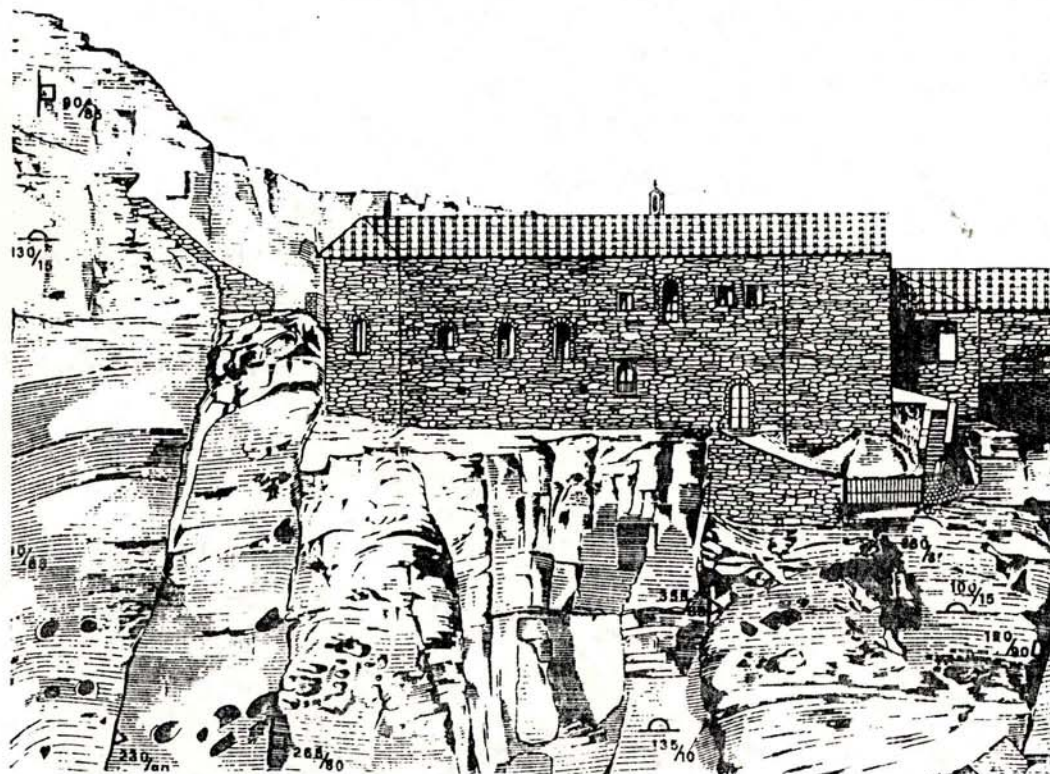


# IL SANTUARIO DELLA VERNA

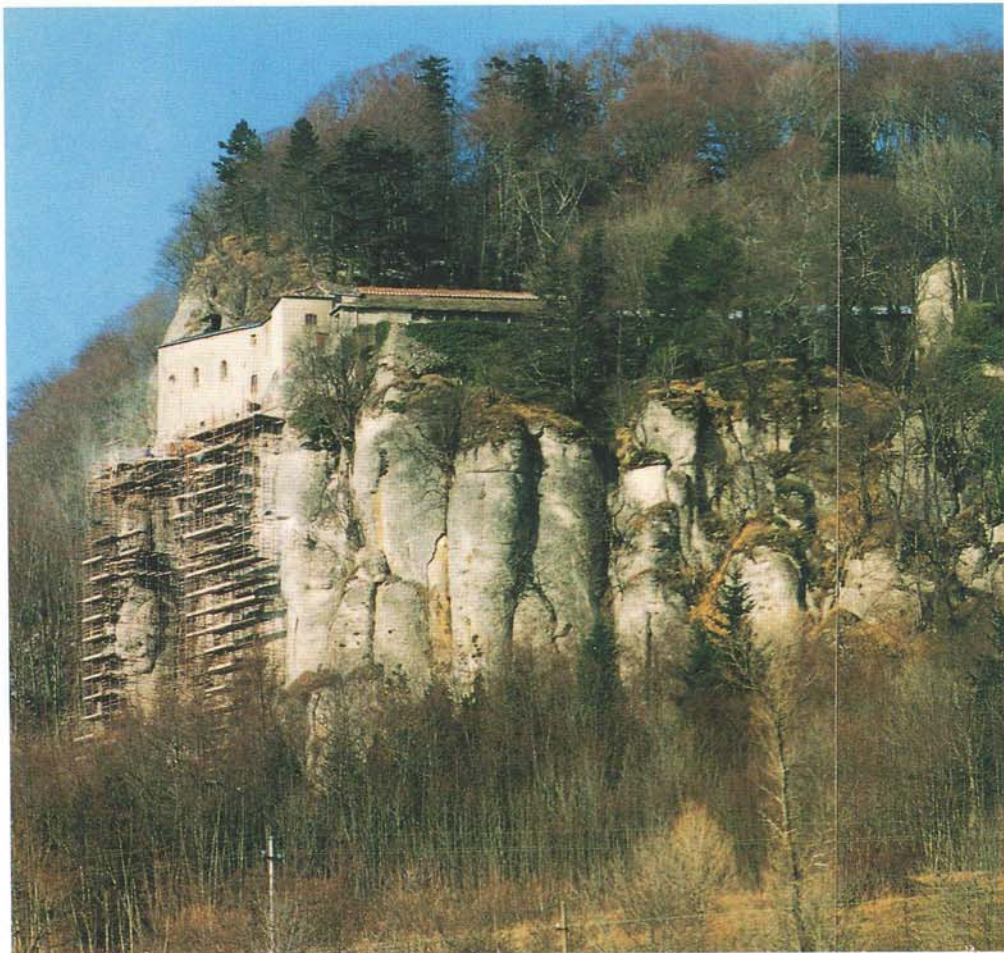
La geoingegneria e il restauro  
dei beni storico-ambientali

|                            |   |                      |
|----------------------------|---|----------------------|
| Prof. Ing. P. Lunardi      | – | Universita' di Parma |
| Dott. Geol. P. Froidi      | – | RockSoil S.p.A.      |
| Dott. Geol. E. Aiello      | – | GeoEco S.r.L.        |
| Dott. Geol. P. Francalanci | – | GeoEco S.r.L.        |
| Dott. Geol. G. Grandini    | – | GeoEco S.r.L.        |
| Dott. Ing. A. Frassoni     | – | ISMES S.p.A.         |
| Dott. Ing. P. De Lotto     | – | ISMES S.p.A.         |



«Io ho in Toscana un monte divotissimo, il quale si chiama il monte della Verna, lo quale è molto solitario e selvatico, ed è troppo bene atto a chi volesse fare penitenza, in luogo rimosso dalla gente, o a chi desidera vita solitaria. S'egli ti piacesse, volentieri lo ti donerei a te e a' tuoi compagni per salute dell'anima mia».

Con queste parole il Conte Orlando Catani donò nell'anno 1213 la montagna della Verna a S. Francesco d'Assisi



# IL SANTUARIO DELLA

## La geoingegneria ed il restauro dei beni storico

### 1. INTRODUZIONE

#### 1.1. Cenni storici

Il Santuario della Verna, eremo francescano dove il Santo ricevette il dono delle Stimmate, sorge su una placca calcarenitica miocenica al limite dell'Appennino Tosco-Romagnolo tra Cesena ed Arezzo in direzione Nord-Sud e tra Bibbiena e Pieve S. Stefano in direzione Ovest-Est.

- \* Università di Parma
- \*\* Libero professionista
- ° Rocksoil S.p.A.
- °° GeoEco Studio Associato
- °°° ISMES S.r.l.

### STUDIO DEI DISSESTI E PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Prof. Ing. P. LUNARDI - *Progettista\**  
Dr. Geol. E. AIELLO - *Progettista\*\**  
Dr. Geol. P. Frolidi°  
Dr. Geol. P. Francalanci°°  
Dr. Geol. G. Grandini °°

Monitoraggio:  
Dr. Ing. A. Frassoni °°°  
Dr. Ing. P. De Lotto °°°

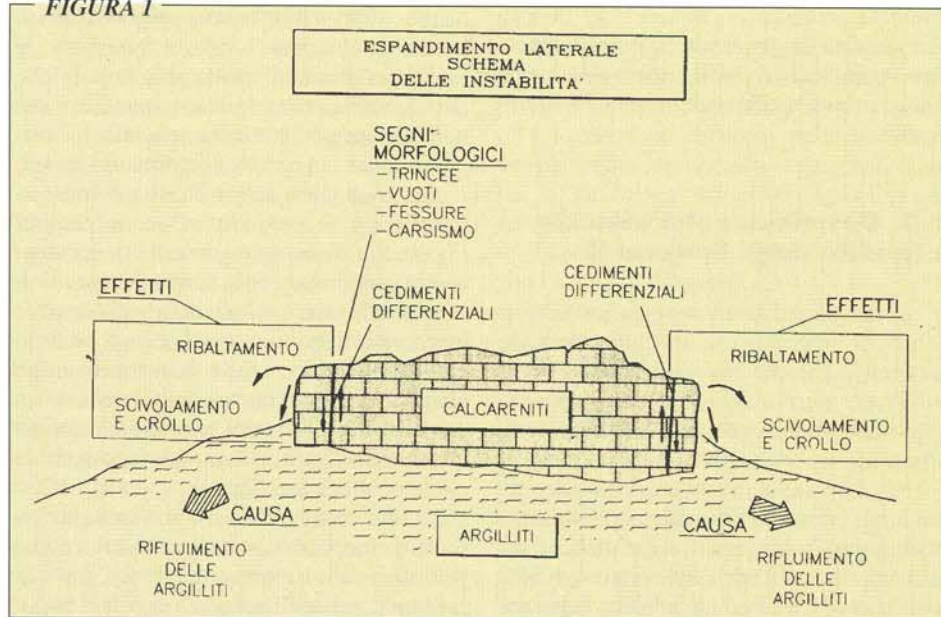
Orograficamente la rupe di Chiusi della Verna, costituita dalle pendici meridionali del M. Penna (1264 m), sorge poco distante dalle propaggini settentrionali dell'Alpe della Catenaia, costituente la naturale ossatura di suddivisione tra il Casentino e la Val Tiberina dove, dal M. Fumaiolo prende origine il Fiume Tevere.

Gli studi di geologia classica ascrivono tale placca calcarenitica al complesso parautoctono dei «Complessi Liguridi».

Esso è rappresentato da placche discontinue, spesso assai distanti fra di loro, di modeste dimensioni e trasgressive sui «Complessi Liguridi». Tali placche sono ritenute parautoctone da molti AA. che in esse hanno distinto le unità litostratigrafiche che non sempre rispondono a vere e proprie for-



FIGURA 1



fenomenologia di dissesti comuni a tutti i lembi calcarei disarticolati dell'Appennino settentrionale (Pietra di Bismantova, Rupe di S.Marino, Rupe di S.Leo, Rocca di Gradara, M.Fumaiolo ecc.).

La descrizione dell'evoluzione geologica di questi siti è efficacemente riportata in *Figura 1* dove si evidenzia il fenomeno dell'espansione laterale che interessa la placca calcarenitica.

Alla causa principale dell'instabilità geologica si associano una serie di dissesti che possono essere considerati conseguenti al fenomeno nel suo complesso.

I dissesti interessanti il Santuario della Verna e la sottostante frazione de La Beccia sono stati tenuti sotto osservazione dagli scriventi per conto dell'Amministrazione Comunale, da circa otto anni.

Si è trattato di un controllo diretto degli elementi fessurativi e deformativi interessanti l'ammasso roccioso nel suo complesso, le strutture del Santuario, la pendice e gli edifici de La Beccia, l'abitato sottostante alla parete occidentale della rupe su cui sorge il Santuario.

Lesione di un pavimento dell'abitato «La Beccia»



Negli ultimi tempi si è verificato un notevole incremento dei movimenti relativi ad alcuni sistemi fessurativi presenti nell'ambito dell'ammasso, che si sono ripercossi sulle strutture sovrastanti il Santuario. Inoltre, si sono rilevati movimenti di creep nel substrato argilloscistoso interessanti direttamente la frazione abitata de La Beccia ove numerosi edifici presentano diffusi fenomeni di fessurazione e deformazioni notevoli, in alcuni casi tali da renderli inagibili.

Si sono registrati, infine, fenomeni di toppling di alcuni blocchi in prossimità del piazzale del Santuario e splaccamenti lungo le pareti sottostanti il Santuario stesso, mentre fessure beanti hanno mostrato recenti allontanamenti dei relativi labbri, inducendo ulteriori disequilibri nei materiali di riempimento e nelle porzioni rocciose aggettanti, come al Sasso Spicco, al Letto di S.Francesco e al Precipizio.

Da alcuni anni il Comune di Chiusi della Verna ha realizzato un complesso sistema di monitoraggio, con trasmissione dei dati in tempo reale mediante acquisizione automatica, installato dalla ISMES di Bergamo e finanziato dalla Regione Toscana tramite lo stesso Comune.

Nell'ambito di detto finanziamento è stato anche realizzato, sempre per conto del Comune di Chiusi della Verna, lo studio geologico, idrogeologico e geostrutturale dell'area del Santuario e sono state analizzate e studiate le condizioni di stabilità della rupe ove sorge il Santuario e della pendice sottostante comprendente la frazione de La Beccia, nonché quelle degli edifici ivi presenti.

Le finalità dello studio tutt'ora in corso sono costituite dall'individuazione della

## VERNA ambientali

mazioni anche se ne portano il nome.

La Formazione di S.Marino e quella sovrastante del M.Fumaiolo, sono in regolare successione stratigrafica e costituiscono due cospicue placche; l'una si estende da Chiusi della Verna al M.Penna (Arezzo), con lembi minori isolati nel Casentino, l'altra costituisce il M.Fumaiolo.

La Formazione di S.Marino, a cui appartiene la rupe della Verna, è costituita alla base da biocalciruditi massicce, biancastre a briozoi, e in alto, da calcareniti grigio-giallastre a stratificazione incrociata, con briozoi, echinidi, foraminiferi litorali e litotamni.

Tale conformazione geologica, ovvero la presenza di una placca calcarenitica rigida su un substrato argillitico plastico, ha costituito i presupposti per lo sviluppo di una

tipologia, intensità e geometria dei dissesti allo scopo di progettare ed eseguire le necessarie operazioni di bonifica e consolidamento tese a fermare o rallentare le instabilità principali.

### 1.2. Descrizione del dissesto e finalità degli interventi

Come già accennato nel paragrafo precedente il meccanismo di deformazione gravitativa che interessa la rupe della Verna può essere ascritto a quel fenomeno denominato «espandimento laterale» (Lateral Spreading secondo gli autori anglosassoni).

Risulta estremamente importante approfondire, a premessa di quanto verrà illustrato nel seguito, le principali caratteristiche del dissesto e le finalità dell'intervento che viene progettato in un'ottica globale non condizionata da considerazioni e fattori esclusivamente locali, ma facente parte di un disegno che deve essere risolutivo del fenomeno nella sua interezza.

Il fenomeno può essere considerato nelle seguenti sue parti essenziali:

**MOTORE O CAUSA:** consiste nel rifluimento gravitativo delle argilliti di base dovuto sia a fenomeni continui e lenti (creep di versante, soliflussi ecc...) sia a pulsazioni parossistiche (frane per scivolamento dovute alle intense precipitazioni, ecc).

La dimensione del fenomeno risulta consistente e particolarmente importante nel settore meridionale del rilievo. L'acqua di infiltrazione e il conseguente aumento delle pressioni interstiziali gioca un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle deformazioni.

**EFFETTI O SINTOMI:** si riassumono nell'«apertura» della placca calcarea con le più evidenti sintomatologie descritte dettagliatamente più avanti (crolli, ribaltamenti, cedimenti ecc...).

La progressiva riduzione del contenimento laterale della placca lapidea innesca, a fronte di un reticolo fessurativo parzialmente preesistente e di un equilibrio tensionale suo proprio, l'apertura a «petali» della rupe secondo i piani preesistenti o nuove superfici di fessurazione e la conseguente «deriva» di blocchi, pinnacoli e lastre rocciose.

Anche in questo caso l'acqua e il ghiaccio giocano un ruolo essenziale nel meccanismo, non più come causa interna (pressione interstiziale), ma come causa esterna (spinte idrostatiche e criostatiche nel reticolo fessurativo).

Gli scriventi hanno ad oggi raggiunto, grazie alle continue osservazioni e agli studi sviluppati sul fenomeno, un'adeguata conoscenza del meccanismo nel suo complesso ed

hanno quindi predisposto un progetto generale atto ad eliminare o ridurre fortemente le cause del dissesto; spento il «motore» che attiva continuamente le deformazioni è possibile pensare ad un rallentamento fino ad una interruzione dei processi deformativi in atto.

La risoluzione del problema generale, da inserirsi in un progetto ad ampio respiro, importante sia economicamente sia tecnicamente, comporta però la «preparazione» della rupe all'intervento generale; questa deve essere resa monolitica nelle sue parti periferiche tanto da bloccare le deformazioni che hanno fino ad oggi comportato l'esecuzione, per stralci successivi, di interventi di somma urgenza finalizzati alla rimozione dei rischi per la pubblica incolumità.

E' di questi interventi che discute la presente memoria; essi vanno considerati come risolutivi delle sintomatologie più gravi in preparazione dell'intervento generale teso a sanare completamente la patologia, rimuovendone la causa prima.

## 2. ANALISI

### 2.1. Studio geologico

L'area di Chiusi della Verna presenta, dal punto di vista geologico regionale, una notevole complessità ricadendo in una fascia di transizione tra due serie sedimentarie autoctone ben individuate e contigue che sono la serie Toscana e la Serie Umbro-Marchigiano - Romagnola, separate dalla formazione dei Complessi Tosco-Emiliani.

Tali complessi giacciono al di sopra delle due serie anzidette come lembi isolati, in successione parziale, senza legami sedimentari generali sovrapposti o inclusi in una massa argillosa prevalente, indicata nella letteratura geologica come Complesso Indifferenziato.

I terreni affioranti nell'area del Santuario della Verna appartengono a due unità strutturali:

- Unità alloctone Liguri: costituite da terreni flyschoidi e complessi argillosi (Cretaceo-Eocene);
- Successioni alloctone e semialloctone (Serie della Verna): rappresentate da sedimenti biogenetici e terrigeni del Miocene Medio.

Sopra i descritti sedimenti mesozoici e cenozoici si rinvengono depositi recenti: detrito di falda ed accumuli di frana.

Il rilievo della Verna, che raggiunge i 1282 m al M.Penna, è costituito da grandi e spesse bancate calcarenitiche, giacenti o parzialmente immerse in terreni eterogenei prevalentemente argillitici. Queste bancate, che si estendono per circa 4 kmq, mostrano asset-

to monoclinale con immersione verso sud.

Passando ad una descrizione sistematica delle formazioni riconosciute durante il rilevamento di un congruo intorno dell'area in esame, si illustrano nella carta Geomorfologico-tettonica (Figura 2) le varie formazioni, distinte per serie e distribuite cronologicamente dal basso verso l'alto.

I terreni appartenenti alle Unità alloctone Liguri sono rappresentate dal Complesso Indifferenziato e dalla Formazione di Monte Morello («Alberese») facente parte della Serie Pietraforte - Albarese.

I terreni della successione alloctona e semialloctona della Serie della Verna sono costituiti da Calcari a Briozoi suddivisi in due membri; quello superiore (Mcb2) costituito da calcareniti o calciruditi grigio giallastre in strati spesso irregolari con presenza di arenarie glauconitiche, il membro inferiore (Mcb1) formato da biocalcareniti o biocalciruditi biancastre a Briozoi massicce o a stratificazione poco evidente.

In base alle osservazioni geologiche lo spessore massimo stimato per tale unità si aggira sui 150 m circa. L'età è miocenica (Elveziano-Langhiano).

Fra i depositi recenti si è provveduto a distinguere il Detrito di Falda (dMcb1) ed i terreni di riporto con granulometria variabile.

Tale unità è chiaramente abbondante in superficie sia sotto forma di detrito eluviale che colluviale e di falda, ma è stata cartografata soltanto là dove assume un preciso significato geotecnico, con spessori stimati superiori a 2 m.

Le principali caratteristiche geomorfologiche dell'area esaminata dipendono fortemente dalle condizioni geologiche, rappresentate da formazioni litologicamente e strutturalmente complesse.

L'area nel suo complesso presenta una elevata instabilità sia nella placca calcarenitica, variamente interessata da fratture, che nella formazione argilloscistosa d'appoggio che ha subito avanzati processi di argillificazione nei primi metri.

L'evoluzione morfologica del rilievo sembra essere legata ad una deformazione profonda del tipo «espandimento laterale» con rigonfiamento del substrato argillitico che determina, nel piastrone calcarenitico sovrastante, fratture, giunti verticali aperti e cavità.

Si osservano, inoltre, sui blocchi rocciosi suddivisi anche da discontinuità di natura tettonica, gli effetti dei cedimenti differenziali, con il basculamento dei blocchi rocciosi verso l'interno, gli scivolamenti in blocco ed i fenomeni di ribaltamento.

Alla base della rupe calcarenitica sulla quale si erge il Santuario sono presenti rile-

vanti fenomeni gravitativi interessanti il substrato argilloscistoso, che coinvolgono in pieno l'abitato della Beccia soggetto a notevoli deformazioni delle strutture edilizie.

Infine, il rilievo delle lineazioni effettuato mediante fotointerpretazione mostra un trend consistente con quello delle famiglie di discontinuità evidenziate nel rilievo geostrutturale.

Sebbene tutta l'area del Santuario sia interessata da fenomeni di dissesto con evidenze fessurative nelle strutture, risultano particolarmente problematiche le porzioni di ammasso relative alla parete sottostante il piazzale della Basilica, al Sasso Spicco, al Letto di San Francesco, alle aree contigue, alla Cappella delle Stimmate con il sovrastante appiccio roccioso e alla parete rocciosa sottostante il Santuario che guarda La Beccia.

