

# Tipologie dei rilasci e delle deformazioni in "foro pilota" in relazione alle condizioni geostrutturali dell'ammasso roccioso

*Al fine di eseguire una progettazione di opere in sotterraneo con la tecnica del foro pilota il più possibile aderente alla realtà geostrutturale esistente, è apparso importante identificare e classificare i principali fenomeni di instabilità che si verificano durante lo scavo del cunicolo stesso. Questi fenomeni presentano caratteristiche che dipendono strettamente, oltre che dalla natura degli ammassi rocciosi, dal loro stato di fratturazione e dallo spessore delle coperture in gioco. In particolare, nel presente lavoro, vengono individuate e descritte nel dettaglio sette tipologie di fenomeni di instabilità che si sviluppano in ammassi rocciosi aventi un comportamento tenso-deformativo di tipo fragile o di tipo duttile. Inoltre viene riportato, per ciascuna tipologia individuata, un caso reale particolarmente evidente descritto in apposite schede corredate da documentazione fotografica.*

## CONTRIBUTO DELL'ANALISI DEI FENOMENI DI INSTABILITÀ IN FORO PILOTA ALLA PROGETTAZIONE DELLA GALLERIA


Le esperienze di questi ultimi anni maturate nella progettazione di opere in sotterraneo con la tecnica del "foro pilota" hanno dimostrato che l'analisi cinematica dei rilasci e delle deformazioni che avvengono a seguito dello scavo del preforo fornisce indicazioni di assoluta utilità per le successive scelte di carattere progettuale riguardanti la realizzazione della galleria finita. Si è quindi messa in luce l'esigenza di pervenire a una definizione delle principali tipologie dei fenomeni di instabilità osservati sulle pareti del cunicolo esplorativo. Tale definizione scaturisce da un'attenta e documentata analisi dei rilasci e delle deformazioni osservati in numerosi

"fori pilota" eseguiti in Italia negli ultimi anni ( Tab.1).  
Nei vari cunicoli si sono infatti riscontrate differenti risposte degli ammassi rocciosi a seguito del loro scavo, dipendenti fondamentalmente dall'assetto geostrutturale esistente e dallo spessore delle coperture in gioco; a parità di queste due condizioni il comportamento degli ammassi rocciosi alle sollecitazioni indotte dallo scavo e, quindi, le modalità di deformazione sono risultati pressoché costanti. È possibile pertanto procedere a una classificazione di tali comportamenti definendo precise topologie di instabilità riferibili ad altrettanto precise condizioni geostrutturali.  
La definizione di tali fenomeni di instabilità è avvenuta attraverso un'attenta disamina di quanto esistente in letteratura su argomenti riguardanti il comportamento degli ammassi rocciosi allo scavo, ma, ancor più, attraverso approfondite e numerose osservazioni effettuate durante l'esecuzione dei "fori pilota".

## RISPOSTA DELL'AMMASSO ROCCIOSO ALL'APERTURA DI FORI PILOTA

Come noto, nell'ambito della realizzazione di opere in sotterraneo, lo scavo del "foro pilota", quale mezzo di prospezione geognostica per il successivo allargamento, riservato a contesti eminentemente lapi-

Tab.1 - Fori Pilota con fresa ad attacco integrale e continuo (eseguiti in Italia dal 1984).

ENTE	GALLERIA	L(m)	Ø(m)	
F.S.	PRATO TIRÉS (BZ)	13200	3.50	—————
F.S.	FLERES (BZ)	5200	3.50	—————
F.S.	MONTE LEILA (UD)	3200	3.75	—————
F.S.	S. LEOPOLDO (UD)	5900	3.75	—————
F.S.	MALBORCHETTO (UD)	8050	3.90	—————
F.S.	CAMPOROSSO (UD)	7000	3.75	—————
F.S.	DOMEGLIARA-DOLCE (VR)	4075	3.95	—————
F.S.	BELLOSQUARDO (FI)	3500	3.90	—————
ANAS	MONTEZEMOLO (CN)	1730	3.50	—————
ANAS	ARVIER (sx) (AO)	2400	3.90	—————
ANAS	ARVIER (dx) (AO)	2360	3.90	—————
ANAS	VILLENEUVE (sx) (AO)	2750	3.90	—————
ANAS	VILLENEUVE (dx) (AO)	570 2200	4.94 3.75	—————
ANAS	LEVEROIGNE (sx) (AO)	1590	3.90	—————
ANAS	LEVEROIGNE (dx) (AO)	1640	3.90	—————
ANAS	AVISE (sx) (AO)	2700	4.50	—————
ANAS	AVISE (dx) (AO)	2700	4.50	—————
ANAS	LENNA (BG)	2100	3.90	—————
PROV. BZ.	DEP. BRUNICO (BZ)	400	3.90	—————

