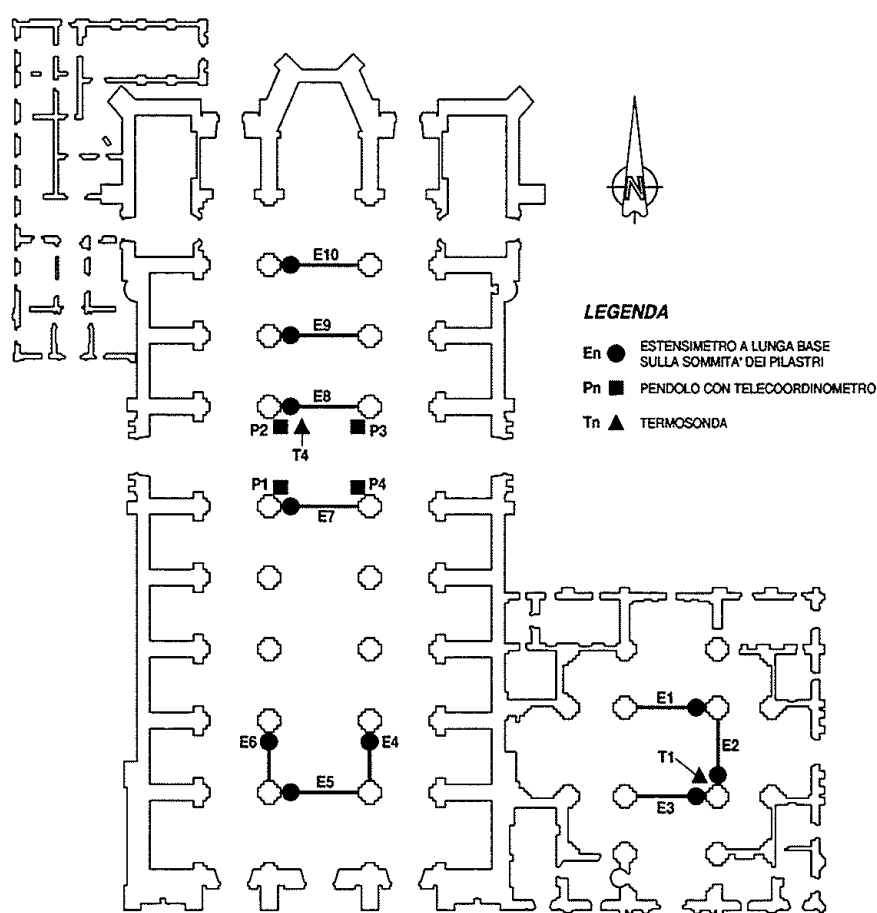


Fig. 22 - Schema degli strumenti installati sulle strutture portanti della Cattedrale di Città del Messico nel Giugno 1994

tinetto piatto. In Fig. 23 sono riportati i valori di sollecitazione misurati sulle 4 colonne del Tiburio le quali presentano forti scostamenti dalla verticalità.

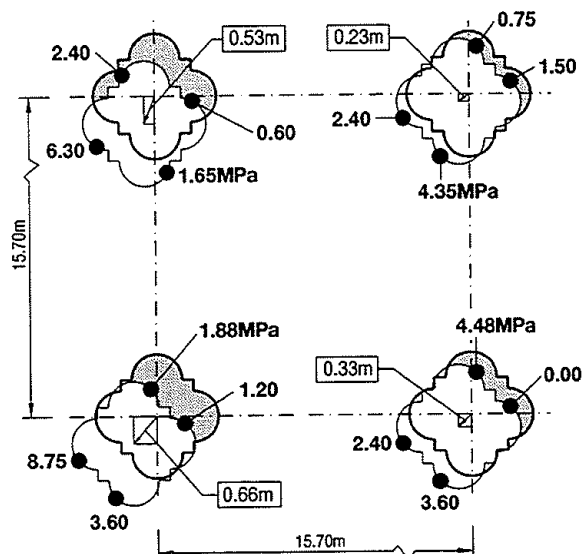


Fig. 23 - Scostamento dalla verticalità delle colonne del Tiburio della Cattedrale di Città del Messico e valori degli stati tensionali (in MPa) misurati con la tecnica del martinetto piatto

Si può osservare che gli stati tensionali misurati sono in buon accordo coi valori dello scostamento della verticalità rilevati sui quattro pilastri. Il valore di sollecitazione più elevato (pari a 8.75 MPa) è stato misurato sulla colonna che mostra il fuori piombo più elevato (0.66 m). In alcune delle zone esaminate si sono riscontrati stati tensionali molto bassi o addirittura nulli il che dimostra che gli intensi stati fessurativi apparsi sulle colonne a seguito dei cedimenti differenziali hanno già provocato in alcuni punti una parzializzazione della sezione reagente.

I primi risultati forniti dal sistema di monitoraggio automatico installato nel Giugno 1994 sono di grandissimo interesse e stanno consentendo ai tecnici messicani di seguire in tempo reale gli effetti degli interventi di sottoescavazione.

Gli spostamenti complessivi misurati sulle 4 colonne del Tiburio nel periodo Giugno 1994 -

Febbraio 1995 sono riportati nella planimetria di Fig. 24. Si può chiaramente osservare che tutte le colonne si stanno muovendo nella direzione desiderata con andamento tale da ridurre progressivamente gli scostamenti dalla verticalità che le colonne possedevano all'inizio dell'operazione. Anche le misure fornite dagli estensimetri a lunga base installati fra le colonne della navata principale indicano una progressiva chiusura delle grandi lesioni longitudinali che interessano la volta della navata principale.