Inoltre, sono presenti fenomeni gravitativi al piede della rupe che si manifestano, come già detto, con rigonfiamenti delle argilliti del substrato e con evidenti fenomeni di colamento che interessano La Beccia.

## 2.2. Studio geostrutturale

Lo studio approfondito delle instabilità che interessano l'area passa necessariamente attraverso una dettagliata analisi geostrutturale della placca calcarenitica.

L'analisi morfologica della rupe su cui sorge il Santuario della Verna ha evidenziato come questa sia caratterizzata da un reticolo di fratture dotate di persistenza ed apertura elevate, che ne determina la suddivisione in blocchi anche di grandi dimensioni. Tali discontinuità, che risultano in genere molto nette e parzialmente riempite di materiale cadutovi all'interno per gravità o trasportato dall'acqua, sono riferibili, geneticamente, ad un'azione meccanica di trazione.

Il rilievo geostrutturale è stato finalizzato alla definizione del quadro geometrico-fessurativo del settore di rupe che più direttamente interessa l'area del Santuario, con l'intento di localizzare le zone più critiche per la stabilità, di individuare eventuali direzioni di movimento preferenziale dei blocchi e di ricavare indicazioni per l'ottimizzazione degli interventi di monitoraggio e di consolida-

mento.

Il rilevamento strutturale di un ammasso roccioso prevede il rilievo sistematico sulla parete delle giaciture dei piani di discontinuità.

La raccolta delle misure delle diaclasi in una parte di parete considerata rappresentativa si definisce «stazione geologico-geostrutturale».

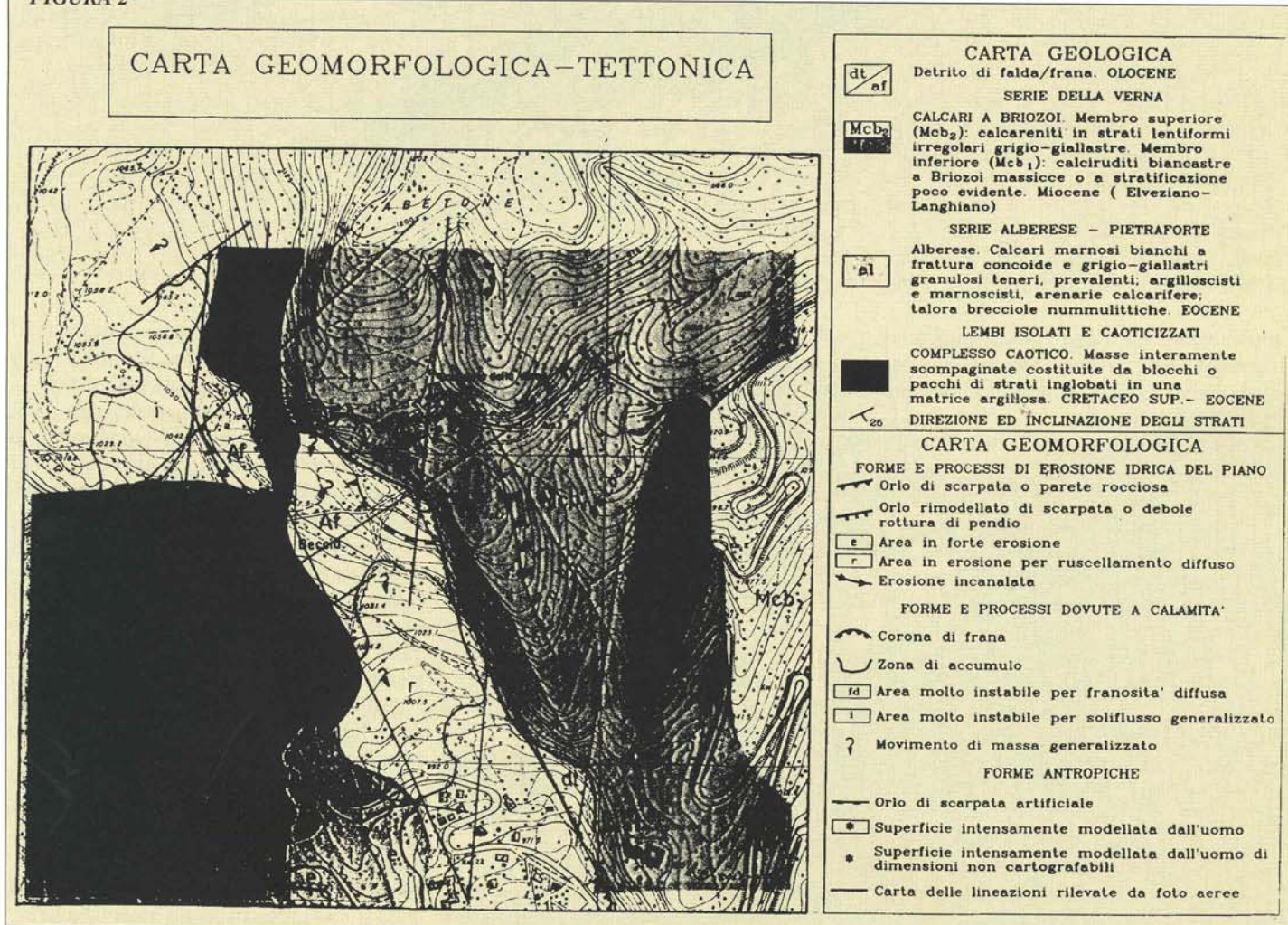
In particolare per ogni discontinuità vengono acquisiti i seguenti dati:

- direzione rispetto al Nord;
- inclinazione;
- esposizione e geometria del piano;
- apertura;
- materiale di riempimento delle discontinuità;
- distanza da discontinuità analoghe (spaziatura);
- eventuale presenza d'acqua.

La definizione del quadro geometrico-fessurativo è consistita nella caratterizzazione dei parametri geometrici e geomeccanici delle discontinuità presenti (giacitura, spaziatura e persistenza) e nella mappatura delle principali discontinuità su base cartografica (Figura 3).

Il rilievo è stato eseguito su 16 stazioni

FIGURA 2



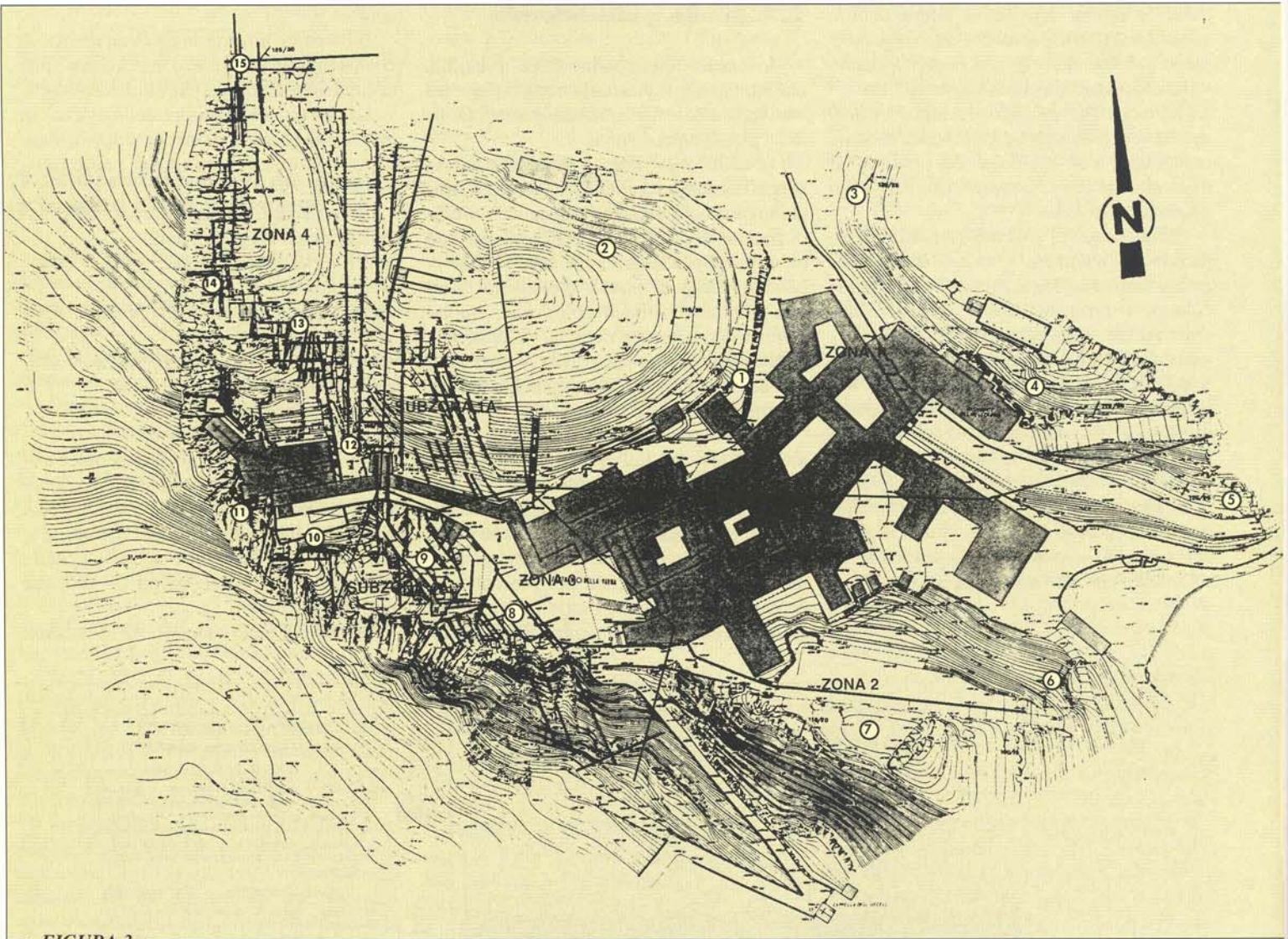


FIGURA 3

(stop) ubicate sia lungo i più significativi affioramenti nell'area circostante il Santuario, sia lungo le pareti sottostanti, indagate mediante calate a corda.

Le giaciture (immersione/inclinazione) di tutte le discontinuità misurate sono state riportate mediante rappresentazione stereografica polare su diagrammi equiareali di Schmidt e successivamente elaborate per la definizione dei principali sistemi di discontinuità e delle zone di omogeneità strutturale.

Il quadro delle osservazioni di campagna (a scala mesostrutturale) è stato completato da osservazioni macrostrutturali eseguite, come sopra riportato, mediante studio degli aerofotogrammi esistenti sulla zona d'indagine per l'individuazione delle lineazioni principali.

I diagrammi dei poli e delle densità dei poli dei piani di discontinuità sono stati riportati su reticoli equiareali di Schmidt (emisfero inferiore), relativi alle stazioni sopra citate.

Utilizzando un criterio statistico per l'analisi della frequenza sul reticolo di tutte le misure raccolte, si sono individuati i principali sistemi di discontinuità descritti in ordine di importanza:

- **St**: sistema di discontinuità impostato lungo la stratificazione. Presenta un valore di giacitura medio  $125^{\circ}/15^{\circ}$ .

- **K1**: sistema di discontinuità subverticali di trazione.

Presenta un valore di giacitura medio  $275^{\circ}/85^{\circ}$  che si mantiene relativamente costante su tutta l'area indagata, anche se talvolta con immersioni nel verso opposto ( $95^{\circ}/88^{\circ}$ ).

- **K2**: sistema di discontinuità subverticali di trazione.

Presenta un valore di giacitura medio  $185^{\circ}/85^{\circ}$  che si mantiene relativamente costante su tutta l'area indagata, anche se talvolta con immersioni nel verso opposto ( $5^{\circ}/88^{\circ}$ ).

- **K3**: sistema di discontinuità subverticali di trazione.

Presenta un valore di giacitura medio  $240^{\circ}/$

$85^{\circ}$  che si mantiene relativamente costante su tutta l'area indagata, anche se talvolta con immersione nel verso opposto ( $65^{\circ}/88^{\circ}$ ).

Tutte le discontinuità di trazione (K1, K2, K3) sono caratterizzate da giunti aperti e particolarmente continui, i maggiori dei quali si sviluppano per tutta l'altezza dell'ammasso roccioso calcarenitico.

Sono inoltre stati individuati altri sistemi di minore importanza, cioè presenti solo localmente e con minore frequenza nell'area in esame: K4 con un valore di giacitura medio  $320^{\circ}/75^{\circ}$  e K5 con un valore di giacitura media  $40^{\circ}/65^{\circ}$ .

Allo scopo di analizzare il problema in dettaglio è stata operata una definizione delle zone di omogeneità strutturale (Figura 3).

L'analisi dei diagrammi di Schmidt dei singoli stop ha permesso di definire 4 zone di omogeneità strutturale principali e 2 subzone di omogeneità strutturale delle quali si descrivono quelle interessate dai maggiori dissesti e dallo studio progettuale dei consolidamenti:

**ZONA 3:** tale zona, coincidente con lo stop 8, comprende la parte di rupe su cui è posto il piazzale della Basilica. In tale zona sono riconoscibili solo 2 dei sistemi di discontinuità subverticali di trazione ed in particolare il sistema K3, che è quello più frequente e con maggior persistenza. Il movimento dei blocchi rocciosi è evidenziato anche dall'immersione in versi opposti delle discontinuità subverticali.

I sistemi di discontinuità presenti sono:

| Sistema | Giacitura |
|---------|-----------|
| St      | 165°/15°  |
| K3      | 245°/80°  |
| K4      | 335°/75°  |

**ZONA 4:** tale zona, descritta dagli stop 10, 11, 12, 13, 14 e 15, comprende la parte occidentale della rupe, dove le pareti verticali del ciglio presentano un'altezza maggiore e dove vi sono le maggiori evidenze della suddivisione dell'ammasso in blocchi e dei movimenti che essi hanno subito. Tale zona è condizionata strutturalmente dai sistemi di discontinuità K1 e K2, caratterizzati entrambi da persistenza ed apertura molto elevate. In particolare la parete occidentale della rupe è impostata sul sistema K1.

I sistemi di discontinuità presenti sono (Figura 4):

| Sistema | Giacitura |
|---------|-----------|
| St      | 145°/15°  |
| K1      | 275°/85°  |
| K2      | 185°/85°  |
| K3      | 240°/85°  |
| K5      | 35°/65°   |

Le subzone 1A e 4A, relative ai settori del Letto di San Francesco e di Sasso Spicco sono descritte nel successivo articolo dove si illustrano al dettaglio le problematiche inerenti allo studio delle relative instabilità locali.

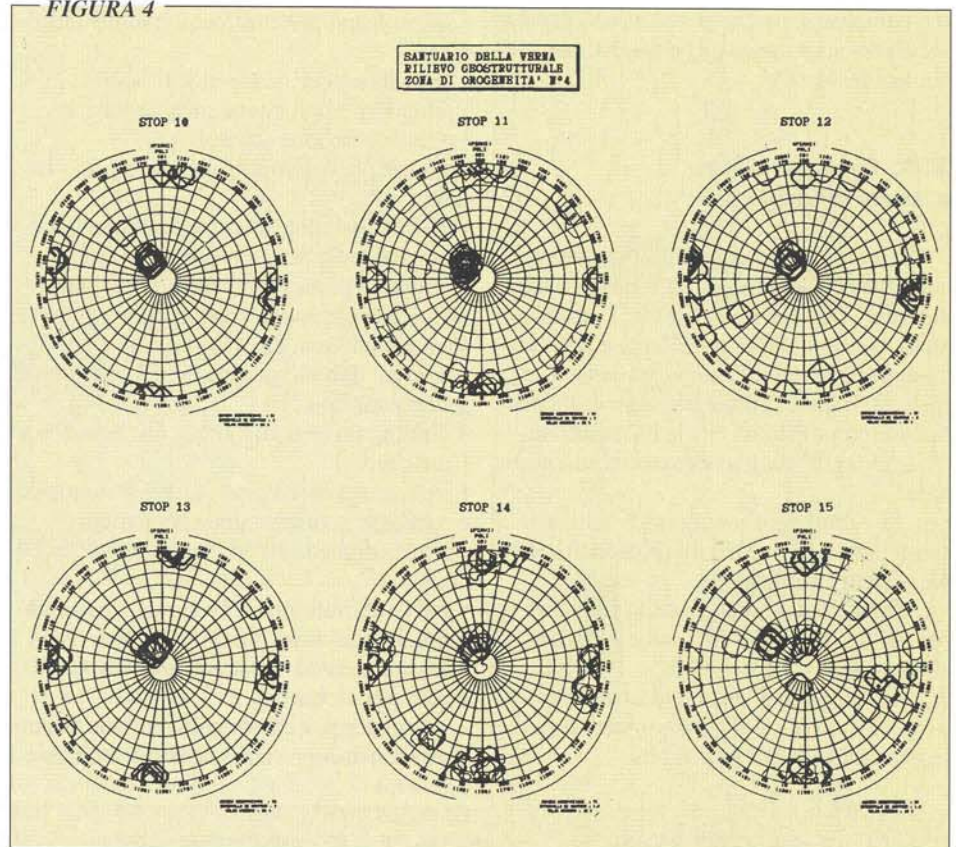
La cavità naturale denominata «Letto di S. Francesco», uno dei luoghi di maggior interesse per i fedeli che visitano il complesso del Santuario francescano della Verna, costituisce la grotta ove il Santo soleva ritirarsi in eremitaggio e preghiera.

Questa cavità si sviluppa all'interno di un potente accumulo detritico che riempie una delle principali fessure distensive che caratterizzano il quadro geostrutturale dell'ammasso calcarenitico del Monte Penna-La Verna.

La porzione della cavità frequentata dai visitatori si estende essenzialmente in direzione est-ovest con un dislivello altimetrico riferito alla quota di ingresso di circa 2.20 m.

Il resto della cavità, identificato come «il

FIGURA 4



camerone meridionale» si sviluppa invece secondo la direttrice nord-sud, con dislivelli massimi di circa 20 m, collegandosi direttamente con la fessura del «Sasso Spicco».

Nel contesto delle generali condizioni di instabilità che affliggono l'ammasso roccioso su cui sorge il Santuario della Verna anche il «Letto di San Francesco» mostra evidenti fenomenologie di degrado statico che com-

portano condizioni di pericolosità per i visitatori. Per questi motivi sono stati presi provvedimenti per interdime l'accesso e per progettare un intervento per la messa in sicurezza delle porzioni rocciose staticamente compromesse.

Infine, la grossa cavità rappresentata dal «camerone meridionale» interessa direttamente le strutture edilizie del Santuario nel

Ingresso della cavità naturale denominata «Letto di S. Francesco»



suo complesso, poichè si sviluppa al di sotto del corridoio affrescato che presenta seri fenomeni fessurativi.

### 2.3. Geognostica e monitoraggio

L'analisi geostrutturale ha permesso di individuare l'assetto e l'intensità del campo di fratture presenti in superficie; l'analisi geologico-strutturale di profondità è stata eseguita attraverso una campagna geognostica (Figura 5) studiata dagli scriventi in collaborazione con l'ISMES che la ha realizzata.

L'indagine geognostica è stata così costituita:

- n. 5 sondaggi geognostici verticali a carotaggio continuo per una profondità complessiva di 221.4 m;
- n. 2 ispezioni mediante sonda televisiva in foro di n.2 sondaggi (S.1.bis e S.2), per un totale di 99.3 m ispezionati.

Sui campioni di roccia calcarea significativi prelevati dai carotaggi sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- determinazione della massa volumica apparente;
- determinazione della velocità sonica;
- prova di compressione monoassiale;
- prova di trazione diretta;
- descrizioni macroscopiche pre e post - rottura;
- analisi mineralogico-petrografiche mediante microscopio ottico a luce polarizzata.

Sui campioni significativi di argillite prelevati dai carotaggi sono state eseguite le seguenti prove di laboratorio:

- analisi granulometrica per vagliatura e sedimentazione;
- determinazione del limite di liquidità e plasticità;
- prove triassiali con consolidazione isotropica e rottura in compressione per carico;
- prove edometriche ad incrementi di carico (IL);
- analisi diffrattometriche ai raggi x su campioni di argilla con interpretazione;
- determinazioni del contenuto in  $\text{CaCO}_3$  mediante calcimetro.

I sondaggi a carotaggio continuo hanno permesso di confermare la natura litologico-

strutturale dei materiali costituenti la placca calcarenitica e le argilliti di base ed hanno evidenziato i rapporti geometrici e stratigrafici reciproci (Figura 6).

Le prove di laboratorio, eseguite sempre dalla ISMES, hanno permesso di individuare le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche dei materiali indagati.

L'elaborazione dei dati di laboratorio ha inoltre permesso la classificazione del materiale e l'analisi delle principali caratteristiche geomeccaniche (Figura 7).

Di notevole importanza è risultata l'ispezione con sonda TV nel sondaggio S2 che ha confermato il reticolo fratturativo individuato all'esterno.

Allo scopo di valutare le caratteristiche elastiche dei materiali costituenti la rupe e per indagare gli andamenti di alcune limitate zone della rupe stessa sono state eseguite indagini geofisiche costituite da:

- carotaggio sonico nei fori S2 e S3;
- rilievo con georadar in zona grotta di S.Francesco e nei fori S2 e S1bis.