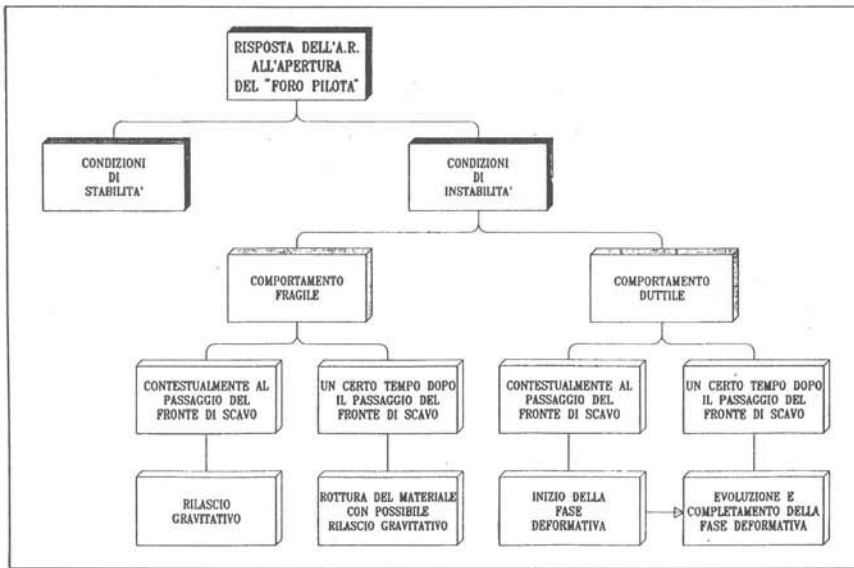


Fig. 1 - Risposta dell'ammasso roccioso all'apertura del "foro pilota".

dei, va necessariamente eseguito con una fresa TBM ad attacco integrale con diametro compreso fra 3,50 e 4,20 metri. Questa metodologia consente infatti di

rendere perfettamente ispezionabili le pareti di scavo e, conseguentemente, di acquisire, in maniera diretta, quegli elementi litostratigrafici e strutturali, caratteri-

Fig. 2 - Tipologie dei rilasci e delle deformazioni in "foro pilota".

TIPO	RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA	DESCRIZIONE
①		CROLLO DETERMINATO DA UN INTRECCIO DI GIUNTI
②		FLESSIONE, ROTTURA E CROLLO DI LASTRE ROCCIOSE IN CALOTTA
③		FLESSIONE E ROTTURA DI LASTRE ROCCIOSE SUI PARAMENTI
④		CROLLO DETERMINATO DALLA PRESENZA DI UN SINGOLO ELEMENTO DISGIUNTIVO
⑤		CROLLO IN AMMASSO ROCCIOSO FITTAMENTE SUDDIVISO
⑥		CROLLO DI MATERIALE CATACLASTICO DA POCO AD AFFATTO CEMENTATO
⑦		RESTRINGIMENTO DELLA CAVITA' PER LA PRESENZA DI MATERIALE PLASTICO

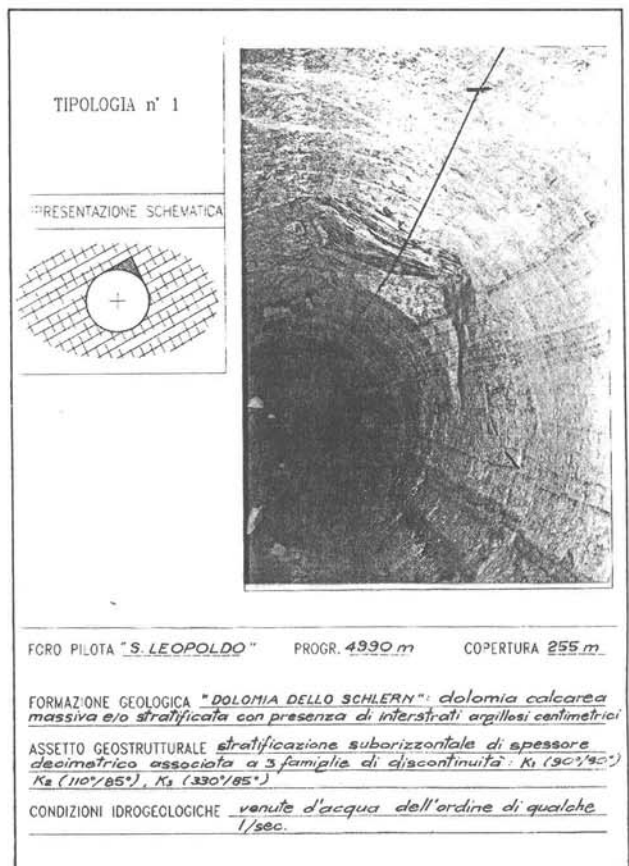
stici degli ammassi rocciosi intercettati, utili alla progettazione.