Questo quadro di misure ha consentito quindi di valutare con tempestività la risposta della struttura ai cedimenti imposti ai terreni di fondazione e di formulare fino ad ora un giudizio positivo sulla validità della soluzione prescelta.

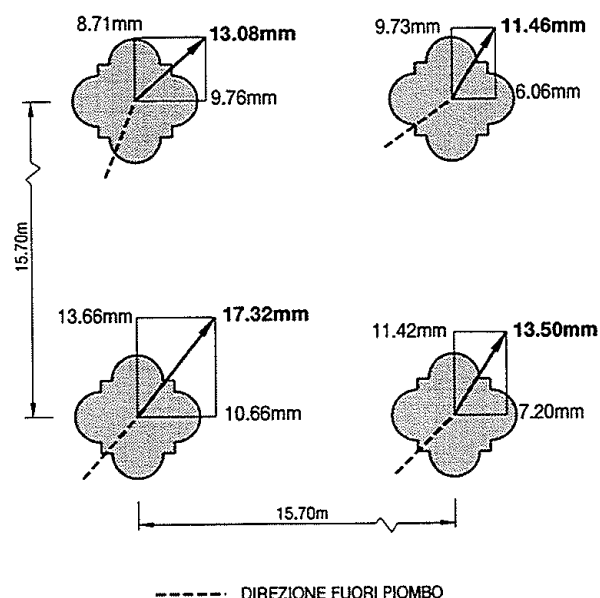


Fig. 24 - Spostamenti misurati dai quattro pendoli installati sui pilastri del Tiburio nel periodo Luglio 1994 - Febbraio 1995

5. BIBLIOGRAFIA

1. BARLA G., ROSSI P.P., "Stress measurements in tunnel linings." International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Zürich, 1983
2. CRIVELLI R., DEVIN P., GUIDO S., ROSSI P.P., ZANINETTI A., "In situ stress determination in anisotropic rock by means of hydraulic fracturing and overcoring tests." Proc. of the ISRM Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul, 1993
3. CRIVELLI R., DEVIN P., GUIDO S., "Determinazione della deformabilità degli ammassi rocciosi con prove dilatometriche." Rivista Italiana di Geotecnica, Aprile - Giugno 1993
4. DEVIN P., "Strumentazione speciale per la misura degli spostamenti all'interno di un foro di sondaggio". XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna 1986.
5. DEVIN P., FRASSONI A., ROSSI P.P., "La strumentazione per il controllo e l'osservazione dei movimenti di versante." Secondo ciclo di conferenze su meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, Nov. - Dic. 1988.
6. DEVIN P., GRASSI F., POMA A., "Finite Difference Analysis of Displacement Measurements for Optimizing Tunnel Construction in Swelling Soils." 4th International Symposium on Field Measurements, Bergamo, 1995
7. DEVIN P., GUIDO S., ZANINETTI A., "Determinazione dello stato tensionale in rocce fratturate mediante fratturazione idraulica." XVIII Convegno Nazionale di Geotecnica, Rimini, 1993
8. FRANKLIN J.A., "The monitoring of rock." Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., 14, 163-192., 1977
9. FRANKLIN J.A., "Slope instrumentation and monitoring. Slope instability." John Wiley & Sons 143-169, 1984
10. FRASSONI A., ROSSI P.P., "Prove in sito, lo stato dell'arte, nuovi sviluppi applicativi." Primo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Torino, Novembre 1986
11. FROLDI P., "Il consolidamento della rupe del Santuario della Verna: Analisi geomeccaniche." Quarry and Construction, n.7 Luglio 1993
12. HANNA T.H., "Field Instrumentation in Geotechnical Engineering." Trans. Tech. Publications, 1985
13. HOEK E., BRAY J.W., "Rock slope engineering." Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977
14. ISRM, "Suggested methods for monitoring rock movements using inclinometers and tiltmeters." Rock Mechanics, 10, 81-106, 1977
15. KÖPPEL J., AMSTAD Ch. KOVARI K., "The measurement of displacement vectors with the "TRIVEC" borehole probe." International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 1, 209-218, Zürich, 1983
16. KOVARI K., AMSTAD Ch., GROB H., "Displacements measurements of high accuracy in underground openings." 3rd ISRM Symp., IIA, 445-450, Denver, 1974
17. KOVARI K., AMSTAD Ch., KÖPPEL J., "New Developments in the Instrumentation of Underground and other Geotechnical Structures." Schweizerische Ingenieur und Architekt, Vol. 97, No. 4, pp. 811-818, 1979
18. KOVARI K., FRITZ P., "Recent developments in the analysis and monitoring of rock slopes." 4th ISL, 1, 1-16, Toronto, 1984
19. LUNARDI P., et al, "Il Santuario della Verna: Studio dei dissesti e progettazione degli interventi di consolidamento." Quarry and Construction, n.7 Luglio 1993
20. MELI R., SANCHEZ RAMIREZ A.R., "Studies for the Rehabilitation of the Mexico City Cathedral." IABSE Symposium, Roma 1993
21. PATTON F.D., "The role of instrumentation in the analysis of the stability of rock slopes." International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 1, 719-748, Zürich, 1983
22. RIBACCHI R., "Il controllo della stabilità dei pendii." XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, Bologna, Maggio 1986.
23. ROSSI P.P., "Le indagini sperimentali per le caratterizzazioni degli ammassi rocciosi." Bollettino ISMES n. 277, 1990
24. ROSSI P.P., "Criteri di indagine e controllo per il progetto e la realizzazione di gallerie." Convegno: "Le gallerie nei tracciati stradali e ferroviari", Bologna 23 Settembre 1994.
25. ZALDIVAR GUERRA S., "La Catedral Metropolitana y el Sagrario del la Ciudad de Mexico." Pubblicazione SEDESOL.