Anche queste indagini hanno confermato la notevole diversità meccanica che

FIGURA 5

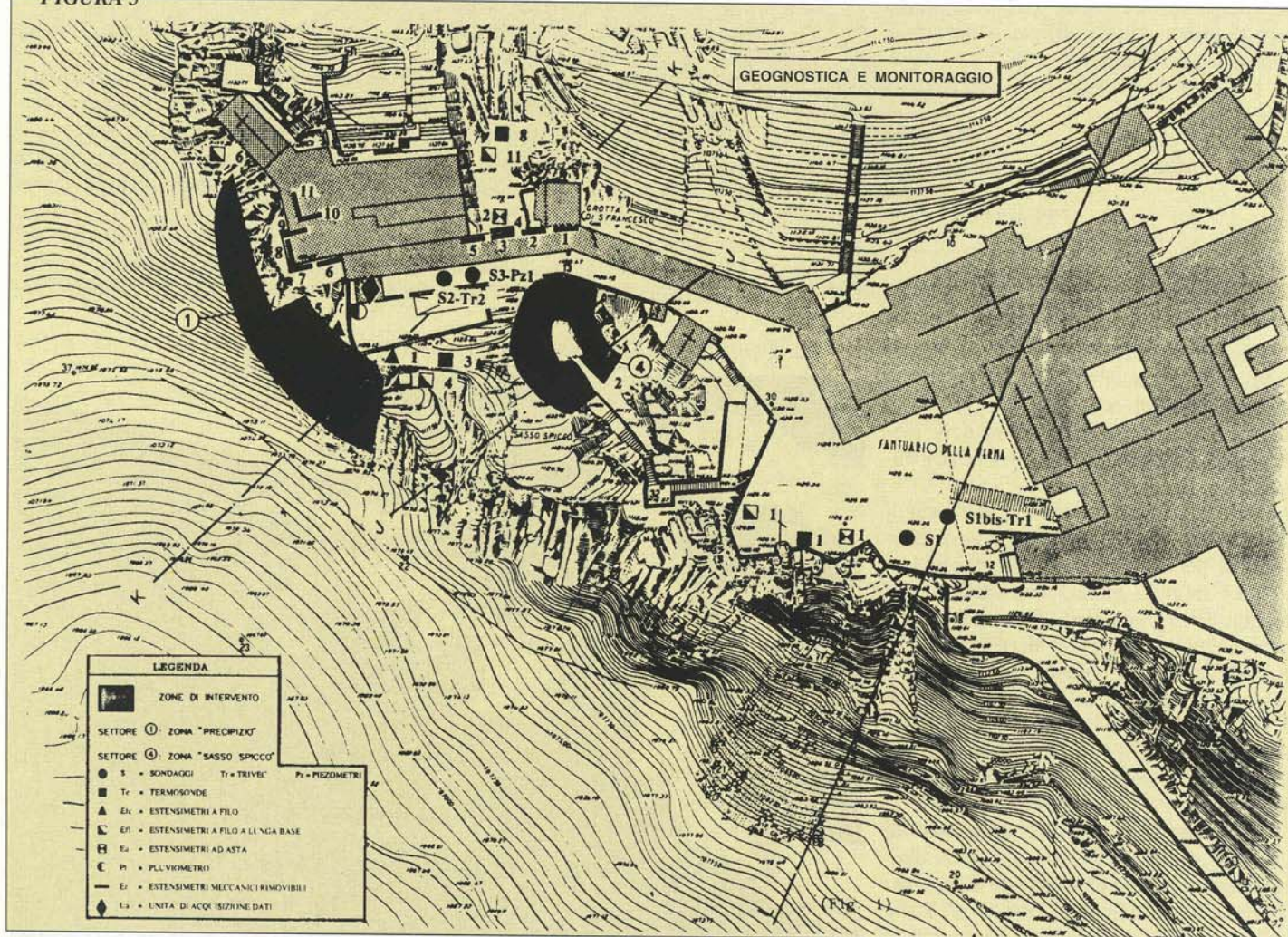
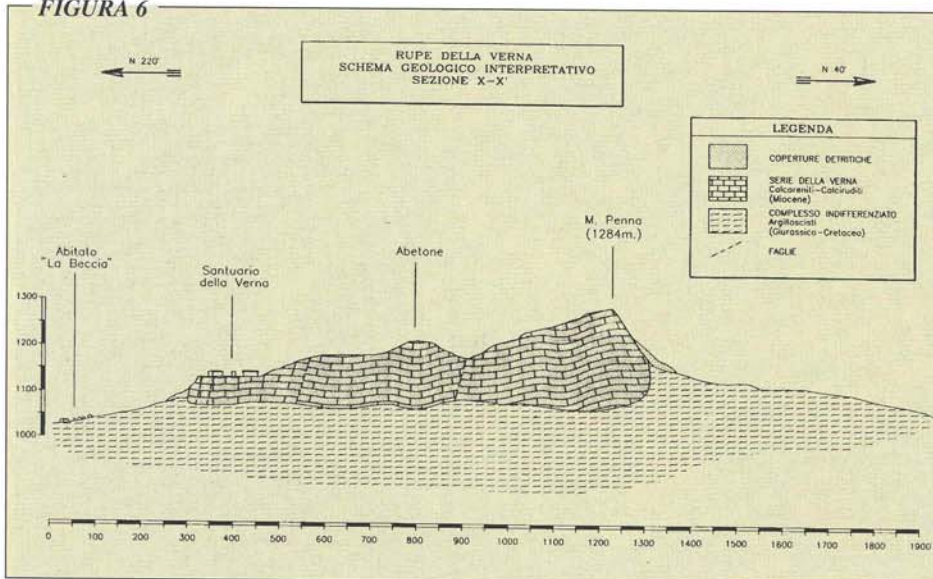




FIGURA 6



contraddistingue la placca calcarea dal substrato argillitico (Figura 8, SV3) confermando le ipotesi geomeccaniche formulate sui modelli di instabilità.

Di notevole interesse è risultato l'utilizzo della tecnica georadar che ha permesso, tramite l'emissione e la registrazione di onde elettromagnetiche riflesse, la mappatura delle cavità nel massiccio.

Per il Letto di S.Francesco, l'osservazione dei profili radar ottenuti (Figura 9, profilo verticale) ha consentito di dedurre e confermare che i terreni presenti nell'intorno della grotta risultano costituiti da una giustapposizione di grossi blocchi di roccia.

Anche dai rilievi nei fori S1 bis e S2 si sono ottenuti importanti informazioni geostrutturali. Osservando i risultati ottenuti,

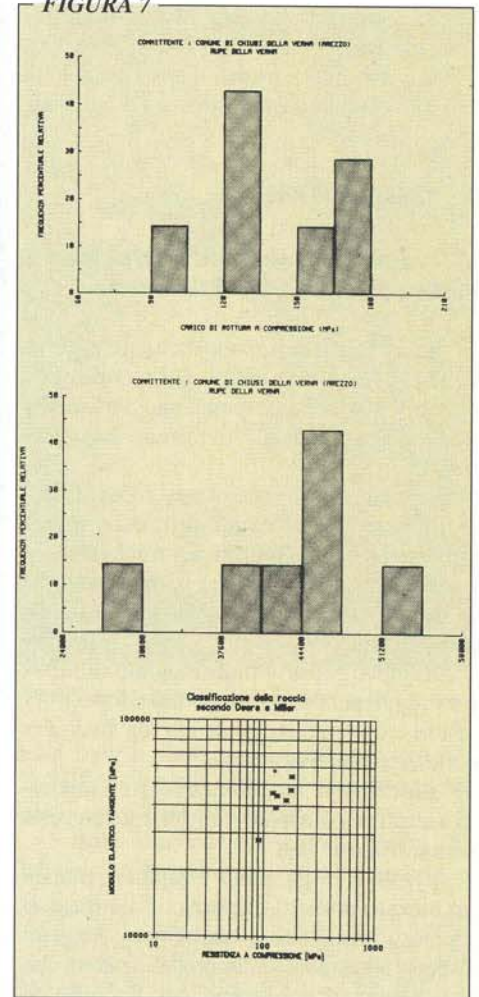
è facile dedurre la differente conformazione dei terreni attraversati dai due fori; infatti sulla sezione radar relativa al foro S1bis sono presenti molte riflessioni che documentano l'esistenza di cavità e fessure pressochè uniformemente distribuite a tutte le profondità e sino a distanze non inferiori a 10 m dall'asse del foro (massima profondità d'indagini che è stato possibile ottenere) a differenza del foro S2 che evidenzia la presenza di un terreno discretamente integro.

La campagna di indagini ha compreso inoltre la realizzazione di un complesso sistema di monitoraggio principalmente per il controllo di eventuali deformazioni.

Esso è stato realizzato con l'installazione dei seguenti strumenti:

- estensimetri a filo (monitoraggio delle fes-

FIGURA 7



sure principali) a base lunga e corta;

- estensimetri a barra (fessurimetri) (monitoraggio e lesioni nelle strutture murarie del Santuario);
- tubi estensoinclinometrici TRIVEC (monitoraggio profondo nei fori di sondaggio);
- piezometri (monitoraggio idrogeologico) nei fori di sondaggio;
- idrofoni (monitoraggio sismico).

Tutti gli strumenti, realizzati e posizionati dalla ISMES, sono stati collegati con una rete di acquisizione ed elaborazione dati.

FIGURA 8

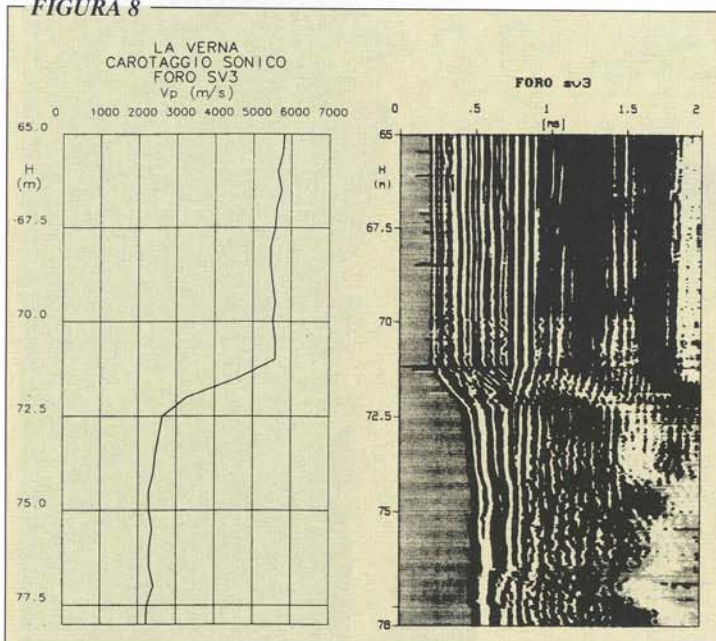
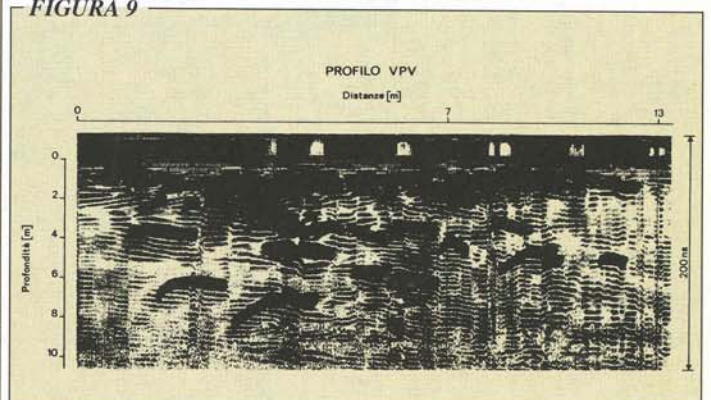


FIGURA 9



Il rilevamento dei dati, in automatico, è tutto' oggi operativo. Nella *Figura 5* si riporta l'ubicazione degli strumenti posizionati nella parte più centrale dell'area del Santuario.

## 3. DIAGNOSI

### 3.1. Parete rocciosa sottostante la Cappella delle Stimmate

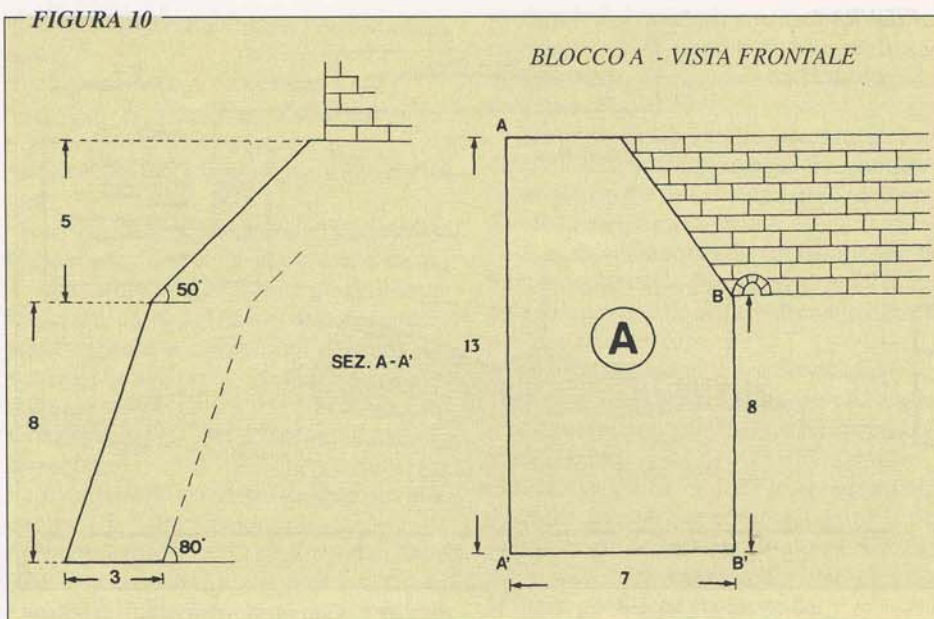
La parete rocciosa sottostante la Cappella delle Stimmate presenta segni manifesti di precaria stabilità che ponevano seri dubbi sulla sicurezza della sovrastante struttura muraria.

In particolare è stato osservato un blocco di rilevanti dimensioni ad oggi quasi completamente isolato da fratture naturali antiche e recenti, e la cui condizione statica risultava, anche ad un semplice esame visivo, ormai prossima al collasso.

Il rilievo geostrutturale eseguito sulla parete ha permesso l'individuazione di 3 settori caratterizzati, ciascuno, da analoghe condizioni geomecniche:

**Blocco A:** la sua geometria è stata modellata attraverso l'esame dei dati rilevati sulla parete (*Figura 10*);

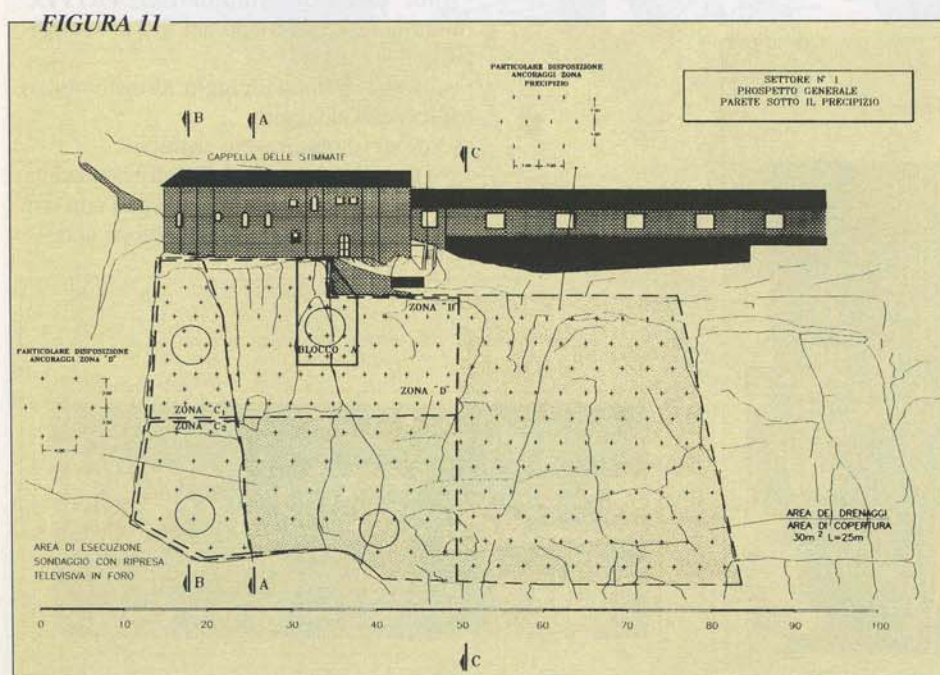
**ZONA B** (*Figura 11*): è caratterizzata da un elevato numero di porzioni d'ammasso roccioso in aggetto e comunque sporgenti rispetto al restante sviluppo della parete che si è originata nel tempo per il crollo di sottostanti blocchi rocciosi. Le masse descritte sono soggette a possibili collassi per crollo e/o ribaltamento in particolare per le elevate spinte criostatiche che si generano

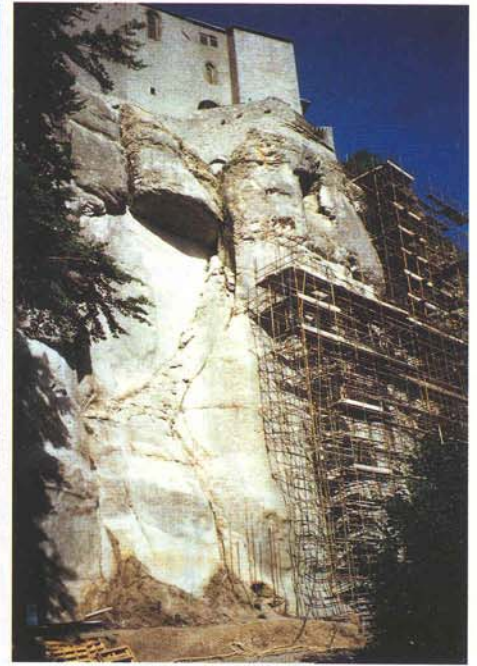
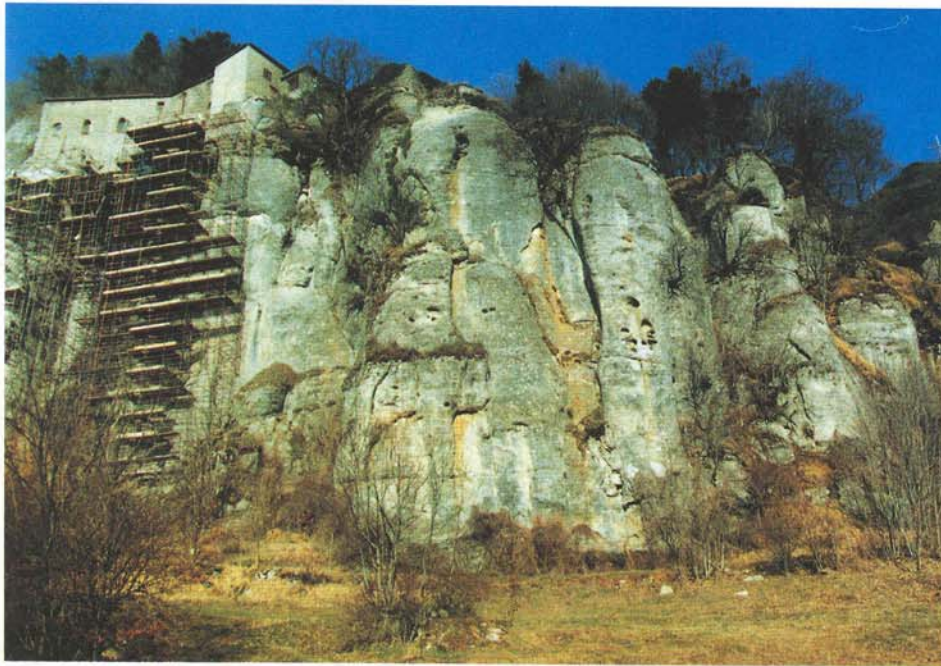


all'interno del reticolo fratturativo nei mesi invernali;

**ZONA C** (*Figura 11*): tale zona può essere soggetta a rotture delle lastre rocciose isolate dalle discontinuità a causa di carichi concentrati, momenti flettenti o, nei casi limite, rotture per carichi di punta. In particolare, la presenza sistematica di discontinuità conferisce all'ammasso o ai singoli prismi rocciosi una resistenza decisamente minore rispetto a quella dei campioni intatti.

(a destra) Particolare della «fessura principale» sotto il corridoio delle Stimmate.





(a sinistra) Parete rocciosa adiacente al Precipizio. (a destra) Parete rocciosa sotto la Cappella delle Stimmate con particolare del blocco in oggetto.

### 3.2. Parete rocciosa adiacente al cosiddetto « precipizio »

Il settore considerato appartiene alla parete esposta a Sud-Ovest e si sviluppa sotto

l'edificio della Cappella delle Stimmate ed il piazzale antistante il corridoio; si estende sulla destra (verso Sud) dell'area già considerata per  $\approx 1500 \text{ m}^2$  (Figura 11).

L'area in oggetto è interamente compresa

nella zona di omogeneità strutturale n. 4.