Durante la realizzazione di un "foro pilota", gli stessi ammassi possono esibire o condizioni di sostanziale equilibrio, in virtù delle loro capacità di autoportanza, oppure denotare condizioni di instabilità (Fig. 1). In questo secondo caso, la mancanza di equilibrio nell'ammasso roccioso determina l'innescarsi di fenomeni di instabilità differenti a seconda che il materiale coinvolto abbia un comportamento geomeccanico di tipo fragile (hard rocks) o di tipo duttile (weak rocks).

In rocce aventi un comportamento fragile, i fenomeni di instabilità si possono manifestare attraverso cinematismi di tipo gravitativo, caratterizzati da crolli che avvengono il più delle volte contestualmente al passaggio del fronte di scavo. In alcuni casi la redistribuzione degli sforzi attorno alla cavità richiede tempi piuttosto lunghi, per cui la rottura del materiale può verificarsi anche un certo tempo dopo il passaggio del fronte.

In alcuni particolari tipi di rocce (weak

Fig. 3 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.



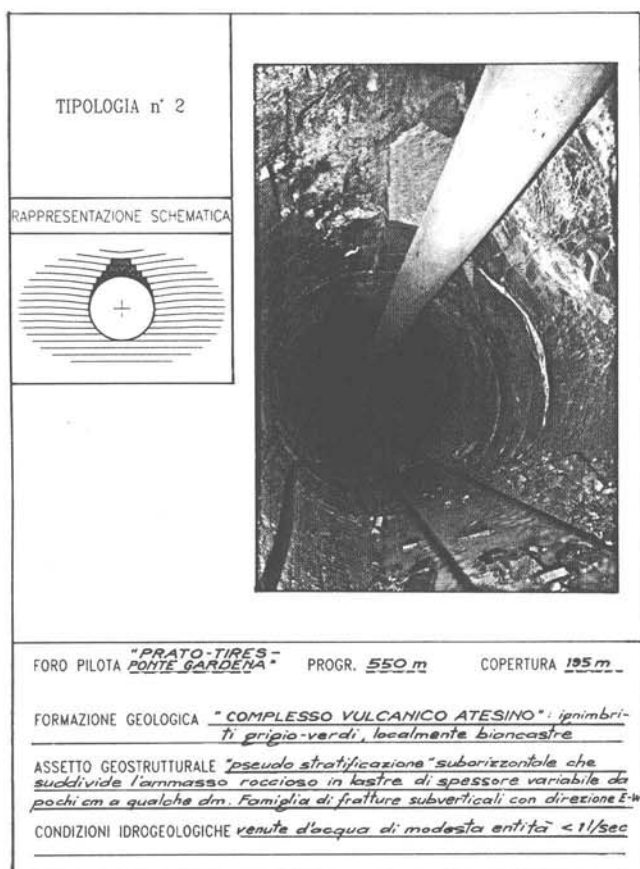


Fig. 4 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foto pilota" - caso reale.

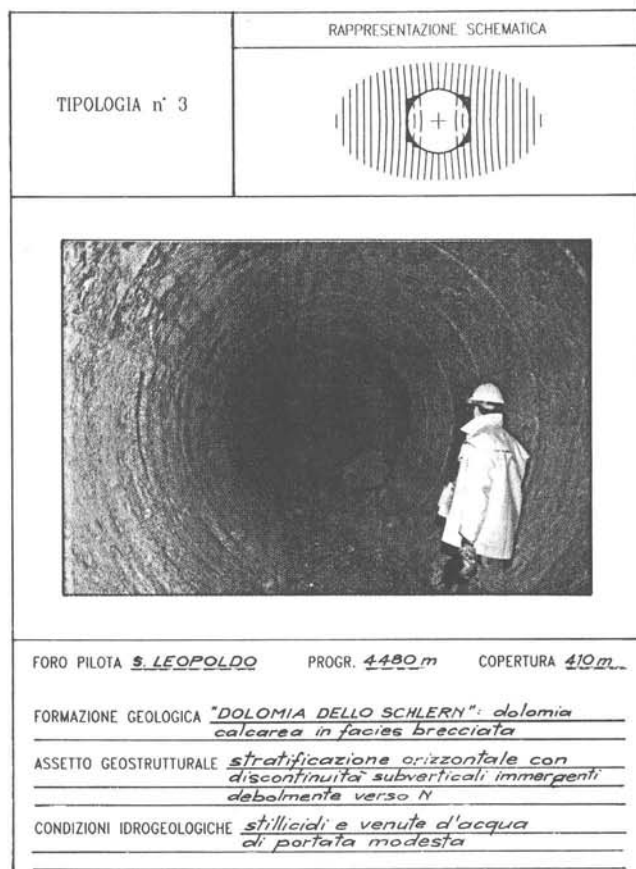


Fig. 5 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.

rocks) o in presenza di elevate coperture si possono avere altre situazioni di instabilità riconducibili a un comportamento tenso-deformativo del materiale di tipo duttile; il materiale tenderà quindi a deformarsi in modo pressochè continuo fino all'esaurimento degli sforzi in gioco. Il meccanismo deformativo può innescarsi immediatamente dopo il passaggio del fronte, per poi evolversi e completarsi, il più delle volte, un certo tempo dopo l'apertura della cavità.

### ANALISI CINEMATICA DEI FENOMENI DI INSTABILITÀ

Di seguito vengono descritte, in dettaglio, le principali tipologie di fenomeni di instabilità riscontrate durante l'esecuzione di "fori pilota" con scavo meccanizzato tramite fresa. Queste tipologie si riferiscono ai contesti geostrutturali più comunemente rinvenibili durante la realizzazione di opere sotterranee in contesti lapidei. In particolare si ritiene di poter identificare sette tipologie di instabilità (Fig. 2) di cui le prime sei riguardano pre-

valentemente rilasci di tipo gravitativo, mentre la tipologia 7 riguarda sostanzialmente una deformazione continua del materiale verso il centro del cavo, senza significativi rilasci.

Nelle Figg. 3-9 sono schematicamente rappresentati i casi reali riferiti a ciascuna delle sette tipologie dei fenomeni di instabilità descritti successivamente.

Tali figure consistono in schemi dove vengono esposti il tipo di instabilità, la sua rappresentazione grafica, la fotografia del caso reale, il nome del "foro pilota", nonché le caratteristiche geostrutturali e idrogeologiche che hanno determinato il fenomeno descritto.

Tali casi sono stati scelti fra numerosi altri analoghi, in quanto corredati da una chiara documentazione fotografica e da precisi dati utili alla ricostruzione del contesto geostutturale che ha determinato il fenomeno di instabilità.

#### Tipo 1 - Crollo determinato da un intreccio di giunti

Questa tipologia comprende rilasci gravitativi che coinvolgono blocchi lapidei

delle più svariate forme e dimensioni (Fig. 3). Il cinematismo si innesca quando la calotta della cavità appena aperta intercetta una porzione rocciosa isolata dal reticolo fessurativo esistente.

Il blocco così individuato, privato alla base del suo naturale confinamento, tende a distaccarsi dall'ammasso roccioso e a crollare all'interno della cavità; questa condizione si determina quando la resistenza al taglio presente lungo i giunti che delimitano il blocco non è sufficiente a contrastarne il peso.

Le condizioni dei giunti coinvolti nel rilascio giocano evidentemente un ruolo decisivo; assumono, in particolare, grande rilevanza gli aspetti legati all'apertura, alla rugosità e all'eventuale presenza di materiale di riempimento.

La tipologia presa in considerazione può talvolta coinvolgere anche più di un blocco nel momento in cui le condizioni geostrutturali sono tali da isolare, al di sopra della calotta, più blocchi ben definiti. Per quanto concerne, infine, la forma delle porzioni rocciose coinvolte nel franamento, questa dipenderà dalla geome-

tria delle discontinuità, mentre le dimensioni dipenderanno dalle spazature delle stesse. Generalmente questi fenomeni di instabilità avvengono subito dopo il passaggio della fresa, anche se non è da escludere che si possano verificare un certo tempo dopo l'apertura della cavità.

**Tipo 2 - Flessione, rottura e crollo di lastre rocciose in calotta**

Tale tipologia si verifica in contesti geostutturali caratterizzati dalla presenza di discontinuità (per esempio, giunti di strato, piani di scistosità, ecc.) con giacitura suborizzontale che isolano strati rocciosi di spessore ridotto. In questi casi, l'apertura della cavità può comportare il reperimento in calotta di sottili lastre di materiale lapideo non in grado di resistere ai carichi litostatici sovrastanti a causa del loro ridotto spessore. Queste, pertanto, si flettono sino a rompersi con conseguenti franamenti all'interno del cavo (Fig. 4). Tali cinematismi si verifica-

no più facilmente quando i giunti sono lisci e aperti; nel caso poi siano presenti giunti caratterizzati da materiale di riempimento di natura limoso-argillosa, il franamento può avvenire anche ad una certa distanza del fronte. Questa particolare evenienza è da imputare a fenomeni di allentamento del materiale che determinano uno scollamento della sottostante porzione rocciosa. Tali fenomeni sono ulteriormente favoriti dalla presenza di acque circolanti nelle discontinuità che suddividono l'ammasso roccioso.