All'interno del settore 1 può essere eseguita la seguente differenziazione:

- **zona alta:** corrisponde alla fascia alta della parete, è caratterizzata da numerose por-

FIGURA 12

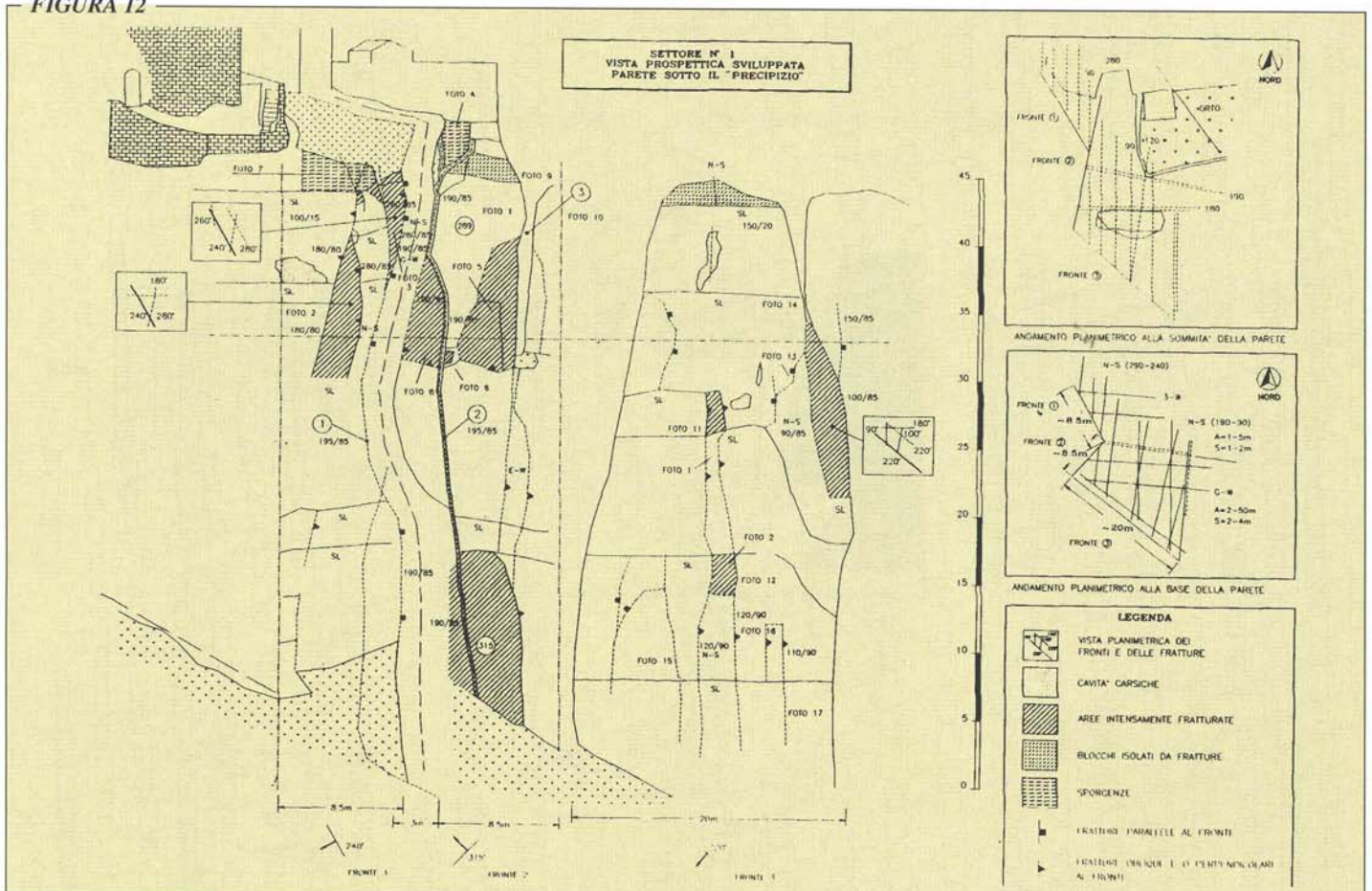
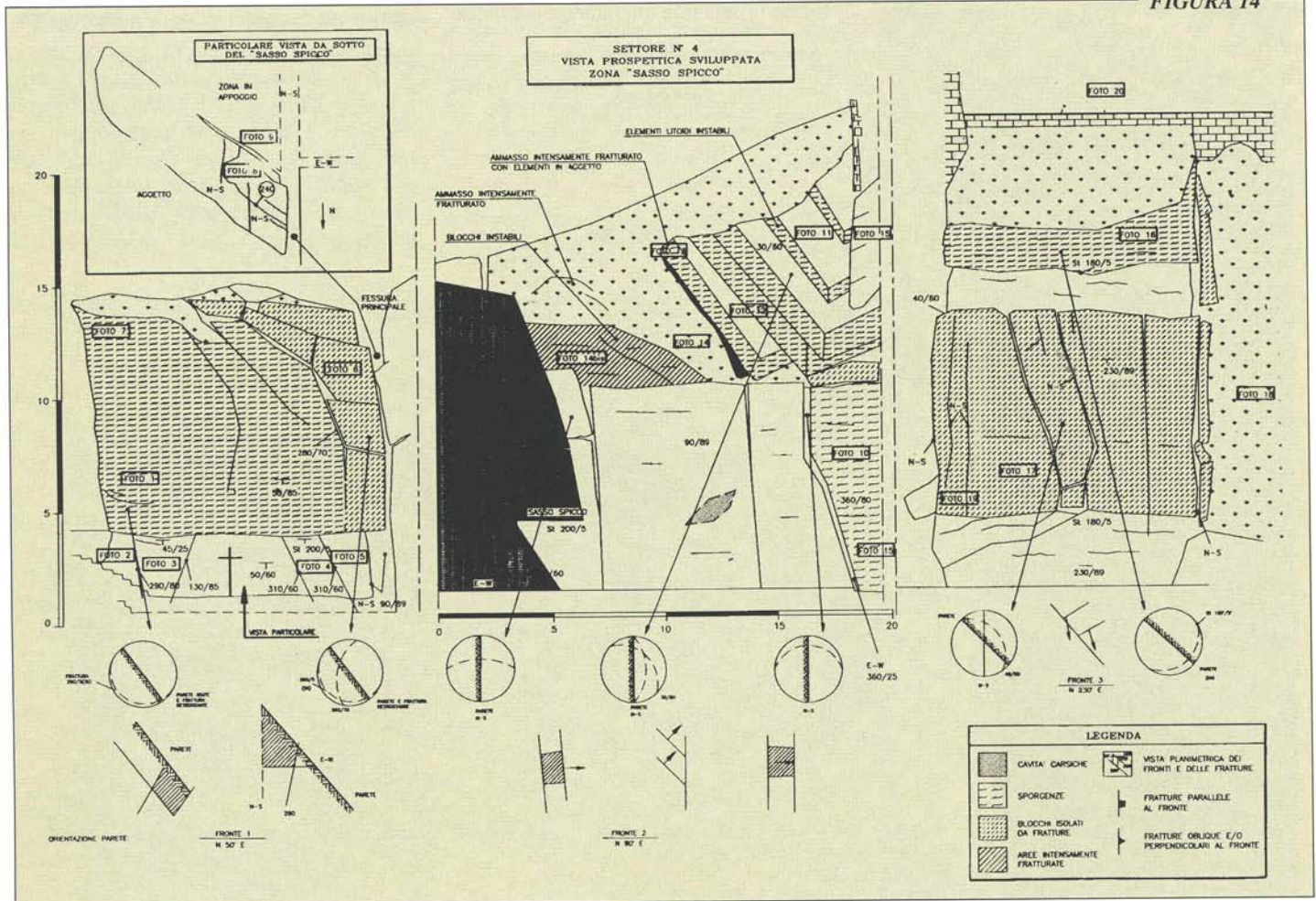


FIGURA 13



FIGURA 14



zioni d'ammasso roccioso in aggetto o comunque sporgenti rispetto al restante sviluppo della parete che si è originata nel tempo per il crollo dei sottostanti blocchi rocciosi. Le masse descritte sono potenzialmente soggette a collassi per crollo e/ o ribaltamento che possono generarsi all'interno del reticolo fratturativo.

• **zona bassa:** corrisponde alla fascia bassa della parete ed è caratterizzata da fenomeni di rottura della lastre rocciose isolate dalle discontinuità naturali. I fenomeni di rottura possono essere causati da carichi concentrati, momenti flettenti o, nei casi limite, da carichi di punta.

La particolare complessità di tale area ha reso necessario studiarne al dettaglio morfologia, struttura e fenomeni di instabilità, evidenziati in *Figura 12*.

### 3.3. Settore dell'anfratto naturale del Sasso Spicco

Risulta costituito dalle pareti che circondano l'anfratto originato da una grossa fessurazione nell'ammasso roccioso e che viene denominato Sasso Spicco.

Le pareti che circondano tale corrido-



*Pilastri e lastre rocciose sulla parete del «Precipizio».*

io si sviluppano per un'area complessiva di  $\approx 560 \text{ m}^2$ . Anche in questo caso è stato necessario uno studio dettagliato delle condizioni morfologiche e strutturali del sito per verificarne le attuali condizioni di stabilità e prevederne l'evoluzione statica (*Figure 13, 14*).

### 3.4. Settore del Letto di San Francesco

Lo studio dell'area ipogea e superficiale intorno al «Letto di San Francesco» si è basato sull'esecuzione di un rilievo geostrutturale con misurazione sistematica della giacitura di tutte le discontinuità presenti nell'ammasso.

Ciò ha permesso di individuare varie tipologie di fenomeni deformativi in relazione ai diversi meccanismi di coazione esistenti tra i sistemi fessurativi e l'orientazione delle pareti libere che delimitano la cavità (*Figura 15*).

E' importante precisare che quando si parla di fenomeni deformativi si vogliono intendere tutte quelle deformazioni apprezzabili da un semplice esame visivo e che si sono già espletata in epoche storiche

**FIGURA 15**

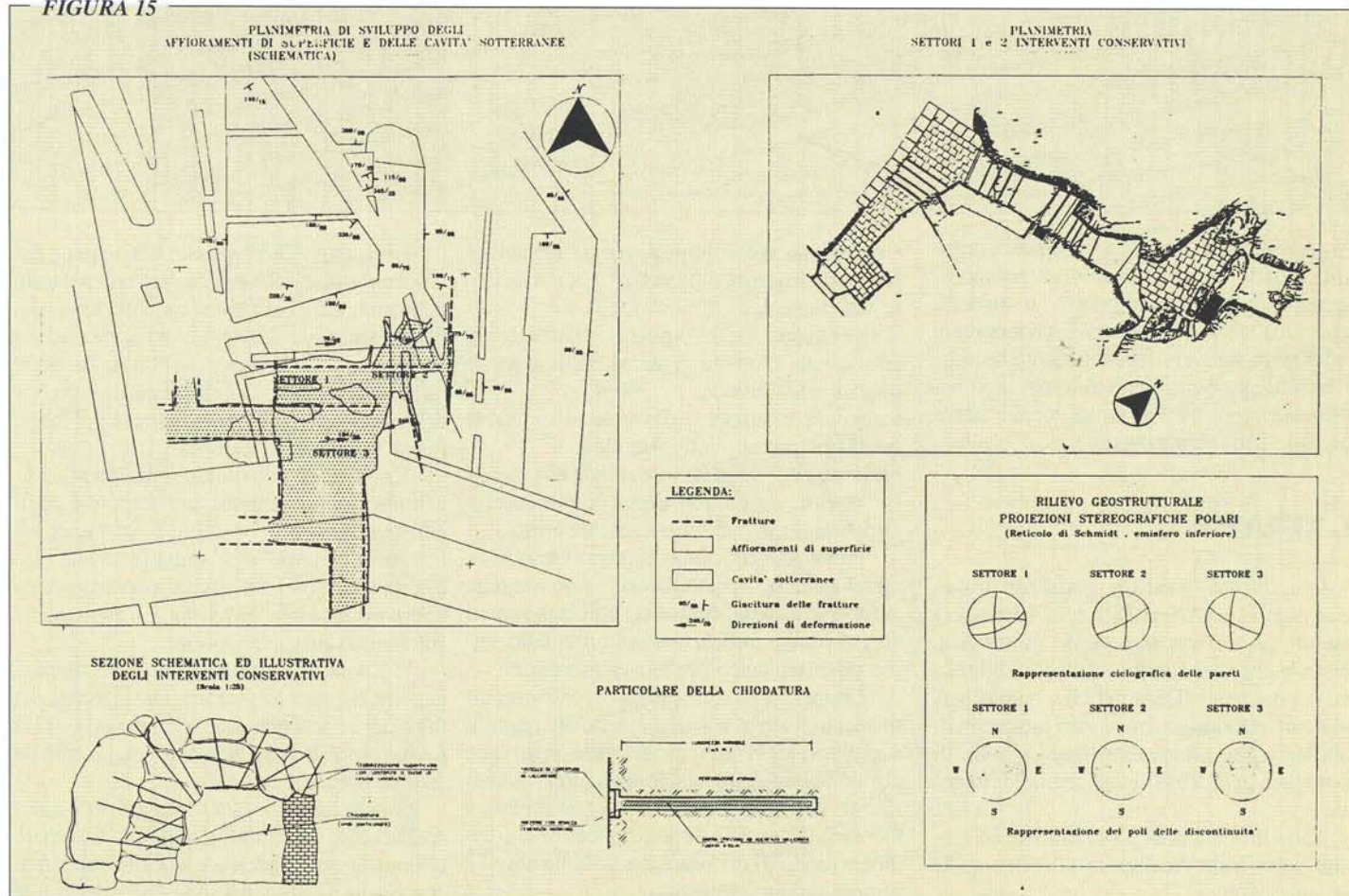
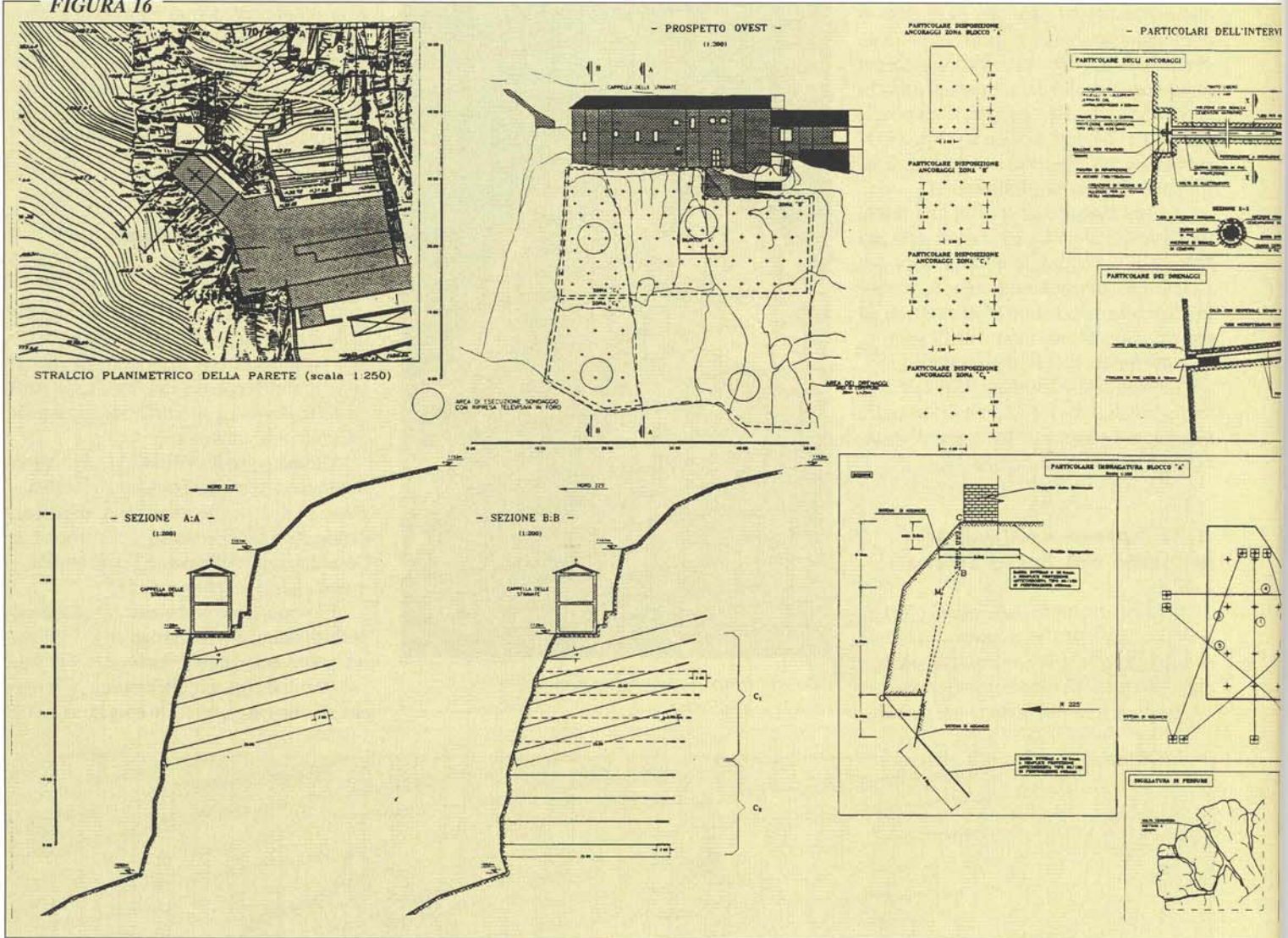


FIGURA 16



e/o protostoriche, non si parla quindi di instabilità attuali ma di condizioni di equilibrio raggiunte nel tempo a prezzo di evidenti deformazioni. L'evoluzione di tali fenomeni è rilevabile attraverso un sofisticato sistema di monitoraggio nel corso di tempi ragionevolmente brevi ovvero tempi tecnici per il controllo della sicurezza del sito.

## 4. TERAPIA

L'accurato studio geostrutturale-geomeccanico (ANALISI) e la successiva fase di identificazione delle geometrie, cinematismi ed evoluzione delle instabilità in atto o potenziali (DIAGNOSI), hanno permesso di individuare i necessari interventi di bonifica e consolidamento sia in termini di tipologia e geometria sia in termini di intensità.

Tutte le operazioni programmate ed eseguite sono state finalizzate ad ottenere le seguenti azioni:

- rimozione dei volumi di roccia instabili e potenzialmente soggetti a crolli e/o scivolamento;
- rimozione delle spinte idrostatiche, criostatiche e quelle generate dagli apparati radicali nelle fessure;
- cucitura e supporto dei volumi di scarsa entità non prossimi all'instabilità;
- intasamento delle fessure principali;
- contrasto e cucitura dei grossi volumi rocciosi cinematicamente e staticamente critici.

Previa realizzazione di un ponteggio in tubi d'acciaio, la prima azione è stata eseguita attraverso un opportuno disgiungimento delle pareti eseguito sulle indicazioni scaturite dallo studio geomorfologico-strutturale delle stesse.

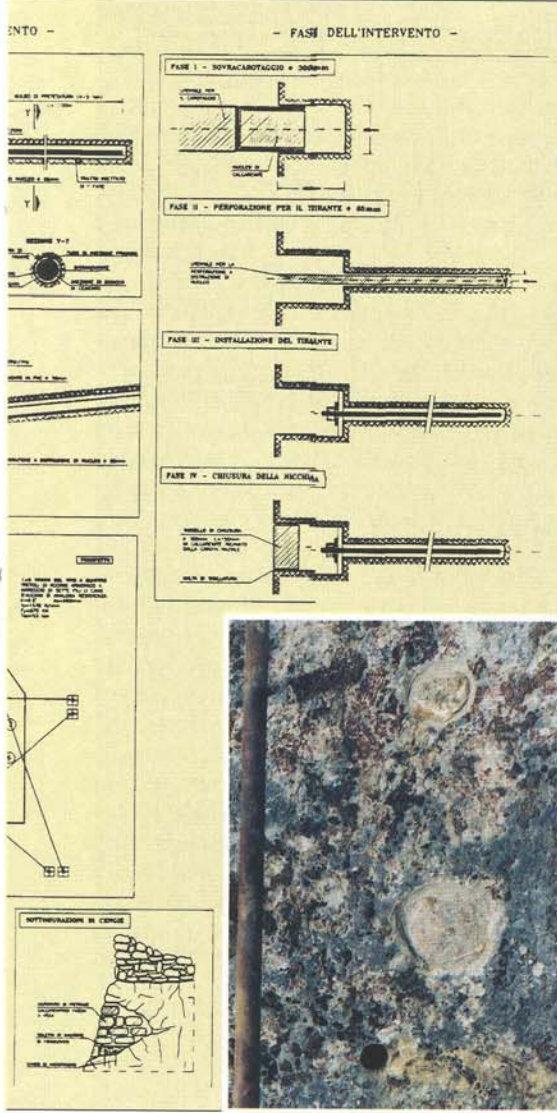
Le operazioni di disgiungimento, spesso eseguite manualmente o con l'ausilio di martelli demolitori leggeri e/o cunei e leve, sono state mirate ad eliminare tutte le potenziali cause di rischio per le maestranze e per la pubblica incolumità derivate da solidi rocciosi di incipiente crollo. Il disturbo arrecato alle pareti è sempre stato minimizzato.

E' risaputo che l'azione dell'acqua e del ghiaccio è particolarmente deleteria nel caso della stabilità di ammassi rocciosi fessurati. Localmente tale azione «dirompente» risulta aggravata dallo sviluppo nelle fessure delle radici di alberi secolari, che, durante la crescita hanno sviluppato notevoli pressioni lungo le pareti della discontinuità.

Un'efficace riduzione degli apparati radicali più compromettenti, previo parere degli enti competenti in materia di salvaguardia forestale, ha permesso, unitamente alla realizzazione di tubi drenanti di opportuno diametro e disposizione, di ridurre fortemente le spinte in essere nelle fessure.

L'azione di supporto a volumi rocciosi aggettanti è stata eseguita tramite intasamento di boiaccia e sottomurazione ogni qual volta la fessurazione isolava prismi rocciosi tanto da farne mancare il piede.

Una volta osservata l'integrità del volume roccioso, si decideva, per non disturbare ulteriormente la parete, di bloccare tali solidi con opere di supporto sottostanti realizzate



con copertura di materiali tali da minimizzarne l'impatto visivo e mimetizzarsi con la roccia circostante.

In analoghi casi è stato proceduto all'ancoraggio di tali solidi rocciosi, la cui integrità e stabilità ne rendeva opportuna la conservazione, con realizzazione di chiodature corte realizzate con mezzi leggeri capaci di ridurre fortemente il disturbo arrecato dalle vibrazioni innescate dagli utensili di perforazione.

Anche in questo caso l'impatto ambientale è stato minimizzato coprendo la testa dei chiodi con una spalmatura di malta ricavata con gli stessi materiali presenti in sito.

Lo studio geostrutturale di superficie e in foro (con sonda TV) ha evidenziato la presenza di estese fessure con caratteristiche di apertura decisamente elevate (dell'ordine decimetrico) che, nell'ambito delle condizioni generali di instabilità delle pareti rocciose, costituiscono sede preferenziale di circolazione idrica e quindi forti spinte idrostatiche su prismi rocciosi (prevalentemente a forma di pilastri) di dimensioni almeno

decametriche. La necessità di intasare completamente le fessure principali è dettata dall'assoluta esigenza di ricostruire la continuità dell'ammasso roccioso lungo tali direttrici senza peraltro appesantire le masse in disequilibrio o, ancora peggio, inficiarne la stabilità apportando pressioni naturalmente non preesistenti (pressioni dovute al peso di un conglomerato cementizio o di una boiaccia).

Tali esigenze, ed in particolare quelle di ottenere un'adeguata continuità meccanica lungo le fessure, necessaria per un buon funzionamento a taglio-trazione degli elementi di rinforzo principali (barre d'acciaio), hanno portato ad eseguire gli intasamenti con un speciale conglomerato cementizio alleggerito studiato per l'occasione. Esso è costituito da una miscela di boiaccia cementizia con argilla espansa in ragione di un rapporto tra i suddetti componenti di 2 qli/lmc per un impasto di peso di volume pari a  $\approx 0.4 \div 0.6$  ton/mc.

Il contrasto e la cucitura dei grossi prismi rocciosi le cui caratteristiche geostrutturali e statiche predispongono all'instabilità viene eseguito tramite tirature passive con barre d'acciaio a protezione anticorrosiva.

In particolare si è ricorsi all'utilizzo di

*Nella foto a lato: copertura con tassello di mascheramento della piastra del tirante*

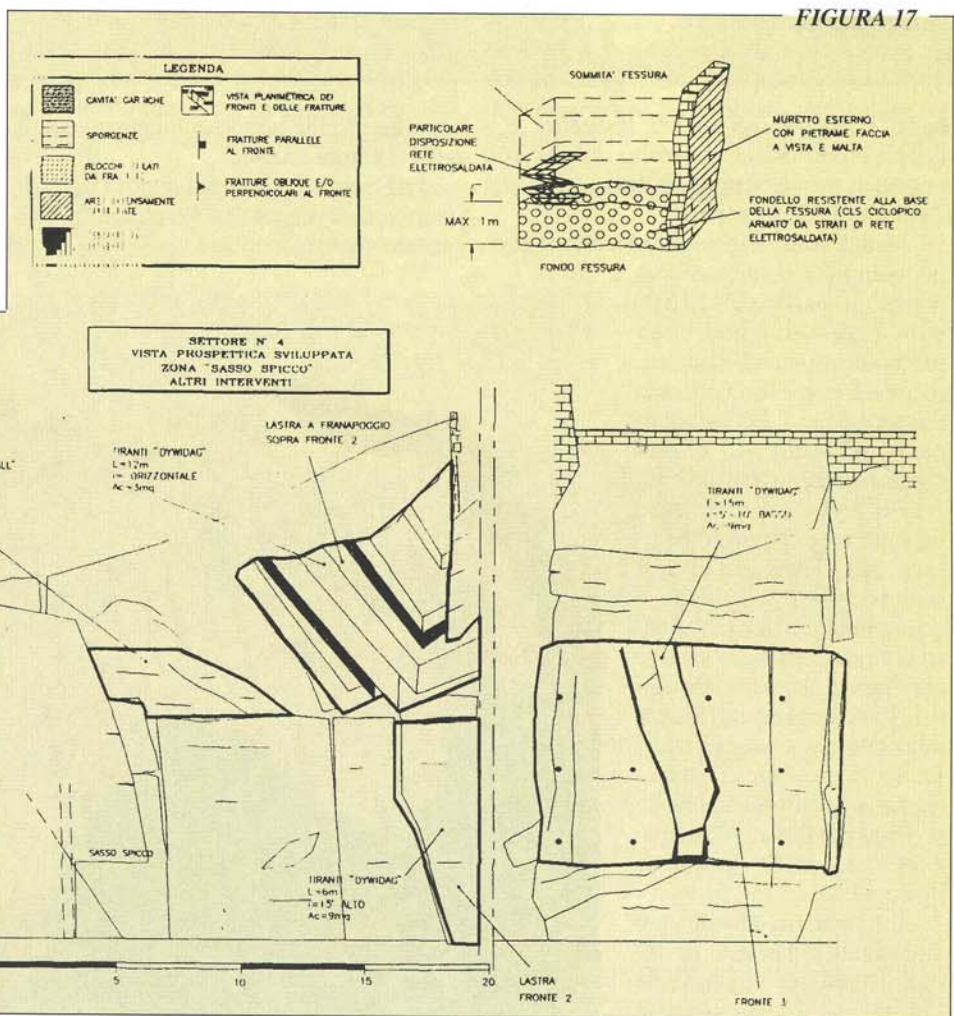
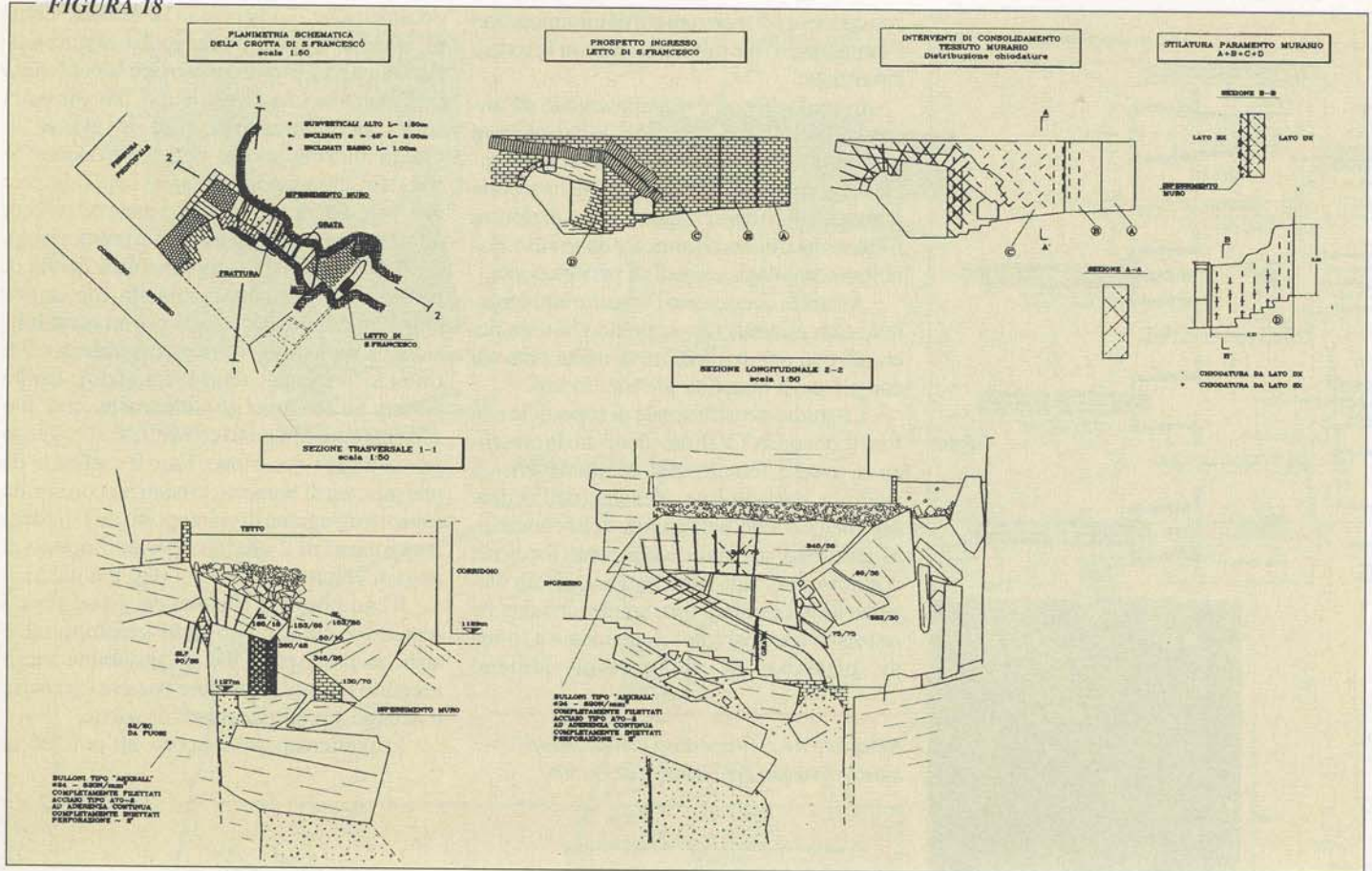


FIGURA 18



barre di acciaio ad elevata resistenza e a doppia protezione anticorrosiva ottenuta con guaine in pvc iniettate di boiaca cementizia e confezionate in cantiere.

I tiranti utilizzati possono ritenersi ad azione completamente passiva poichè, nei casi in cui si è ritenuta necessaria una certa precompressione all'ammasso roccioso, essa è stata ottenuta con un'azione di 2-3 ton applicata con chiavi dinamometriche da cantiere.

Per assicurare un comportamento a taglio-trazione efficace delle barre d'acciaio è stato iniettato il foro anche in corrispondenza del tratto libero di tirante. Laddove se ne è ravvisata la necessità tale tratto non è stato eseguito, assicurando all'intera lunghezza del tirante un ancoraggio alla roccia pari a quello generalmente previsto per il tratto di fondazione (vedi strallo del «Sasso Spicco»).

Infine il mascheramento ambientale delle teste dei tiranti è stato ottenuto attraverso l'inserimento delle stesse in

apposite nicchie perforate e coperte con la relativa carota estratta.

Le Figure 16, 17, 18 riportano in sintesi le informazioni progettuali relative ai siti precedentemente individuati.

*Vista panoramica della parete dopo l'intervento di mascheramento*









(sopra) Foto 1 - Particolare di una frattura di trazione sulla parete rocciosa  
(a lato) Foto 2 - Blocco in aggetto sotto la Cappella delle Stimate

frattura ai bordi secondo piani subverticali e subortogonali ai piani di stratificazione che giacciono pressochè orizzontali.

La genesi delle fratture subverticali è da riferirsi ad un sistema cosiddetto «Andersoniano» in cui nell'elissoide degli sforzi si può individuare la tensione principale massima subortogonale ai piani di strato suborizzontali.

Tali fratture, tra loro subortogonali, evolvono, col procedere del rifluimento delle argilliti di base, a fessure aperte per sforzi prevalentemente di trazione.

Infatti, al bordo della lastra calcarea, il rifluimento e cedimento del substrato argilloscisto provoca stati tensionali di trazione-taglio lungo i piani subverticali di debolezza preesistenti (Foto 1).

La ridotta se non nulla resistenza a trazione delle fratture permette un rapido allontana-

FIGURA 3

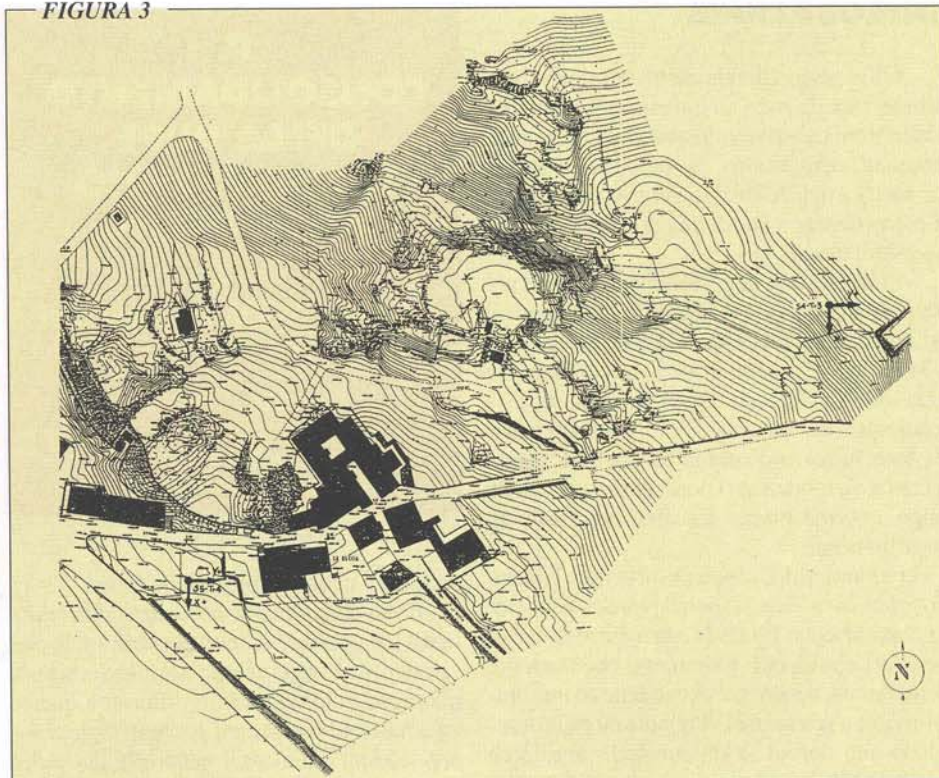
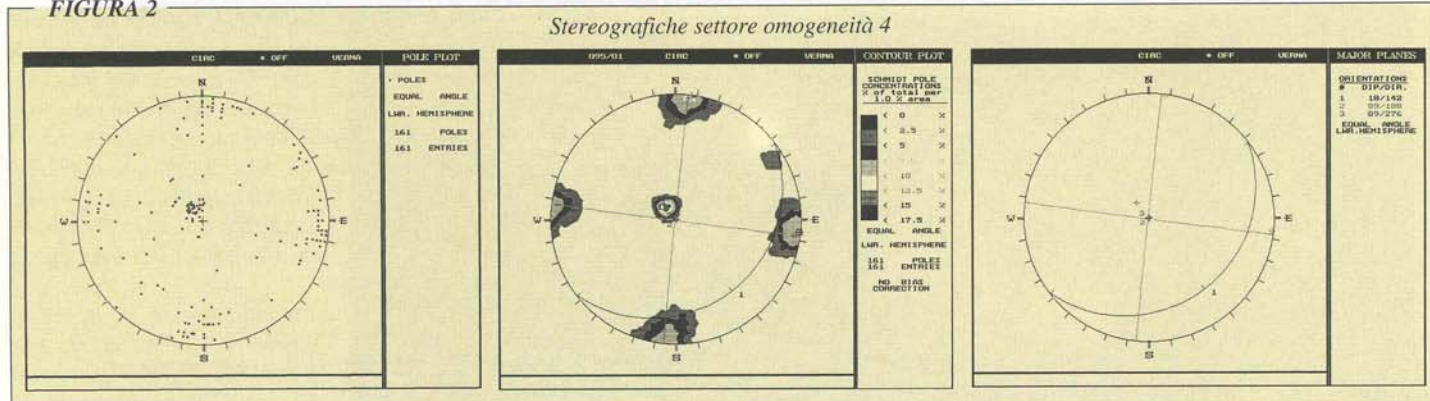


FIGURA 2

Stereografiche settore omogeneità 4



mento dei labbri e la progressiva separazione di pilastri e diedri rocciosi isolati dalle discontinuità naturali.

Una semplice lettura visiva delle rappresentazioni stereografiche del settore di omogeneità strutturale n° 4 (Figura 2), rappresentativo dei concetti appena descritti, permette di evidenziare:

- la suborizzontalità della stratificazione il cui piano medio immerge N 142° con 18° di inclinazione;
- la subverticalità dei piani di fessurazione immergenti rispettivamente 187°/89° e 275°/89°, tra loro subortogonali.

La presenza del reticolo fessurativo innanzi descritto ed il reciproco rapporto tra i differenti piani di fessurazione, costituiscono le basi per l'instaurarsi di ulteriori fenomeni deformativi così descrivibili:

- crollo di lastre o diedri rocciosi sia dalla sommità di pinnacoli isolati, sia dalle porzioni inferiori di settori aggettanti; quest'ultimo caso, testimoniato dagli spettacolari blocchi sospesi (cfr. blocco A sul precipizio e «Sasso Spicco»), trae origine dal distacco di roccia da un piano di strato superiore che rimane in sito come tetto in strapiombo (Foto 2);
- scivolamento e crollo di prismi rocciosi lungo un piano di discontinuità disposto a franapoggio lungo la parete;
- ribaltamento e crollo di prismi rocciosi per spinte agenti lungo una frattura subverticale riempita d'acqua, di ghiaccio o da apparati radicali in espansione.

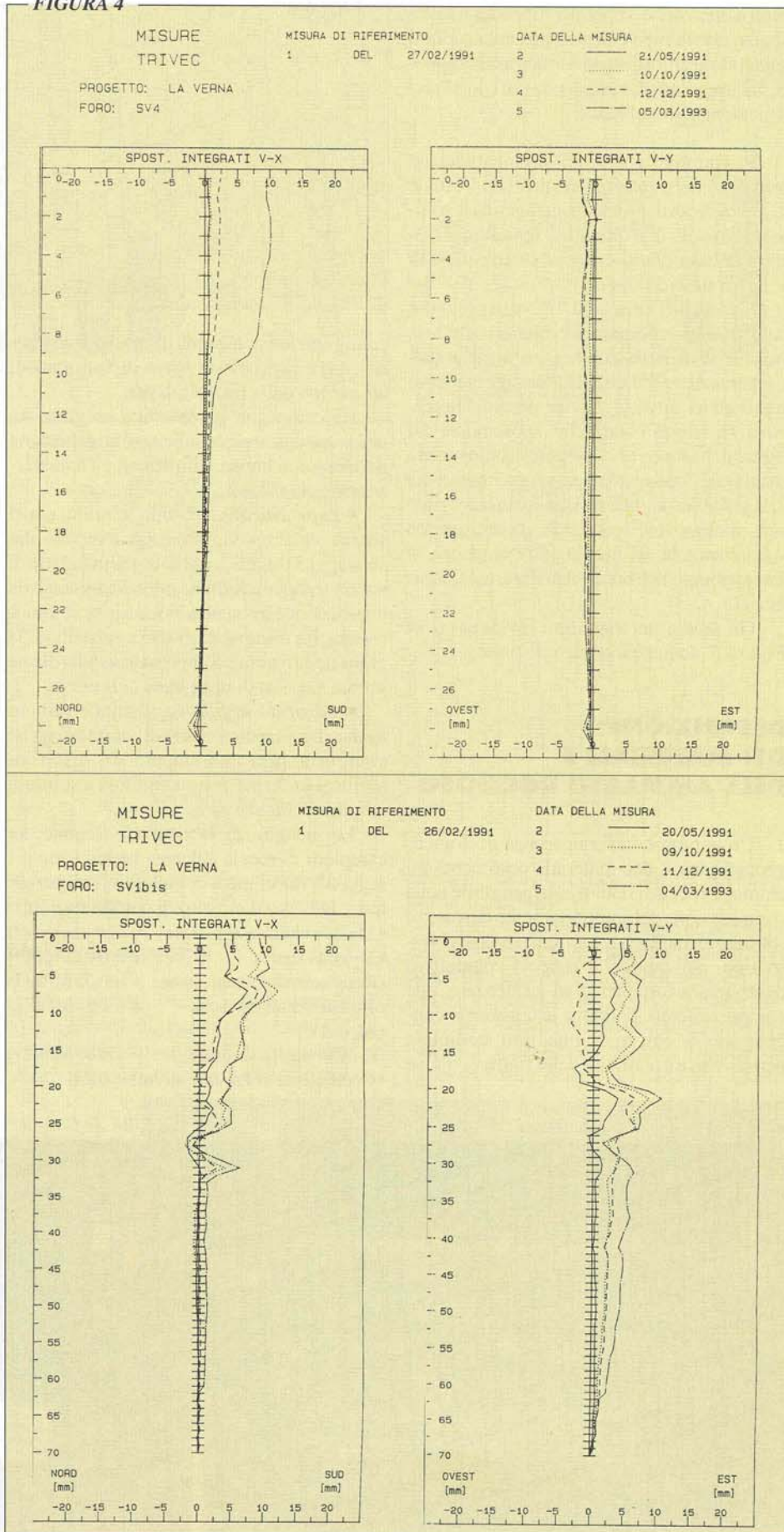
Facendo un passo a ritroso e riportando l'attenzione sul fenomeno gravitativo che interessa le argilliti di base, il monitoraggio del versante meridionale fino all'abitato de La Beccia, ed in particolare lungo la sezione rappresentativa (Figura 1), ha evidenziato, attraverso le letture dell'inclinometro S4 e S1bis, che (Figure 3,4):

- l'inclinometro S4, posizionato a poco più di un centinaio di metri ad est dell'abitato de La Beccia (Figura 3), la cui profondità risulta pari a 30 m interamente nelle litologie argillitiche della base, mostra una graduale deformazione del versante meridionale alla rupe in grado di sviluppare, nell'arco di ≈ 2 anni (Febbraio '91 - Marzo '93), uno spostamento verso valle di ≈ 10 mm in direzione concorde alla massima pendenza, ovvero ≈ sud-sud-ovest. E' interessante notare che il tasso di deformazione (≈ 0.5 mm/mese) è quello ricorrente nei creep appenninici.

La deformazione interessa un piano di scivolamento posto a ≈ 10 m dal p.c.;

- l'inclinometro S1 bis, posizionato sul piazzale antistante il Santuario della Verna, da sempre interessato dalle massime deformazioni e dai dissesti più gravosi, mostra similitudini molto spinte; deformazioni pressochè analoghe in intensità e periodo,

FIGURA 4



profondità molto superiori dipendenti dalla sbalzo che la rupe calcarea presenta sopra il substrato argilloscistoso. La deformata appare più irregolare in virtù di una più complessa situazione geolitologica.

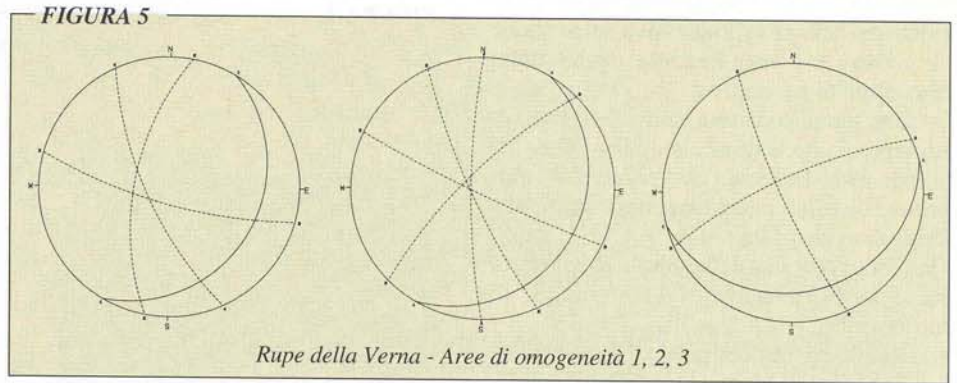
In entrambi i casi gli strumenti hanno segnalato deformazioni verticali dell'ordine di 2-3 mm, corrispondenti, paragonate a quelle orizzontali, alla direzione zenitale del dissesto di base che si sviluppa su un pendio di  $\approx 12^\circ$  di inclinazione.