**Tipo 3 - Flessione e rottura di lastre rocciose sui paramenti**

Tale cinematismo si sviluppa in presenza di un contesto geostutturale caratterizzato da discontinuità subverticali disposte parallelamente all'asse del cunicolo e aventi uno spessore ridotto, generalmente centimetrico (Fig. 5). Si isolano così delle lastre che, sottoposte a sforzi tensionali diretti verso il centro del cavo,

possono flettersi in corrispondenza dei paramenti, a causa del loro ridotto spessore, fino ad arrivare alla rottura.

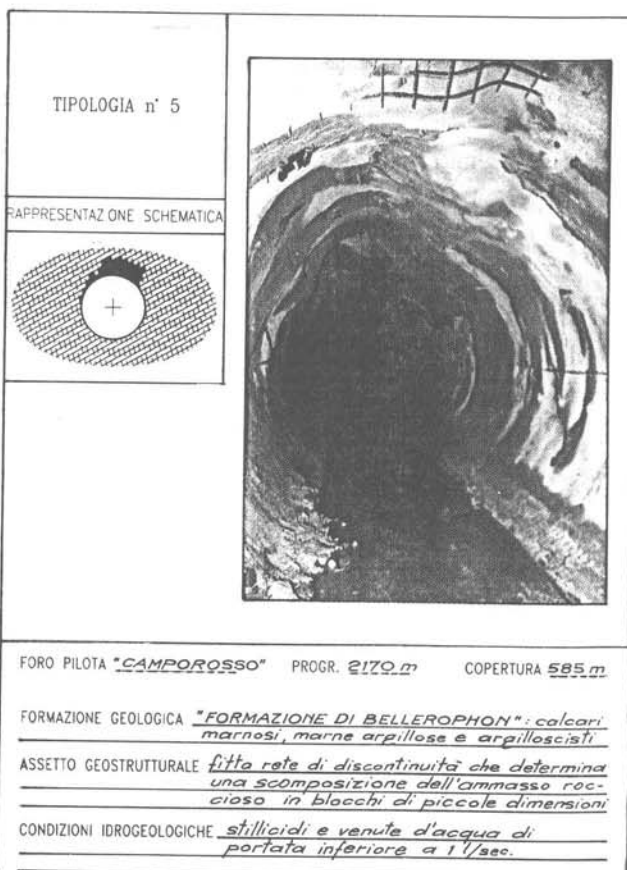
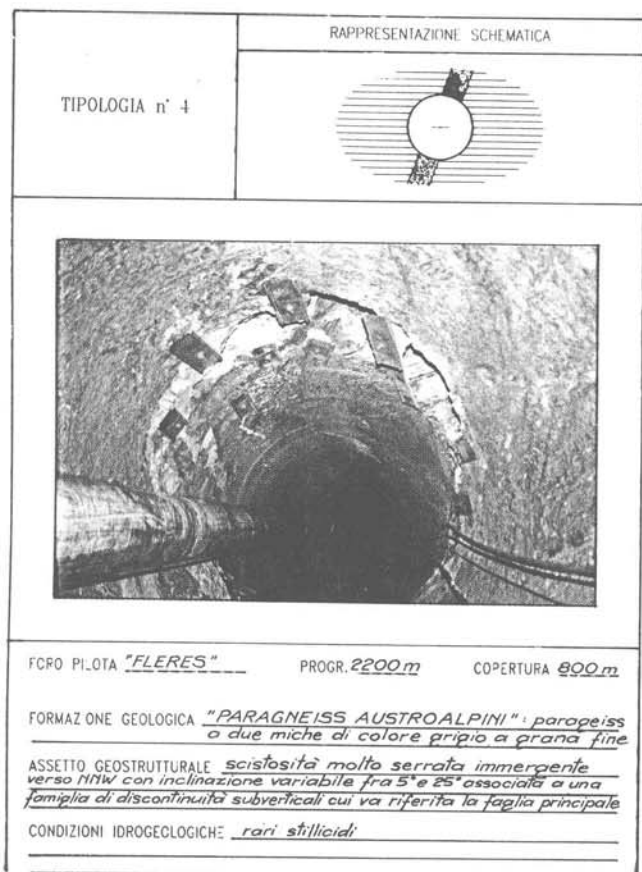
Il franamento, di tipo gravitativo, coinvolge unicamente le porzioni di lastre rocciose che si trovano, a seguito del passaggio della fresa, in condizioni di equilibrio precario.