La conferma della progressiva deformazione perimetrale che interessa la rupe della Verna viene suggerita anche dall'osservazione dei dati giaciture del reticolo fratturativo lungo la sezione precedente (Figura 1); si può notare che, spostandosi dal centro della rupe verso il settore di omogeneità strutturale 3, passando per la zona intermedia 2, la giacitura degli strati subisce una progressiva inclinazione passando da un assetto suborizzontale ad una leggera tendenza al franappoggio sul bordo della scarpata meridionale.

Gli stessi stereogrammi, evidenziati in Figura 5, denunciano tale rotazione.

### DESCRIZIONE DEI MATERIALI E DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Un'approfondita conoscenza geologico-meccanica dei materiali costituenti gli ammassi rocciosi risulta indispensabile nella comprensione del comportamento del mezzo sottoposto a sollecitazioni tensionali di diverso tipo, per quanto il reticolo fratturativo contribuisca fortemente ad influenzare tale comportamento. Laddove le tensioni si concentrano a causa di una non completa pervasività e continuità delle fratture, nuove



configurazioni tensionali di equilibrio possono essere raggiunte a spese di fessurazioni all'interno della roccia integra.

La campagna geognostica eseguita sia sulla rupe calcarea sia sulle argilliti di base, ha permesso una buona definizione e caratterizzazione dei mezzi:

- **rupe calcarea:** risulta costituita, nel settore di ammasso roccioso indagato dai sondaggi S1 bis e S2, da rocce sedimentarie di natura terrigena formate prevalentemente da una frazione carbonatica bioclastica e, in minor misura, da frammenti di rocce cristalline; la grana della roccia è compresa tra quella di una sabbia e quella di una ghiaia (Figura 6);

- **substrato argillitico:** risulta costituito da una roccia sedimentaria di natura terrigena composta prevalentemente da materiali argillosi in forma di limi argillosi a struttura scagliosa (Figura 7).

Le indagini di laboratorio eseguite sui campioni di roccia calcarea hanno fornito i seguenti valori medi complessivi (tra parentesi è indicato il numero di determinazioni).

- Massa volumica apparente = 2.64 ton/mc (9)
- Velocità sonica = 5510 m/sec (9)
- Resistenza alla compressione = 140.35 MPa (7)
- Resistenza alla trazione = 2.57 MPa (2)
- Modulo di deformabilità secante = 42860 MPa (7)
- Coefficiente di Poisson secante = 0.24 (7)

- Modulo di deformabilità tangente = 42990 MPa (7)

Le determinazioni sono state effettuate secondo le raccomandazioni ISRM.

Come si evince dai valori indicati, la calcarenite risulta un materiale dalle elevate caratteristiche di resistenza e deformabilità e quindi scarsamente incline ad essere interessato, a livello di campione intatto, da rotture di qualsiasi tipo.

Sui materiali argillitici di base sono state eseguite le consuete determinazioni di laboratorio terre che hanno permesso di individuare i seguenti parametri essenziali (medi complessivi):

- Massa volumica umida = 2.150 ton/mc
- Contenuto d'acqua = 17.5 %
- Limite liquido = 53 %
- Limite plastico = 19 %
- Indice plastico = 34 %
- Denominazione granulometrica AGI = argilla con limo debolmente ghiaiosa (debolmente sabbiosa)
- Angolo d'attrito (TX CIU) =  $19^\circ$
- Tensione di preconsolidazione (Edo) = 1 MPa

La particolarità più importante dell'argillite nei confronti del meccanismo di dissesto in atto risulta il suo contenuto naturale d'acqua prossimo al limite plastico, il quale evidenzia l'elevata tendenza del materiale ad entrare nel

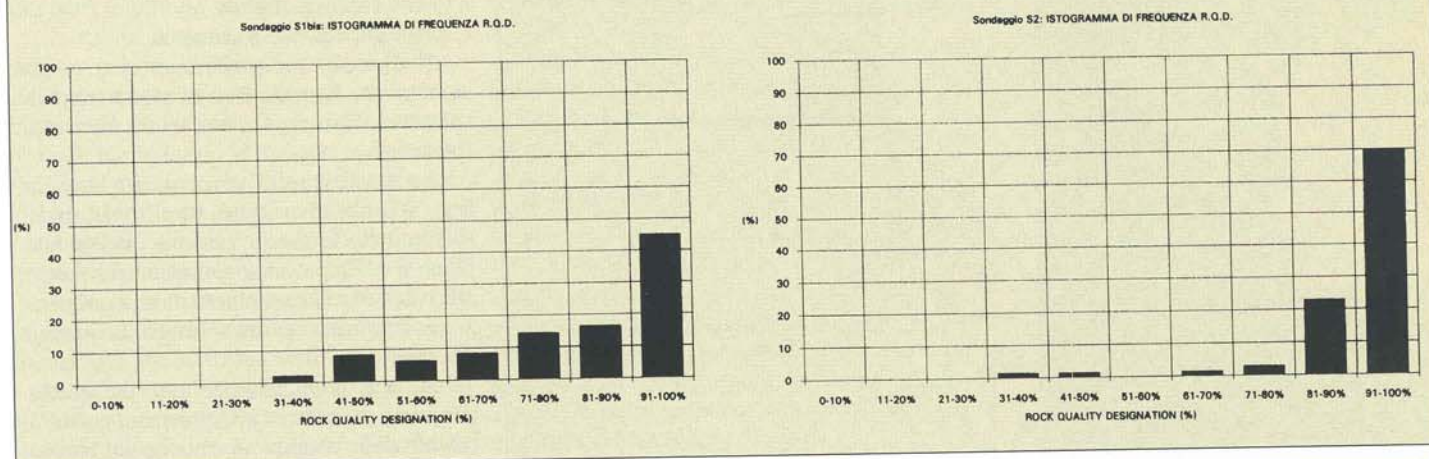
FIGURA 6 - Cassetta calcarenite



FIGURA 7 - Cassetta argillite



FIGURA 8



campo di plasticità, campo peraltro molto esteso (IP = 34%).

Un'accurata analisi dell'intensità di fratturazione nei sondaggi S2 e S1bis ha messo in evidenza che i settori in cui risultano ubicati detti sondaggi presentano situazioni fratturative nettamente differenti poiché:

- la distribuzione statistica in istogramma dei valori del parametro RQD (Rock Quality Designation) (Figura 8) evidenzia una maggior fratturazione nel foro S1bis (piazzale della basilica) rispetto al foro S2 (zona dell'orto del Santuario);
- la curva di correlazione statistica RQD - numero di fratture al ml evidenzia per il foro S1bis una tendenza alla fratturazione «pervasiva» rispetto ad una più «concentrata a fasce» del foro S2 che fa corrispondere, a parità di fratture al ml, valori di RQD più elevati nel S2 rispetto all'S1bis. Si ritiene che ciò possa essere imputabile alle più evidenti deformazioni che si sono sviluppate nella zona del piazzale della basilica (Figura 9).
- Il diagramma RQD - numero di fratture al ml comprensivo dei due sondaggi individua una tendenza complessiva generale dell'ammasso roccioso verso le caratteristiche fratturative rinvenute con il foro S1bis.

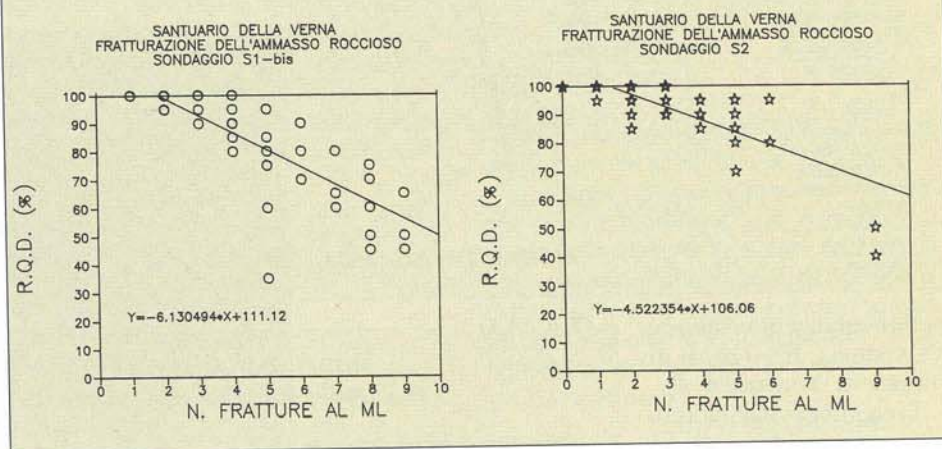
## SCHEMI GEOMECCANICI

La dettagliata conoscenza degli ammassi rocciosi in cui si sviluppano le deformazioni che provocano i noti dissesti (Foto 3) ha permesso la modellazione geomeccanica dei principali settori a rischio.

Tre sono i casi che maggiormente sono stati analizzati allo scopo di individuare i sistemi di bonifica e consolidamento atti a rimuovere le situazioni di rischio per la pubblica incolumità:

a) blocco in aggetto sulla parete sottostante la Cappella delle Stimate;

FIGURA 9



- b) parete rocciosa denominata «Precipizio»;  
c) «Sasso Spicco».

## Blocco in aggetto

Le condizioni di stabilità dell'enorme blocco in aggetto sulla parete sottostante la Cappella delle Stimate (Foto 2) apparivano, ad un primo esame, precarie e la perlustrazione

diretta da parte di rocciatori qualificati confermò tale situazione.

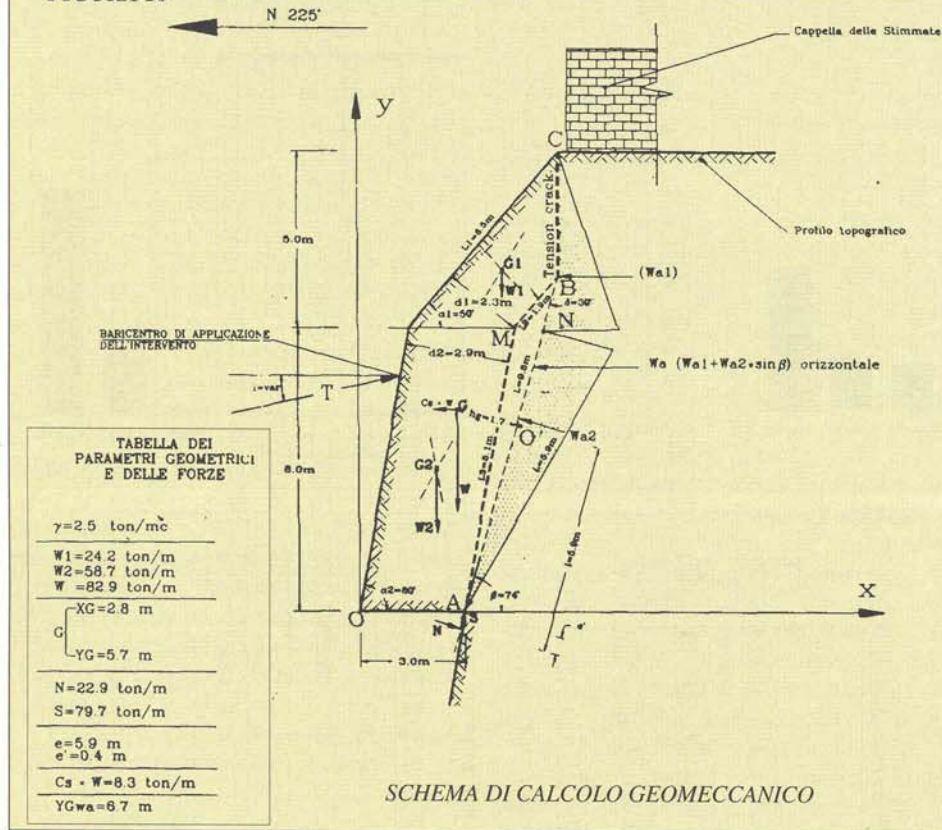
Un rilievo condotto in parete ha permesso di individuare l'esatta geometria del blocco aggettante (cfr. memoria precedente Fig. 10) e ne ha evidenziato le cospicue dimensioni.

Esso è costituito da una lastra a profilo convesso verso l'esterno isolata lateralmente da discontinuità dei sistemi K1 (e K2) e poste-



Foto 3  
Fessurazioni nel muretto sovrastante il «Precipizio»

FIGURA 10



riormente da una discontinuità del sistema K3 (zona di omogeneità strutturale n° 4).

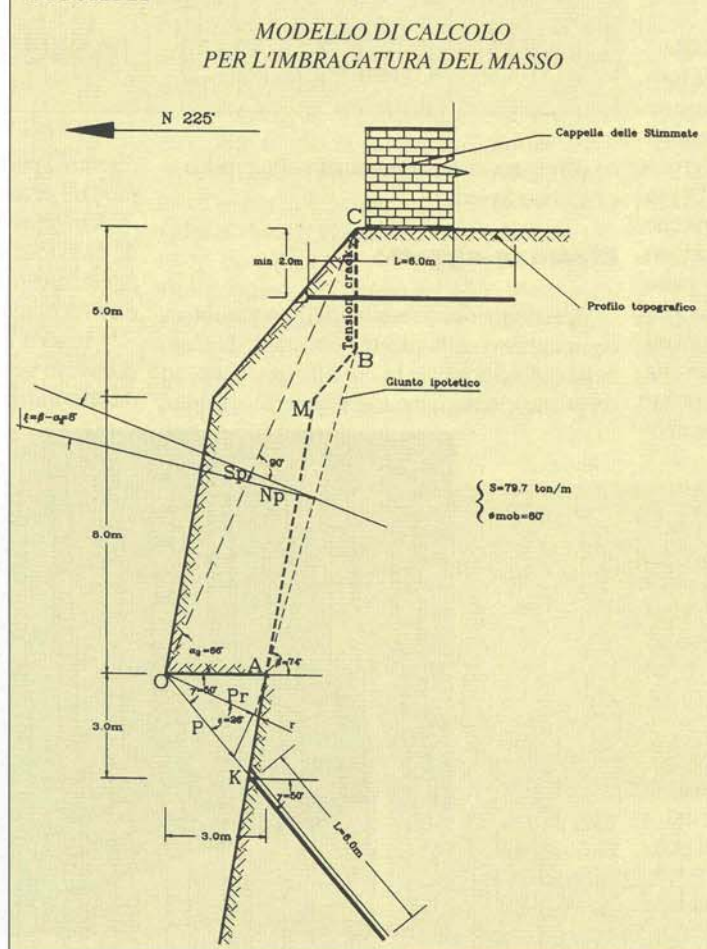
L'equilibrio del blocco, isolato nei tempi dal crollo del sottostante pilastro, sembra assicurato da un valore non trascurabile della coesione e della resistenza a trazione sulla discontinuità posteriore allo stesso.

Nell'assunzione del modello di calcolo si è fatto riferimento allo schema geometrico riportato in Figura 10 le cui misure risultano rilevate direttamente in sito.

Allo scopo di verificare le ipotesi assunte è stata eseguita una verifica di stabilità in back-analysis sotto le seguenti condizioni (Figura 10):

- blocco rigido considerato nella sua sezione più elevata;
- frattura di trazione sul tratto CB;
- ipotetica frattura AB considerante i tratti AM e MB e il reale valore di dilatanza sul tratto AMB;
- modello di verifica all'equilibrio limite di tipo rigido perfettamente plastico;
- criterio di rottura per il tratto

FIGURA 11



AB di tipo misto: Barton (scala decimetrica) e Patton (scala metrica);

- spinte idrostatiche e sismiche.

Il calcolo di verifica a ritroso ha evidenziato la mancanza di sforzi normali sul tratto AB a causa di un elevato momento rotatorio.

La resistenza allo scivolamento lungo la linea AB risultava quindi fornita esclusivamente dalla forza di coesione che su tale piano si sviluppa; analogamente l'equilibrio alla rotazione era assicurato da una resistenza a trazione residua lungo la stessa discontinuità.

Sulla base di tali risultati, che hanno permesso di «tarare» i parametri in gioco, il calcolo delle condizioni statiche del blocco nel lungo termine è stato affrontato secondo ipotesi più gravose in materia sia di parametri di resistenza, che nel tempo subiranno un inevitabile decadimento, sia di forze agenti, idrostatiche, criostatiche e sismiche che statisticamente possano assumere valori più elevati rispetto agli attuali.

La spinta sismica, implementata con il metodo pseudostatico, e le forze dovute all'acqua e al ghiaccio sono state introdotte secondo le ipotesi più realistiche. In particolare la spinta idrostatica ha preso a riferimento diversi valori corrispondenti a situazioni progressivamente più gravose.

Il calcolo ha fornito la linea di spinta delle forze orizzontali (in funzione delle differenti ipotesi idrostatiche assunte) ed ha quindi permesso di ottimizzare la posizione del baricentro di applicazione dell'intervento nei confronti dell'equilibrio alla rotazione.

Il calcolo della risultante delle forze agenti sul blocco ha permesso di individuare l'azione da compensare con la forza esterna stabilizzante T. L'azione della T è stata analizzata al variare della sua intensità e al variare di "i" (angolo di applicazione sull'orizzontale).

Le due funzioni sono risultate rispettivamente non lineare e lineare.

Le analisi suddette hanno permesso di ottimizzare:

- l'intensità dell'intervento;
- la posizione e la direzione di applicazione dell'intervento ( $15^\circ$  verso l'alto).

La stabilizzazione del blocco è stata eseguita con un intervento che ha permesso di assicurare i necessari coefficienti di sicurezza sia al crollo per ribaltamento sia allo scivolamento senza peraltro

indurre nel sistema azioni di disturbo pericolose per l'equilibrio statico.

La scelta è ricaduta su un sistema di bullonatura con tiranti passivi a barre d'acciaio di lunghezza pari a 25 m, con l'importante caratteristica di fornire una resistenza agli sforzi di taglio lungo le fratture, realizzando una vera e propria cucitura dell'ammasso roccioso. Inoltre si è provveduto alla realizzazione di dreni suborizzontali per abbattere le spinte idrostatiche.

Allo scopo di operare in sicurezza e per evitare qualsiasi disturbo meccanico al blocco durante l'esecuzione dell'intervento di ancoraggio profondo, si è ritenuto necessario effettuare una prestabilizzazione del blocco stesso attraverso la realizzazione di un intervento di imbragatura con cavi d'acciaio.

Il sistema di imbragatura ha permesso di applicare al blocco una forza sufficiente a generare, sulla linea di frattura, la tensione normale necessaria a garantire l'autosostentamento per attrito.

Tale contenimento è stato applicato solo parzialmente in modalità attiva, lasciando che eventuali deformazioni innescassero automaticamente la restante coazione attraverso la mobilitazione del tiro dei cavi dell'imbragatura. Si è fatto riferimento, nello studio del modello geomeccanico (Figura 11), ad un comportamento fortemente dilatante durante la mobilitazione del blocco per distacco e scorrimento.

L'operazione di «imbragatura» ha avuto buon esito poiché sono stati attentamente studiati i sistemi di aggancio e tesatura che sono stati realizzati in modo tale che i tiranti, a trefoli, fossero liberi di scorrere lungo il masso, così da non trasmettere alcun forza per attrito, potenzialmente deleteria per l'equilibrio del blocco.

## Precipizio

La placca lapidea della Verna presenta un'assetto monoclinale immergente, globalmente, circa  $25^{\circ} \pm 30^{\circ}$  verso ESE con uno spessore massimo di  $\approx 180$  m nella parte settentrionale, presso la cima del M. Penna; lo spessore decresce progressivamente verso SE, seguendo la direzione della stratificazione.

La Successione Epiligure, costituente la placca lapidea, risulta probabilmente tranciata alla base da una superficie di sovrascorrimento (thrust) sulle sottostanti Liguridi.

La placca è interessata da quattro principali sistemi di lineazioni tettoniche: faglie e fratture a direzione N-S ( $284^{\circ}/81^{\circ}$ ) che delimitano il versante E della placca e il sistema WNW-ESE ( $194^{\circ}/87^{\circ}$ ) che permette la suddivisione della placca in differenti blocchi,

ribassati progressivamente verso SW. Sistemi subordinati sono rappresentati dai giunti con giacitura  $355^{\circ}/83^{\circ}$  e  $244^{\circ}/81^{\circ}$ .

La particolare forma di rilievo isolato a pareti scoscese che caratterizza la struttura monoclinale da luogo ad una morfologia «testimone di cuesta» in cui soprattutto la fascia perimetrale SW è dominata da processi deformativi di versante, attivi e inattivi che attraverso numerose trincee isolano lastre e pinnacoli disgiunti dal resto della placca.

L'espansione laterale dei blocchi, con annessi ribaltamenti e crolli di porzioni rocciose, rappresenta la tipologia di dissesto presente in questa zona: movimenti orizzontali differenziali sono evidenziati da numerosi indicatori morfologici, fra i quali i più evidenti sono rappresentati dalle fratture aperte e dalle trincee (Foto 4).

Le fratture perimetrali, con aperture di ordine



Foto 5, 6 -  
Panoramica della parete denominata «Precipizio» con evidenziato il pilastro roccioso

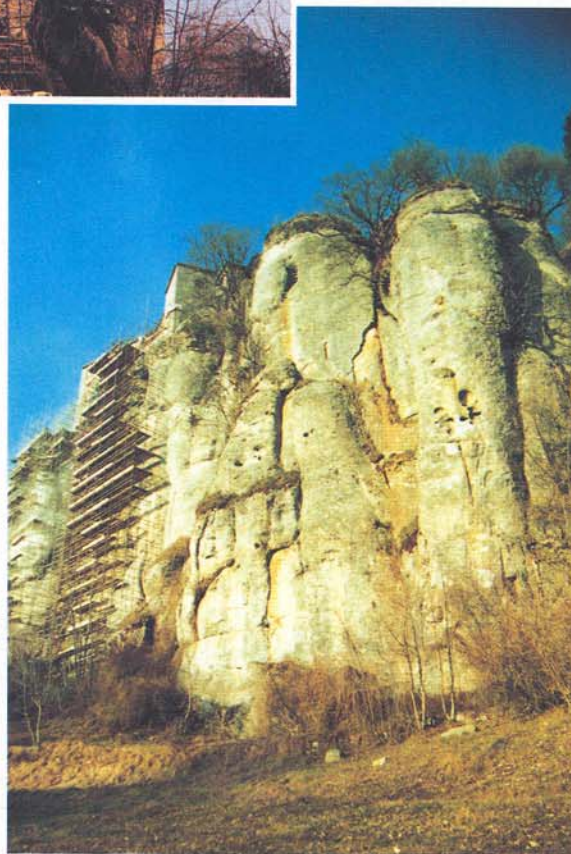


Foto 4 - Trincea denominata «fessura principale»

metrico producono «labirinti» di trincee, come quello presente all'interno del Santuario.

La parete rocciosa denominata «Precipizio» (Foto 5) sottostante il corridoio di accesso alla Cappella delle Stimmate, presenta un forte grado di suddivisione e disarticolazione di lastre e pinnacoli rocciosi che ne fanno un caso unico quanto alle problematiche di stabilità degli stessi (cfr. Fig. 12 memoria precedente).

Con riferimento alla suddivisione della parete, su basi geostrukturali-geomeccaniche, operata durante i rilievi diretti eseguiti, è stata analizzata la situazione statica relativa al settore I (Fig. 12, articolo precedente) dove, come evidenziato dagli studi è stato possibile individuare la presenza di pilastri rocciosi prismoidali isolati da discontinuità naturali (Foto 6).

Al fine di migliorare le conoscenze geostrukturali dei settori rocciosi costituenti le pareti sottostanti la Cappella delle Stimmate e il «Precipizio», le cui altezze sfiorano in taluni casi i 50 m, sono state eseguite sulla prima parete (Stimmate) alcune indagini dirette (Figura 12):

- n. 3 sondaggi meccanici a carotaggio continuo, di lunghezza pari a  $\approx 30$  m, con determinazione del parametro RQD;
- n. 6 prove di permeabilità di tipo Lugeon nei fori S1 e S2 (base della parete) alle profondità di 10,20,30 m dalla bocca foro;
- 90 ml di ispezione televisiva in





dilavamento, soprattutto nel foro S1 (fessure aperte e riempite di materiale detritico).

L'analisi statica della parete è stata svolta sulla sezione rappresentativa K-K (cfr. Fig. 5 precedente articolo).

Con riferimento alla Figura 14, che riporta lo schema geostrutturale della rupe nell'ipotesi progettuale assunta, si evidenzia che:

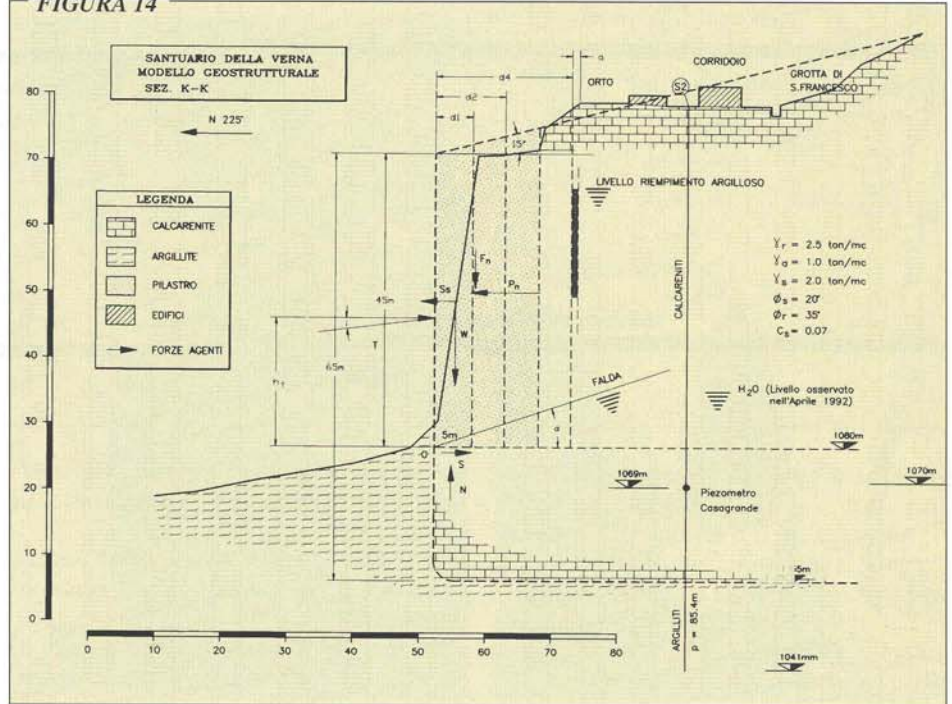
- la placca calcarenitica si estende, in corrispondenza del sondaggio S2, fino a raggiungere un incastro nelle argilliti di base pari a  $\approx 20$  m a fronte di uno «sbalzo» esterno di  $\approx 50$  m;

- la quota della falda ha raggiunto (S3), nel periodo di misurazione (Gennaio-Aprile 1992), battenti di  $10 \div 15$  m sul piezometro tipo «Casagrande» installato nel foro. Tale livello (15 m), corrispondente ad una quota di  $\approx 8.5$  m sopra il livello di incastro della placca, è stato assunto nei calcoli.

La verifica statica è stata eseguita secondo le modalità e i criteri seguenti:

- considerando la stabilità alla traslazione orizzontale ed al ribaltamento di prismi rocciosi, assunti perfettamente rigidi, a sezione rettangolare isolati dalle discontinuità naturali;
- implementando un'azione sismica orizzontale secondo il metodo pseudostatico con coefficiente sismico di II Categoria (CS =

FIGURA 14



0.07);

- assumendo ipotesi geostrutturali, geomeccaniche e idrogeologiche ragionevolmente gravose e congruenti con la realtà locale.

In sintesi è stato considerato l'equilibrio di un pilastro roccioso di spessore unitario isolato a tergo da una frattura verticale aperta e riempita da materiale sciolto posto ad una distanza «d» dalla parete esterna e, inferior-

FIGURA 15

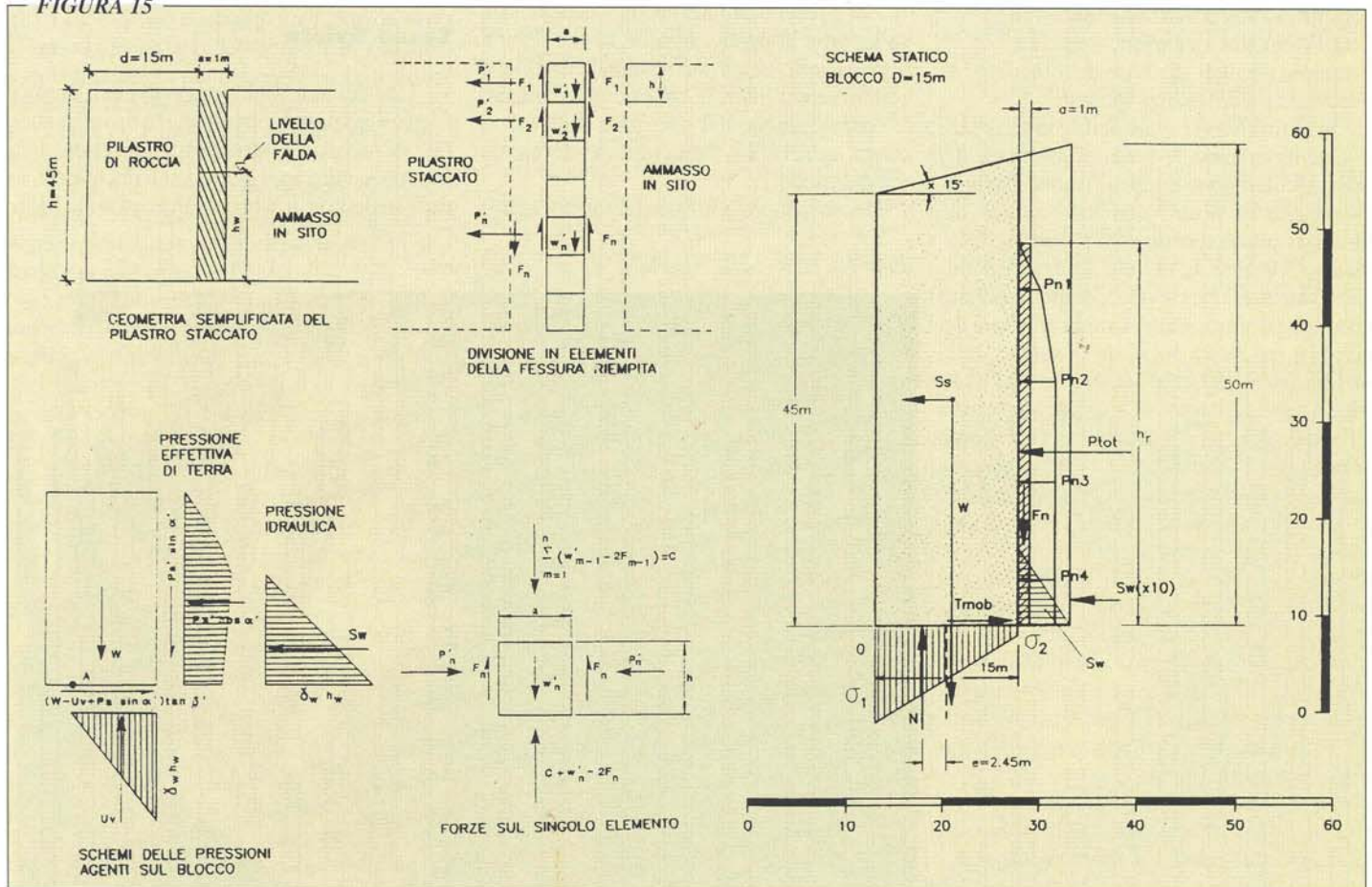
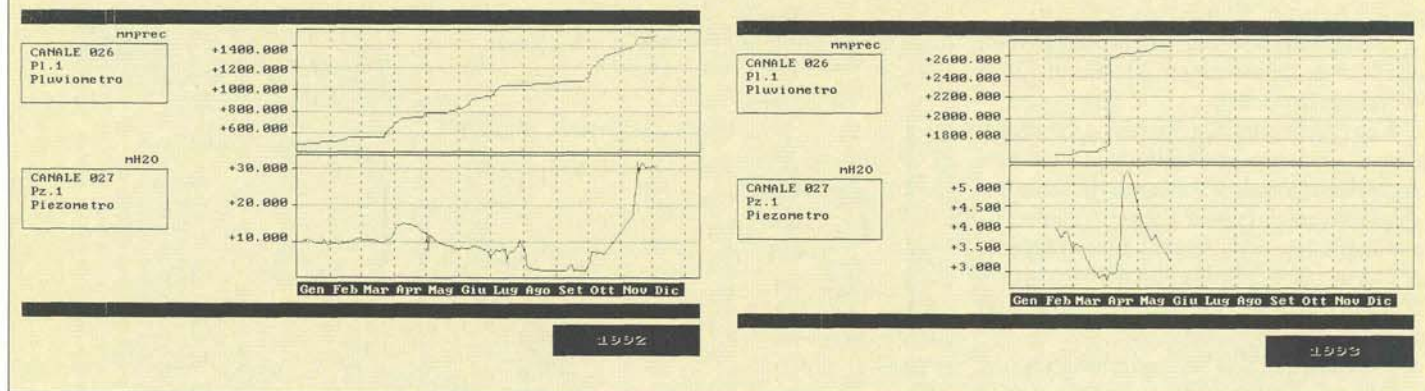


FIGURA 16



mente, da un giunto di strato posto alla quota di incastro.

In particolare si è calcolato, con elevato dettaglio, la spinta originata dal riempimento detritico-argilloso nella frattura (Figura 15).

La verifica di stabilità è avvenuta secondo i calcoli e le determinazioni seguenti:

- posizione baricentrica del pilastro;
- spinta sismica orizzontale;
- spinta dell'acqua nella fessura;
- spinta del riempimento nella fessura;
- linea di applicazione delle forze orizzontali;
- forze verticali e linea di applicazione;
- equilibrio alla rotazione attorno al punto «O»;
- equilibrio alla traslazione orizzontale;
- equilibrio alla traslazione verticale;
- tensioni normali alla base del blocco;
- eccentricità del carico verticale.

In definitiva si è considerato in sicurezza il sistema quando le tensioni alla base del pilastro rimangono quelle esistenti in condizioni normali, dove l'equilibrio statico del blocco risulta essere un dato oggettivo. Condizioni eccezionali, dovute ad azioni sismiche ed idrostatiche elevate, comporterebbero una forte eccentricità dei carichi alla base del pilastro, rendendo possibile la rottura della stessa e la conseguente variazione dell'equilibrio del sistema, considerato come cinematicamente e meccanicamente il più verosimile. La variazione della base reagente del pilastro per parziali tensioni resistenti e un' immediata rotazione dello stesso porterebbe inevitabilmente al crollo per ribaltamento del monolite o, nei casi più gravi, alla sua rottura interna con immediato crollo verticale delle porzioni suddivise.

Pertanto l'intervento di consolidamento è stato studiato in modo da assicurare al sistema un momento stabilizzante pari almeno a quello instabilizzante sotto le massime sollecitazioni di progetto.

Esso risponde ai seguenti requisiti:

- contrastare efficacemente il momento instabilizzante causato dalle massime sollecitazioni previste;

- distribuire uniformemente la tensione stabilizzante per non provocare accumuli tensionali localizzati;
- contrastare le spinte con modalità passiva ovvero solo quando si innescano deformazioni nel sistema;
- resistere direttamente alle sollecitazioni di taglio con un contributo offerto dalla sezione degli elementi metallici del consolidamento.

Sono state adottate barre d'acciaio ad elevata resistenza a doppia protezione anticorrosiva e di lunghezza pari a 25 m tale da considerare il settore di parete rocciosa più critico agli effetti di stabilità e su cui sono state effettuate le analisi geomeccaniche.

Il baricentro dell'azione stabilizzante, estesa su tutta la parete, nonché la sua linea di applicazione, sono stati studiati al fine di ottimizzare l'intensità del consolidamento. L'ottimizzazione del sistema è stata individuata attraverso l'esecuzione di analisi parametriche.

Inoltre, allo scopo di assicurare un'efficace

ce drenaggio della parete rocciosa tale da limitare l'innalzamento della falda oltre il livello assunto come ipotesi progettuale, si sono realizzati dreni suborizzontali di lunghezza pari a quella dei tiranti.

Successive misurazioni dei livelli di falda nella rupe (S3-Pz1), in concomitanza con letture pluviometriche esterne, hanno confermato la validità del battente piezometrico assunto in sede di verifica progettuale che solo in un caso è stato superato (30 m) in corrispondenza di un evento meteorico esterno definibile «eccezionale». (≈ 400 m/mese-ottobre 1992) (Figura 16).

## Sasso Spicco

Uno dei luoghi più suggestivi dell'eremo francescano è indubbiamente la trincea naturale di «Sasso Spicco» posta nel settore più esterno e più ampio del sistema di labirinti, a ridosso della scarpata del «Precipizio». Essa

Foto 7 - Tratto iniziale del labirinto di «Sasso Spicco»



corrisponde ad un sistema di giunti subverticali che originano una potente fessura, con direzione  $\approx 140^\circ$  N (NNW-SSE) e apertura di oltre 10 m; ne risulta un'anfratto naturale che si sviluppa nella zona a Sud della «Grotta di S. Francesco» costituente il prolungamento a Nord del labirinto.

In particolare la fessura si sviluppa (cfr. Fig. 13 prec. articolo), per un primo tratto di lunghezza pari a  $\approx 25$  m, (Foto 7), in direzione NW-SE per deviare successivamente in direzione N-S lungo la cosiddetta «fessura principale» dove lo sviluppo dell'anfratto raggiunge una decina di metri fino a sottopassare il corridoio di accesso alla «Cappella delle Stimate».

Dal punto di vista geostrutturale il settore appartiene alla «Subzona 4a»; il tratto meridionale della fessura si imposta su un fascio di fratture della famiglia K3 ( $235^\circ/85^\circ$ ). Entrambe le famiglie presentano notevole continuità e persistenza. Di notevole evidenza risultano localmente i fenomeni deformativi dovuti a rotazioni di lastre rocciose in corrispondenza dell'apertura, nel tempo, della «fessura principale» (Foto 8).

La porzione più peculiare della trincea naturale in oggetto risulta costituita dal cosiddetto «Sasso Spicco», ovvero un blocco roccioso di notevoli dimensioni aggettante sul pavimento di base dell'anfratto. Il blocco, il cui fronte è costituito dal labbro di una frattura con giacitura  $50^\circ/85^\circ$  (Foto 7), risulta aggettante per la mancanza di una porzione basale isolata da fratture naturali preesistenti e crollata in tempi storici e protostorici nell'originaria fessura.

Un'antica stampa del «Sasso Spicco» (Figura 17) rivela l'aspetto originale della trincea, prima che fosse messo in posto l'attuale riempimento artificiale.

Un'accurato rilievo (Fig. 14 articolo precedente) ha evidenziato che il settore di base asportato risulta delimitato verso l'alto da una struttura di stratificazione ( $200^\circ/5^\circ$ ) e verso l'interno da una struttura del sistema K5 (Foto 9).

Il tetto dell'anfratto inferiore, corrisponde alla base libera della parte aggettante (vedi particolare «vista da sotto del Sasso Spicco»), mostrava evidenti segni di fratturazione che delimitavano prismi rocciosi di precaria stabilità.

Di particolare importanza risulta, al rilievo, la frattura  $50^\circ/60^\circ$ , a notevole continuità ed apertura, che isola il prisma roccioso «Sasso Spicco» dal resto dell'ammasso retrostante.

L'analisi statica del «Sasso Spicco» ha preso a modello un prisma roccioso di tipo esagonale isolato da 6 superfici di discontinuità appartenenti a famiglie struttu-



Foto 8 - Lastre rocciose ruotate in corrispondenza della «fessura principale»

rali ben individuate (Figura 18):

- parete: frattura  $50^\circ/85^\circ$
- tetto inferiore: stratificazione  $200^\circ/5^\circ$
- piano di scivolamento: frattura  $50^\circ/60^\circ$
- piano superiore: stratificazione più copertura vegetale (inclinazione  $15^\circ$ )
- superfici laterali di svincolo: fratture N-S.

La verifica statica è stata eseguita secondo le ipotesi e modalità seguenti:

- verificando la stabilità del prisma roccioso, considerato perfettamente rigido, allo scivolamento lungo il piano inclinato corrispondente alla citata frattura e alla rotazione intorno a un punto singolare del prisma;

Foto 9 - Anfratto di base del «Sasso Spicco»

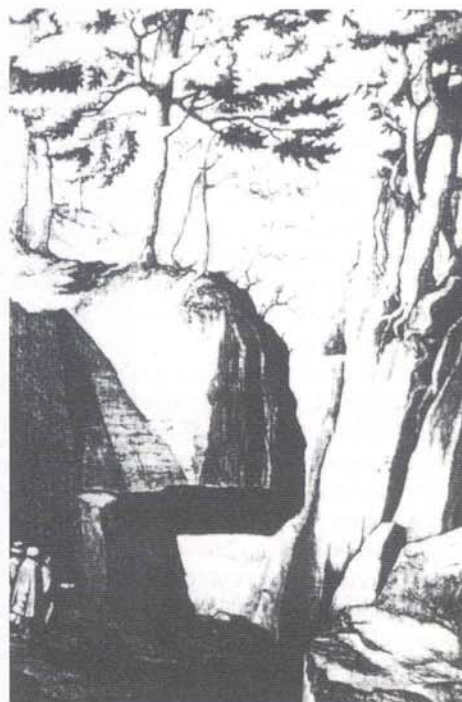


FIGURA 17 - Antica stampa «Sasso Spicco»

- implementando un'azione sismica orizzontale pari a quella assunta nel «Precipizio»;
- assumendo ipotesi geostretturali, geomeccaniche e idrogeologiche ragionevolmente gravose e congruenti con la realtà locale.

In particolare la peculiarità dell'analisi ha dovuto basarsi sulle seguenti ipotesi geomeccaniche:

- la frattura  $50^\circ/60^\circ$  possiede una discontinuità non totale, interrotta da ponti di roccia in posizione non conosciuta;
- i suddetti ponti di roccia posseggono resistenza a trazione non nulla, in ragione dell'in-

tegrità dei legami strutturali del litotipo e comunque notevolmente inferiore ( $\approx 1/10$ ) di quella rilevata con le prove di laboratorio. Il valore assunto (25.7 ton/mq) si è rilevato congruente e compatibile con le ipotesi di spinta idrostatica assunte;

- l'azione idrostatica deriva dalla ritenzione idrica nel materiale di riempimento della frattura posteriore, e corrisponde ad una distribuzione triangolare con il valore di massima tensione centrale e acqua fuoriuscente alla base del giunto;

- il giunto di scivolamento, poichè parzialmente aperto, è stato supposto senza resistenza per attrito in tali tratte. E' stato ipotizzato che, se sottoposto ad azione normale, potesse offrire una resistenza al taglio complessiva pari a un angolo di attrito  $\phi = 35^\circ$ .

Allo scopo di «tarare» i parametri e le ipotesi assunte è stata eseguita una verifica a ritroso («back-analysis») determinando ed eseguendo:

- risultante delle forze orizzontali e linea di azione;
- risultante delle forze verticali e linea di azione;

- posizione del baricentro del sistema;
- verifica alla traslazione orizzontale;
- verifica alla traslazione verticale;
- verifica alla rotazione intorno a «O».

Per la complessa situazione della staticità del blocco si è fatto ricorso ad un calcolo matriciale.