Quando viene aperta la cavità, le tensioni presenti nel massiccio si ridistribuiscono al contorno e localmente superano la resistenza offerta dalle singole lastre che, di conseguenza, si rompono progressivamente e tendono a franare dentro il cunicolo. In tale contesto rivestono grande importanza lo spessore delle lastre (maggiore è lo spessore e maggiore è la resistenza della lastra) e la copertura in gioco (le sollecitazioni aumentano con l'aumentare delle coperture).

Va detto inoltre che la rottura della lastra può avvenire, alle volte, anche un certo tempo dopo il passaggio del fronte, quando è necessario, appunto, un certo tempo perchè si creino le condizioni tenso-deformative necessarie a portare le

Fig. 6 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.

Fig. 7 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.



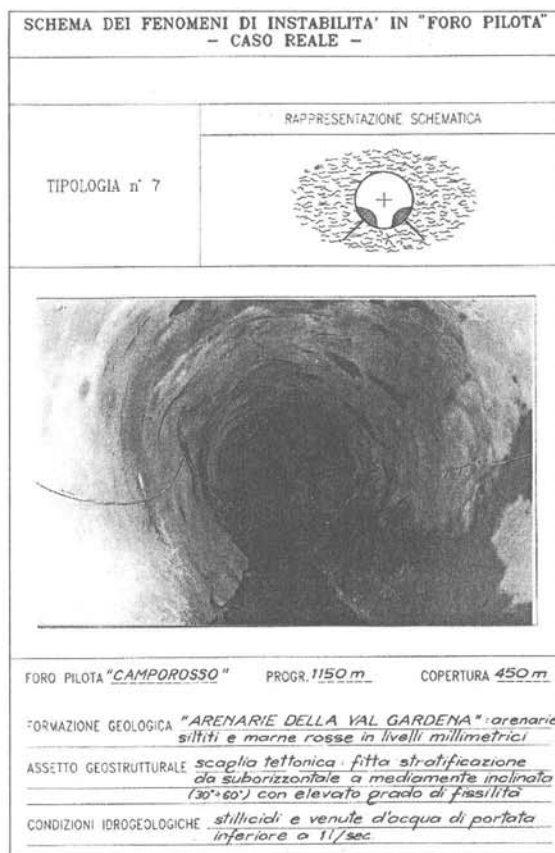
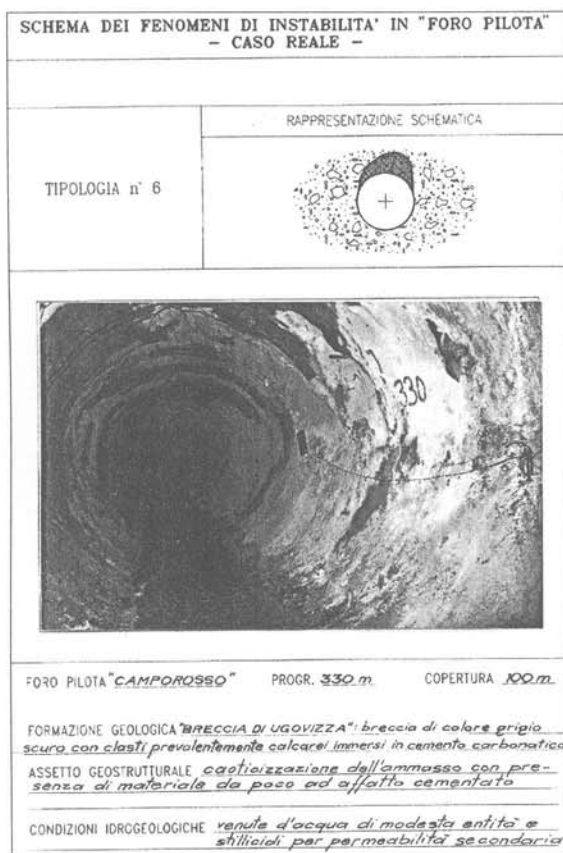


Fig. 8 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.

Fig. 9 - Schema dei fenomeni di instabilità in "foro pilota" - caso reale.

lastre a rottura. Anche per questo fenomeno di instabilità giocano un ruolo importante le condizioni dei giunti; in particolare i rilasci sono più frequenti laddove si hanno giunti lisci, aperti ed eventualmente riempiti da materiale non cementato.

#### Tipo 4 - Crollo determinato dalla presenza di un singolo elemento disgiuntivo

Questo cinematismo si verifica quando lo scavo va a intercettare una singola dislocazione tettonica che interrompe bruscamente l'esistente motivo geostrutturale (Fig. 6).

Al passaggio della fresa, il materiale di riempimento eventualmente presente all'interno delle discontinuità può invadere il cavo: in particolare, qualora tale materiale sia di natura limoso-argilloso, il franamento può evolvere anche in tempi successivi a seguito di fenomeni di progressivo allentamento del materiale stesso. Analogamente, la fascia rocciosa cataclata, localizzata ai lati della struttura tet-

tonica, può crollare all'interno della cavità a causa delle sue scadenti proprietà geomeccaniche. Inoltre, in presenza di elementi disgiuntivi di notevoli proporzioni si potranno verificare rifluimenti di materiale anche di rilevante entità. Va sottolineato che quando le dimensioni dell'elemento disgiuntivo sono di particolare rilevanza, possono verificarsi repentini "svuotamenti" della struttura coinvolgenti ingenti volumi di materiale. E' ovvio che la presenza di acqua favorisce largamente il verificarsi di tali episodi.

#### Tipo 5 - Crollo in ammasso roccioso fittamente suddiviso

Tale tipologia si manifesta con franamenti dovuti a un'intensa tettonizzazione che suddivide fittamente l'ammasso roccioso (Fig. 7). Quest'ultimo si presenta scomposto in numerosi blocchi di modeste dimensioni, direttamente a contatto fra loro ("Sugar Cubes", secondo Barton) i quali, a seguito dell'asportazione di materiale roccioso provocato dal

passaggio della fresa, vengono privati del loro naturale sostegno.

In questa nuova condizione, le ridotte porzioni lapidee, qualora non siano in grado di autosostenersi, crollano all'interno della cavità fino all'instaurarsi di nuove condizioni di equilibrio.

Questo cinematismo può coinvolgere facilmente volumi anche di rilevante entità ed è favorito dalla presenza di acqua.

#### Tipo 6 - Crollo di materiale cataclastico da poco ad affatto cementato

Tale tipologia si sviluppa quando la fresa intercetta del materiale non più propriamente lapideo il cui comportamento geomeccanico è assimilabile a quello di un materiale da poco ad affatto cementato (Fig. 8).

Si tratta per lo più di breccie, cataclasti scarsamente cementate, di limo di frizione, ecc. Lo stesso materiale è pertanto provvisto di scarsa o nulla autoportanza, tanto che tenderà a franare all'interno del cavo fino al ripristino delle nuove

condizioni di equilibrio al suo contorno. Anche in questo caso, l'eventuale presenza di acque circolanti favorisce notevolmente l'innescarsi di fenomeni di instabilità.

Qualora la natura del materiale coinvolto nel franamento sia limoso-argillosa, gli episodi di instabilità potranno evolvere anche in tempi successivi. Analogamente alla tipologia precedente, il cinematismo può interessare frequentemente volumi anche di rilevante entità.

### **Tipo 7 - Restringimento della cavità per la presenza di materiale plastico**

Tale fenomeno di instabilità si instaura quando il comportamento tenso-deformativo del materiale presente al contorno della cavità è di tipo duttile (Fig. 9).

Tale comportamento è da mettere in relazione alla natura propria del materiale coinvolto (ad esempio argilliti, limo di frizione, ecc.) e/o alla presenza di elevate coperture: quest'ultime possono infatti determinare un cambiamento del comportamento geomeccanico di una roccia da fragile a duttile. In ogni caso, la deformazione prodotta si manifesta attraverso un restringimento della cavità: questo tende inizialmente a localizzarsi in sede di piedritto, per poi eventualmente estendersi, in tempi successivi, anche ad altre porzioni della cavità.

Il fenomeno tende a evolvere gradualmente nel tempo, fino all'esaurimento degli sforzi tensionali in gioco.

In situazioni di spinte particolarmente elevate e/o in mancanza di un'adeguata e repentina messa in opera di interventi di stabilizzazione, si può pervenire alla chiusura completa del cavo.

L'eventuale presenza di acqua favorisce tale cinematismo sia nel suo innescarsi che nel suo progredire.

### **CONCLUSIONI**

Nel presente lavoro sono stati identificati e descritti i principali fenomeni di instabilità che di norma vengono osservati durante l'esecuzione di un "foro pilota". In particolare, sono state prese in esame sette tipologie di rilasci e di deformazioni, le quali presentano caratteristiche che dipendono essenzialmente dall'assetto geostrutturale degli ammassi rocciosi intercettati e dagli spessori delle coperture in gioco.