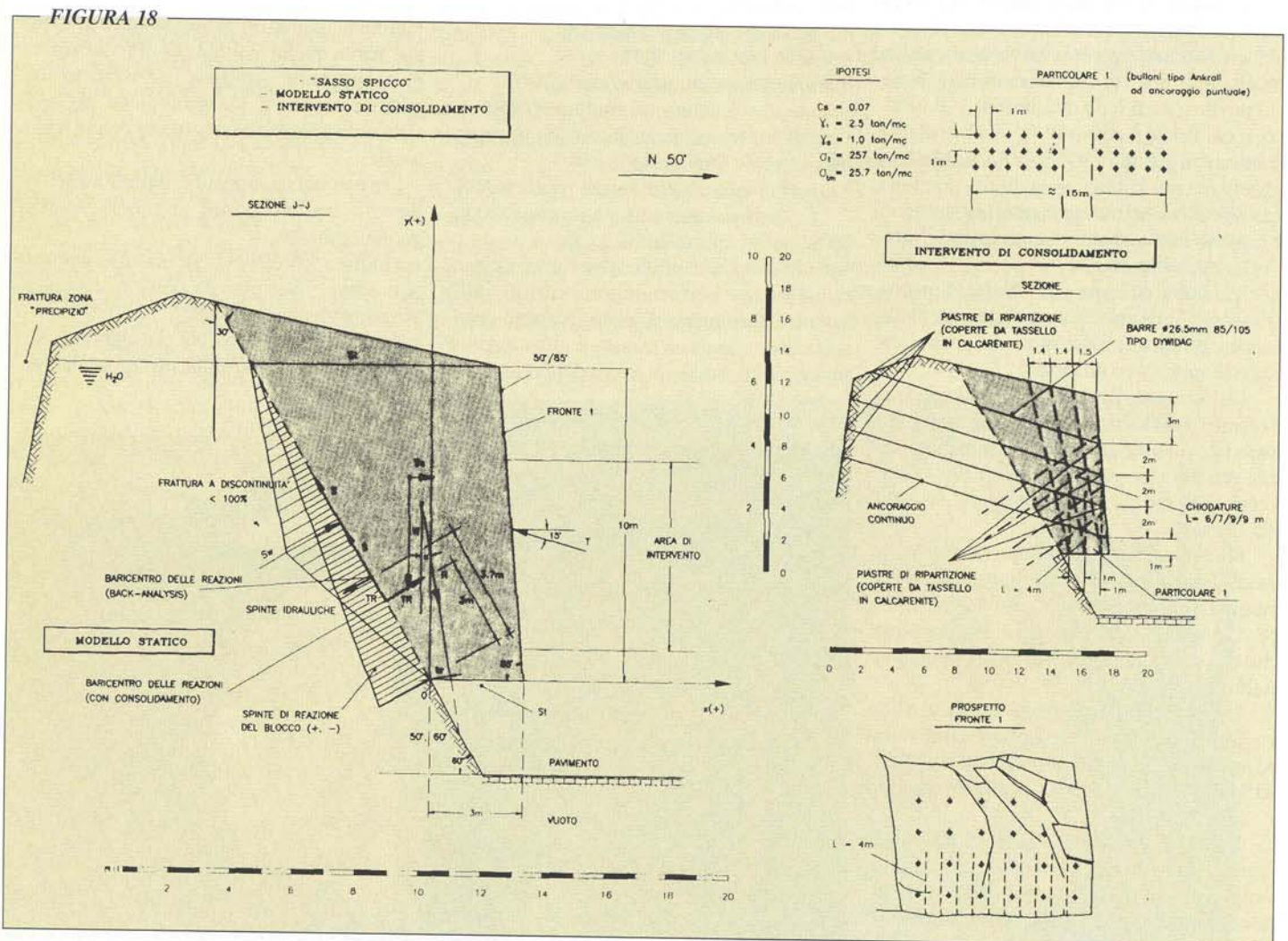
La verifica a ritroso ha confermato, sotto le ipotesi di progetto, l'elevato valore delle azioni resistenti di taglio e trazione lungo la discontinuità, com'era logico attendersi da una situazione morfologica fortemente aggettante come quella esaminata.

Le verifiche successive di tipo progettuali e miranti ad individuare il miglior sistema di consolidamento per intensità, distribuzione e linea di azione, sono state eseguite col presupposto di conseguire un coefficiente di sicurezza adeguato diminuendo le forze agenti, di trazione e di taglio, in essere lungo la superficie di scivolamento. Inoltre l'ottimizzazione dell'azione del consolidamento ha permesso di invertire l'azione normale sul giunto, da tensione di trazione, a tensione di compressione, così da ottenere una resistenza indiretta per attrito.

Particolare attenzione è stata riposta nel mantenere l'originale centro di pressione sul giunto così da non inserire disequilibri in un sistema visibilmente delicato.

Infatti l'intervento ben definito in disposizione ed intensità, ha permesso, come verificato a posteriori, di non modificare in concomitanza di eventuali e potenziali deformazioni del sistema l'originaria distribuzione delle tensioni, così da non inficiare pesantemente sia l'integrità sia la stabilità del blocco. L'intervento di consolidamento, costituito da tiranti passivi in barre d'acciaio passanti da un capo all'altro del settore roccioso isolato tra la fessura di Sasso Spicco e il «Precipizio» e cementati per l'intera lunghezza, costituisce un vero e proprio «strallo» del blocco; per assicurare l'integrità monolitica del «Sasso» è stato inoltre eseguito un intervento di bullonatura passante dal tetto inferiore al piano superiore.

Infine le lastre rocciose tendenti al distacco, isolate dalle superfici di strato del tetto inferiore, sono state assicurate tramite bullonature passive ad ancoraggio puntuale.



### INTRODUZIONE

La realizzazione dei lavori di bonifica e consolidamento dell'area del Santuario francescano della Verna, previsti nel Progetto esecutivo 1° Stralcio, ha preso avvio nel mese di Aprile 1992 con l'apertura di due distinti cantieri, localizzati, rispettivamente, nella parete rocciosa che si sviluppa al di sotto della Cappella delle Stimate, denominata «il Precipizio», e nella ampia frattura naturale chiamata «Sasso Spicco».

Per motivi logistici legati sia alla formazione dei cantieri, che all'apertura di accessi tali da garantire comunque lo svolgimento della vita religiosa del santuario, e all'interno di un quadro organizzativo che consentisse il superamento di eventuali imprevisti senza pregiudicare la completezza delle lavorazioni nei cantieri in esercizio, si è demandato l'inizio dei lavori nel settore del «Letto di San Francesco» alla conclusione dell'attività lavorativa nell'area del «Sasso Spicco» ed al raggiungimento di un soddisfacente livello di avanzamento degli interventi sulla parete de «il Precipizio».

Tale impostazione rispondeva alla necessità di realizzare, per ogni porzione di ammasso da consolidare, interventi esaustivi, che una pianificazione progettuale preventiva, data l'inaccessibilità dei luoghi, la presenza di diffusa copertura vegetale e di numerose cenge ricoperte da depositi detritici, poteva valutare solo a livello generale.

Infatti, la rimozione di questi ostacoli og-

## PROCEDURE ORGANIZZATIVE ED ESECUTIVE DEGLI INTERVENTI DI PROGETTO

Dr. Geol. P. FRANCALANCI  
Dr. Geol. G. GRANDINI  
GeoEco - Firenze

gettivi alla conoscenza delle condizioni di stabilità locali ha permesso di riscontrare puntuali stati di disequilibrio di alcune porzioni rocciose e di parte dei manufatti che vi insistono.

I lavori si sono conclusi nel mese di ottobre dello stesso anno assommando complessivamente nelle principali categorie d'opere le seguenti quantità:

Ponteggi 2.932 mq, tiranti n. 320 per 4.758 ml, chiodature 1.107 ml, drenaggi 843 ml, riempimenti 432 mc, stilature 570 mq e murature in pietrame 70 mc.

In dettaglio si specificano per ogni settore le tipologie di intervento messe in opera e le caratteristiche esecutive delle lavorazioni.

### OPERE DI CONSOLIDAMENTO NELLA PARETE ROCCIOSA DENOMINATA «IL PRECIPIZIO»

I lavori di bonifica e consolidamento della parete che si estende dal terrazzo delle S. Stimate alla zona dell'orto del Santuario (Foto 1) hanno preso avvio con la perlustrazione delle pareti rocciose mediante l'impiego di personale alpinistico. Durante le calate lungo le pareti più scoscese si è provveduto al disgrego di volumi rocciosi in precarie condizioni di equilibrio, alla rimozione e ripulitura della copertura vegetale e allo sgombero dei riempimenti detritici instabili presenti in alcune fessure.

Sono stati messi in opera tiranti a barre di acciaio tipo «Dywidag» 835/1030 Ø 26.5 a doppia protezione anticorrosiva per l'intera lunghezza. La lunghezza di tali tiranti è di 25 metri con un'inclinazione di circa 15° verso l'alto. Per quanto riguarda le file di tiranti in prossimità della sommità della parete rocciosa la lunghezza è di 15 metri e l'inclinazione è suborizzontale. Il tratto di fondazione si estende per una lunghezza di 8 metri.

La testa dei tiranti è stata alloggiata in una nicchia realizzata con un carotiere e successivamente mascherata con l'applicazione del tassello roccioso ricavato dalla carota estratta (Foto 2).

Inoltre, allo scopo di realizzare un efficace drenaggio dell'ammasso roccioso, tale da limitare eventuali innalzamenti freatici, sono stati realizzati dreni sub-orizzontali di lunghezza pari a 25 metri (Foto 3).

Per quanto riguarda la messa in sicurezza di porzioni rocciose di limitato volume e caratterizzate da forte instabilità si è fatto ricorso a

(a sinistra) Foto 1 - Panoramica del cantiere nel settore de «il Precipizio».

(a destra dall'alto) Foto 2 - Formazione di nicchia per l'alloggiamento della testa del tirante.

Foto 3 - Drenaggio e tiranti in opera



chiodature lunghe circa 6 metri.

Infine si è operato, con le metodologie di seguito illustrate, l'intasamento delle principali fratture allo scopo di ripristinare la continuità meccanica dell'ammasso.

### **OPERE DI CONSOLIDAMENTO NELLA FRATTURA NATURALE CHIAMATA «SASSO SPICCO»**

L'intervento di consolidamento in corrispondenza del «Sasso Spicco» ha comportato la realizzazione di tiranti a barra di acciaio tipo «Dywidag» (Foto 4) di lunghezza tale da passare completamente il grosso masso aggettante che dà il nome a questa zona.

Detti tiranti sono stati realizzati con le seguenti modalità:

- inclinazione circa 15° verso l'alto;
- ancoraggio continuo lungo tutto il tirante, ovvero adozione di guaina corrugata lungo tutto lo sviluppo del tirante;
- adozione del sistema di ripartizione a piastra di acciaio in entrambe le uscite del tirante dal masso.

L'abbattimento di possibili pressioni idrostatiche entro le fessure è assicurato dalla posa in opera di canne drenanti.

La presenza nella parte sommitale del «Sasso Spicco» di numerosi blocchi rocciosi aggettanti e completamente isolati da sistemi fessurativi ha reso necessaria, per la loro stabilizzazione, l'adozione di bullonature di ancoraggio tipo «Ankrall» che grazie ad un meccanismo ad espansione consentono l'immediato bloccaggio del masso instabile.

Ciò ha garantito la sicurezza delle altre operazioni di lavoro nelle immediate vicinanze e successivamente, mediante l'iniezione di boiaccia cementizia, il raggiungimento di una messa in sicurezza definitiva dei singoli blocchi rocciosi.

Infine per preservare il distacco di lastre rocciose formate da singoli o più strati sotto la parte aggettante del «Sasso Spicco» si è reso necessario realizzare un esteso intervento di chiodatura e intrantatura secondo una maglia di chiodi costituiti da barre di acciaio Ø 30 inserite in fori Ø 80 e iniettate con boiaccia cementizia e di tiranti a barra tipo «Dywidag» a tratto di fondazione continuo che attraversano verticalmente il blocco in aggetto.

La disposizione di queste opere prevede una stretta maglia di lato 1 x 1 m secondo due schemi distinti; il primo realizzato dalla parete del masso aggettante con fori inclinati di circa 40° verso il basso e lunghezza variabile da 9 a 6 metri; il secondo con perforazioni sub-verticali passanti dalla sommità del «Sasso Spicco» al tetto della sporgenza aggettante.

Anche in questo caso le teste sono state mascherate mediante la collocazione di un tassello di calcarenite.

Inoltre a completamento di tale quadro di intervento sono state poste in opera delle chiodature verticali di limitata lunghezza (2-3 ml) mediante perforazioni eseguite dalla base del masso aggettante (Foto 5).

### **INTERVENTI DI INTASAMENTO DELLE PRINCIPALI FESSURE DELL'AMMASSO**

La presenza nell'ammasso di fessure con elevata apertura e profondo sviluppo determina gravi interferenze nell'efficienza dei sistemi di ancoraggio di progetto.

Si è reso pertanto necessario, al fine di ripristinare le caratteristiche di continuità meccanica dell'ammasso, procedere al riempimento di dette fratture (Foto 6).

Per tale scopo è stato impiegato un calcestruzzo cellulare composto da argilla espansa

imboiacciata con rapporto di mc. 1 di argilla con q.li 2.00 di cemento 325.

Dato il grande disagio per formare i vari accessi ai punti di immissione del riempimento entro le fessure e le cavità presenti nell'ammasso e data l'estrema complessità e sviluppo del sistema fessurativo si è fatto ricorso alla tecnica di pompare il tutto attraverso un impianto fisso situato nel piazzale del cantiere alla base del precipizio.

Il sistema si compone di due circuiti separati per il pompaggio della boiaccia e dell'argilla. L'impianto è stato dotato di attacchi rapidi e derivazioni mobili in modo da costruire una rete di condotte capaci di trasportare il materiale ad ogni stazione di immissione predisposta sull'ammasso.

La boiaccia è stata pompata da una stazione di betonaggio posta sul piazzale mentre l'argilla è stata direttamente pompata dagli automezzi cisternati che, utilizzando la pista del cantiere, raggiungono direttamente il piazzale alla base del precipizio.

In questo modo sono state riempite tutte le fessure pompando separatamente l'inerte e la boiaccia e ricongiungendoli all'uscita dei tubi.

Questi interventi rappresentano un importante elemento di rigenerazione geomeccanica dell'ammasso permettendo un efficace funzionamento degli ancoraggi previsti.

Infatti, i punti di attraversamento delle ampie fessure rappresentano per le barre di ancoraggio un punto di grande debolezza meccanica e elevata esposizione all'alterazione ed alla corrosione.

Gli interventi di intasamento previsti non alterano la naturale conformazione dei luoghi in quanto risulta visibile solamente il tamponamento esterno realizzato mediante l'accatastamento di blocchi di pietra calcarenitica uniti con malta opportunamente cromatizzata. Inoltre, oltre alla già limitata



(a sinistra) Foto 4 - Perforazione nel settore del «Sasso Spicco» in condizioni di elevato disagio  
(sotto) Foto 5 - Tetto del masso aggettante denominato «Sasso Spicco» interessato da chiodature e tirantature  
(a destra) Foto 6 - Operazioni di riempimento delle principali fessure e cavità presenti



esposizione visiva di queste opere, la rapida alterazione della superficie per la percolazione idrica e la naturale ricrescita vegetativa, rappresentata essenzialmente da muschi e rampicanti, consentono il totale mascheramento degli interventi.

### INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI OPERE MURARIE IN PROSSIMITA' DELLA PARETE ROCCIOSA

Le costruzioni insistono sull'orlo del precipizio costituito da una parete sub-verticale alta circa 40 metri.

Le strutture fondano direttamente sul corpo roccioso calcarenitico che, in questo settore, mostra un'intensa fratturazione con blocchi rocciosi in precarie condizioni di equilibrio.

Particolarmente gravi si sono rivelati gli effetti disgreganti e divaricatori esercitati sul corpo roccioso dagli apparati radicali della diffusa vegetazione presente.

L'osservazione ravvicinata delle opere murarie ha messo in luce uno stato di generale degradazione del tessuto paramentale. Infatti, si è constatato un avanzato invecchiamento dei leganti, sia a causa di una loro scadente preparazione originaria, sia per l'azione aggressiva esercitata dagli agenti atmosferici.

A questi fattori negativi si aggiunge, per la collocazione esposta sulla scarpata, l'impossibilità di effettuare nel tempo un'adeguata opera di manutenzione ordinaria della struttura paramentale e fondazionale.

Ciò ha determinato una progressiva e diffusa perdita di malta tra gli scapoli di pietra che formano il tessuto murario della costruzione con una conseguente minore efficienza nella funzione di distribuzione delle isostatiche.

Si riscontra anche la perdita di porzioni di muratura per il distacco di singoli conci di pietra.

Al fine di scongiurare il raggiungimento di condizioni critiche per la stabilità del manufatto e il pericoloso rilascio di singoli conci di pietra si è intervenuti operando scelte progettuali atte a ripristinare su tutto lo sviluppo della superficie muraria le iniziali condizioni di funzionalità statica.

Gli interventi in progetto hanno conseguito il raggiungimento degli scopi predetti nel totale rispetto e mantenimento dei valori estetici della costruzione e nella più assoluta salvaguardia delle testimonianze storiche presenti.

Sono stati realizzati interventi atti a ripristinare l'efficienza delle vecchie malte leganti, ormai in fase di accelerata degradazione, con stilatura della parete muraria.

Tutto questo è avvenuto mediante la pulizia e la bonifica dell'ammasso e delle strutture murarie, la scarificazione profonda e ripristino

dei giunti di malta ammalorati e con interventi di consolidamento mediante reticoli cementati.

E' stata rimossa la vegetazione, prevalentemente costituita da cespugli di rampicanti, con particolare cura per gli apparati radicali e sono stati trattati con prodotti speciali atti ad impedire la rivegetazione.

Le fratture beanti ripiene di materiale terroso sono state svuotate, ripulite e successivamente intasate il più in profondità possibile.

I giunti e le lesioni del paramento murario sono stati rabboccati e sigillati utilizzando malte opportunamente cromatizzate in modo da riprendere la naturale colorazione della muratura esistente.

Ove le condizioni di degrado risultavano particolarmente avanzate si è provveduto alla sostituzione degli scapoli ammalorati o al rimpiazzamento di quelli ormai distaccati secondo il metodo «cuci-scuci» (Foto 7).

Foto 7 - Interventi di muratura e stilatura



### INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DELLA CAVITA' NATURALE DENOMINATA «LETTO DI SAN FRANCESCO»

Questo luogo risulta essere una delle zone più complesse e di difficile definizione in considerazione del fatto che si tratta di un vero e proprio macereto da crollo compreso tra discontinuità di grandi dimensioni.

La porzione della cavità frequentata dai visitatori si estende essenzialmente in direzione est-ovest con un dislivello altimetrico riferito alla quota di ingresso di 2.20 m.

Il resto della cavità si sviluppa invece secondo la direttrice nord-sud, con dislivelli massimi di circa 20 metri, collegandosi direttamente con la fessura del «Sasso Spicco».

Verificato un soddisfacente avanzamento dei lavori di consolidamento della parete sul precipizio e dell'area del «Sasso Spicco» si è proceduto all'inizio delle operazioni all'interno di questa cavità. A seguito della già espressa complessità strutturale di questo luogo e vista l'esigenza di restituire al pubblico la fruizione almeno parziale di questo suggestivo e mistico ambiente, si è ritenuto di procedere

per porzioni successive. Tale condotta dei lavori ha consentito il progressivo e completo consolidamento di successivi settori e la loro apertura al pubblico. Si è evitato, in tal modo, di disperdere le risorse disponibili in interventi su tutta la cavità, la cui complessità strutturale e deformativa avrebbe reso non esaustivi ai fini anche di una parziale apertura.

Si è realizzata la bonifica ed il consolidamento del tessuto murario presente all'ingresso della cavità, la bullonatura dei blocchi rocciosi che formano la volta di copertura e la parete sinistra del discendimento e l'intasamento delle grosse fessure e cavità sottostanti la scalinata di ingresso, in modo da garantire un sicuro accesso ai luoghi sino all'altezza del grosso masso reclinato che sbarrava il discendimento a circa 5 metri dall'ingresso.

Questo settore è afflitto da fenomeni di crollo e scivolamento di masse rocciose.

La dinamica del dissesto determina, inoltre, condizioni di spinta e compressione sulle opere murarie presenti.

Si è provveduto mediante una serie di bullonature variamente orientate con l'intento di ricercare una coesione d'insieme e aumentare la rigidità dei blocchi rocciosi disarticolati. Le principali linee di frattura sono state cucite con un sistema di chiodi inclinati.

Al fine di minimizzare l'impatto di tale intervento, sono state eseguite delle nicchie di dimensioni ridotte, in cui sono state alloggiare le chiodature e le eventuali piastre e che sono state sigillate con malta antiritiro ed esternamente chiuse con porzioni delle carote estratte.

L'intasamento dei vuoti e delle cavità presenti nell'area circostante il settore di intervento è stato realizzato con l'impiego di calcestruzzo cellulare.

Le opere murarie presenti all'esterno ed all'interno della cavità sono state consolidate con l'esecuzione di chiodature.

Queste iniezioni armate hanno il vantaggio di non comportare alcun pregiudizio all'estetica e di non produrre stati di coazione alla struttura, creando, nel contempo, una struttura tridimensionale armata.

Le chiodature che determinano la cucitura del tessuto murario consistono in armature di lunghezza di circa 1 metro disposte in fori trivellati alla distanza variabile da 20 a 60 cm l'uno dall'altro ed inclinati, alternativamente verso l'alto e verso il basso, di circa 45 gradi. I fori sono stati successivamente iniettati con una miscela di cemento caricata con sabbia che diffondendosi nel corpo murario determina un complesso resistente.

Per quanto concerne gli interventi atti a ripristinare l'efficienza delle vecchie malte leganti, ormai in fase di accelerata degradazione, è stata realizzata la stilatura del paramento esterno.