L'identificazione di queste tipologie (resa possibile grazie ad approfondite e sistematiche osservazioni effettuate durante l'esecuzione di numerosi "fori pilota" realizzati in Italia in questi ultimi anni), riveste un ruolo di assoluta priorità per l'ottimizzazione del successivo progetto della galleria. Infatti, in base a un'attenta analisi del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso manifestatosi durante lo scavo del preforo, è possibile formulare previsioni sul medesimo comportamento durante la successiva fase di allargo.

L'attendibilità di tale estrapolazione è però assolutamente imprescindibile da un'approfondita valutazione del ruolo giocato da due elementi di primaria importanza e cioè l'"effetto scala" (determinato, in questo caso, dal passaggio dalla luce del "foro pilota" a quella della galleria) e il "fattore tempo" (dove il tempo considerato è quello che intercorre fra lo scavo del cunicolo e quello della galleria).

Occorre subito precisare che mentre l'effetto scala gioca un ruolo determinante in tutte le tipologie dei fenomeni di instabilità descritte nel presente lavoro, il fattore tempo riveste un ruolo di assoluta rilevanza solo nell'ambito dei fenomeni di instabilità che si verificano in ammassi rocciosi a comportamento duttile; in questi casi, infatti, l'incremento della deformazione è in gran parte legata al trascorrere del tempo, con condizioni al contorno della futura galleria che varieranno sensibilmente in funzione del tempo trascorso dall'apertura del cunicolo.

In sintesi, si può quindi affermare che, per procurarsi, attraverso l'analisi cinematica dei fenomeni di instabilità avvenuti in cunicolo, elementi di grande utilità per la progettazione, si dovrà attentamente seguire il seguente percorso: Identificazione della tipologia di instabilità riscontrata in "foro pilota" rappresentativa di un particolare contesto geostrutturale → Valutazione dell'"effetto scala" e del "fattore tempo" → Previsioni sul comportamento dell'ammasso roccioso in fase di allargo. In concreto, attraverso questo procedimento, si potranno definire, per lo scavo di allargo, sia i volumi di materiale potenzialmente coinvolti in cinematismi di tipo gravitativo sia gli incrementi dei fenomeni deformativi.

In conclusione, attraverso il presente lavoro si è prevenuti al convincimento che i complessi procedimenti metodologici

che possono consentire un efficace e veritiero utilizzo, ai fini progettuali, dei dati riguardanti i fenomeni di instabilità avvenuti in "foro pilota", debbano essere affrontati considerando specifiche tipologie di instabilità che rispecchiano altrettanto specifici contesti geostrutturali. Da parte degli scriventi sono pertanto già in corso ulteriori ricerche mirate alla definizione di attendibili "chiavi di lettura" che consentano realistiche previsioni sul comportamento dell'ammasso roccioso in sede di allargo per ciascuna delle sette tipologie individuate nel presente lavoro.

**Pietro Lunardi**

(Università degli Studi di Parma)

**Massimo Campana**

(Geologo - Rocksoil s.p.a., Milano)

**Monica Papini**

(Ricercatrice - Politecnico di Milano, D.S.T.M., sezione Geologia Applicata)

### **BIBLIOGRAFIA**

Atti della Giornata di Studio 1978 "Scavo di galleria in roccia con fresa a piena sezione". Torino, 12 Aprile 1978

BECCHI I., CALISTRI E., LUNARDI P., ORSI S. 1986: "Nuovi orientamenti nella progettazione delle gallerie mediante foro pilota. Atti Convegno Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo", Firenze, 2

COMIN C., MONTANARI L.F., NICOLINI A., PIZZAROTTI E.M., 1986: "Il cunicolo pilota realizzato con fresa: i suoi riflessi nella progettazione ed esecuzione di gallerie ferroviarie. Atti Convegno "Gallerie e Grandi Opere in Sotterraneo, Firenze, 1.

GOODMAN R.E. 1976: Methods of geological engineering in discontinuous rocks. West Publishing Co., St. Paul, Minnesota.

GOODMAN R.E. ET AL. 1985: "Block Theory and its application to rock engineering. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliff., New Jersey."

GOODMAN R.E. 1989: "Introduction to rock mechanics". J. Wiley & Son, New York.

KOVARI K. 1993: "Teorie e modelli di comportamento dei terreni nell'evoluzione dei sistemi progettuali e costruttivi: i metodi analitici". I Corso Interdisciplinare di Geingegneria - Le Opere in Sotterraneo, Parma.

LUNARDI P. 1986: "Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota". Primo Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle rocce. Politecnico di Torino (MIR).

RAMSAY J.G., MARTIN H.I. 1987: The techniques of modern Structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. Academic Press, London.

RAMSAY J.G., MARTIN H.I. 1989: The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain Analysis. Academic Press, London.