

# Misure di controllo in una galleria in roccia

M. BEOMONTE\*, A. LUPO\*\*

**SOMMARIO:** Sono descritte le misure effettuate nel corso della costruzione della galleria di valico di Forca Canapine. Trattasi di una galleria stradale della lunghezza di m 4430 nelle rocce calcaree dell'Appennino Umbro-Marchigiano. Sono state effettuate misure di convergenza, misure delle deformazioni dell'anello di roccia circostante allo scavo, misure di sollecitazioni radiali e tangenziali nel calcestruzzo di rivestimento e misure del modulo di deformabilità della roccia. Queste ultime con il metodo del martinetto piatto, sia a ridosso dell'avanzamento che lontane dal fronte di scavo, nonché nel foro pilota che ha preceduto lo scavo di avanzamento a piena sezione.

## 1. Premesse

La galleria di S. Benedetto collegherà le Province di Ascoli Piceno e Perugia sottopassando l'attuale valico di Forca Canapine<sup>1</sup>.

Essa si sviluppa intorno a quota 1000 s.l.m. per una lunghezza di circa 4400 m ed una copertura massima di circa 600 m.

È pertanto uno dei valichi Appenninici più impegnativi della rete stradale nazionale.

## 2. Accertamenti preliminari

La sezione è a ferro di cavallo con raggio di intradosso in calotta di m 5,10.

Dalle indagini preliminari di progetto risulta che la galleria avrebbe attraversato le sequenze carbonatiche del Lias inferiore e medio appartenenti alla serie umbra e cioè le formazioni di Calcarea Massiccio, Corniola con megabrecce e Corniola stratificata e fratturata.

Prima di iniziare i lavori di scavo venne deciso di realizzare un sondaggio orizzontale praticabile lungo tutto lo sviluppo della galleria allo scopo di conoscere preventivamente ed in modo diretto e completo la natura e lo stato della roccia, cosa che non sarebbe stato possibile ottenere con altri metodi di indagine.

Il sondaggio orizzontale era costituito da un foro circolare di m 3,60 di diametro, ubicato nella zona di calotta della sezione trasversale della galleria.

La natura geologica, i caratteri strutturali dell'am-

masso roccioso, nonché tutti i dati significativi emersi durante lo scavo, sono stati rilevati sistematicamente metro per metro, di pari passo con la realizzazione dello scavo e riepilogati in apposite schede, in forma grafica ed analitica, per tratti di m 10,00.

La notevole massa di dati raccolti è stata integrata con alcune perforazioni di sondaggio geognostico, eseguite dall'interno del cunicolo, allo scopo di verificare i valori dell'indice RQD valutati sulla base dei rilevamenti effettuati. Sul fondo dei sondaggi sono state effettuate prove pressiometriche con il pressimetro Menard, rilievi di profili sismici e, sui provini di roccia prelevati dal carotaggio, misure di velocità delle onde elastiche longitudinali e quindi prove di compressione assiale con misura delle deformazioni assiali e trasversali e prove di rottura a trazione (prova brasiliana).

I risultati di tutte le misure e prove effettuate sono riportati nella tabella 1.

Tabella 1. - Valori caratteristici dell'ammasso roccioso

|   | Calcarea massiccio | Corniola    |
|---|--------------------|-------------|
| Peso unità di volume (kN/m <sup>3</sup> ) | 26-27              | 27          |
| Resistenza compressione (MPa)             | 100-120            | 35-60       |
| Modulo elasticità (MPa)                   | 22500-55000        | 30000-60000 |
| Velocità onde elastiche (km/s)            | 4,0-4,5            | 4,2-5,6     |

## 3. Descrizione delle misure di controllo

Sulla base degli accertamenti eseguiti sia inizialmente nella fase di progetto, sia in particolare ed in modo più completo ed esaustivo nella fase di esecuzione del foro pilota di indagine geognostica, i lavori di esecuzione della galleria si sono potuti programmare con sufficiente probabilità di conferma

<sup>1</sup> I lavori sono stati eseguiti dall'Impresa Ferrocemento S.p.A. - Roma. L'alta sorveglianza è stata espletata dal Dipartimento Viabilità dell'Agenzia per la Promozione dello Sviluppo del Mezzogiorno - Roma (Ing. E. Sammarco - Ing. C. Facondo - Ing. E. Russo).

\* M. Beomonte: Amministratore Delegato della C. Lotti & Associati S.p.A. - Roma, Italia.

\*\* A. Lupo: Dirigente della C. Lotti & Associati S.p.A. - Roma, Italia.

delle ipotesi di comportamento dell'ammasso roccioso ai fini del dimensionamento del sostegno provvisorio in fase di scavo e di quello definitivo, nonché delle modalità di scavo e rispetto delle norme di sicurezza.

Per un puntuale controllo del comportamento dell'ammasso roccioso in fase di scavo e per una conferma dei valori delle caratteristiche geomeccaniche della formazione, sono state programmate ed eseguite, durante i lavori, una serie di misure di controllo e precisamente:

- modulo di deformabilità della roccia
- misure di convergenza
- misure di deformazione radiale dell'ammasso roccioso all'intorno del cavo
- misure di sollecitazione nel calcestruzzo di rivestimento definitivo.

Nella figura 1 sono riportati gli schemi delle stazioni di misura delle varie prove di controllo.

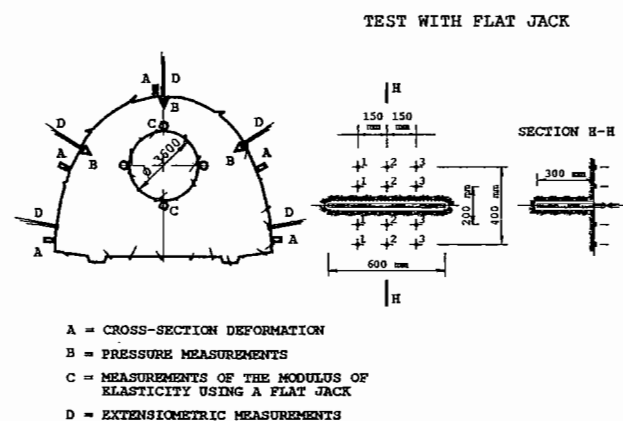


Fig. 1. - Schemi delle stazioni di misura.

### 3.1. Misure di deformabilità con martinetto piatto

Le prove sono state eseguite in due sezioni abbastanza rappresentative dell'ammasso roccioso, sulle pareti del foro pilota e poi su quelle dello scavo a piena sezione della galleria a ridosso del fronte di avanzamento a distanza sufficiente da non influenzare il comportamento dell'ammasso roccioso. Scopo dell'indagine era la determinazione dello stato di sollecitazione della roccia e del modulo di elasticità sulle pareti del foro pilota e della galleria a piena sezione e cioè per due differenti sezioni di scavo rispettivamente di 10 e 100 m<sup>2</sup>.

È stata utilizzata una tecnica di prova in situ di tipo non distruttivo. La tecnica di prova si basa sulla variazione dello stato tensionale in un punto della parete provocata da un taglio piano in direzione normale alla superficie dello scavo. Il rilascio delle tensioni provoca una parziale chiusura del taglio che viene rilevata attraverso misure di convergenza fra coppie di punti posti in posizione simmetrica rispetto

al taglio e viene quindi inserito un martinetto piatto la cui pressione interna viene gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata in fase di rilascio<sup>2</sup>.

In tali condizioni la pressione misurata è uguale alla sollecitazione preesistente nella roccia, a meno di una costante sperimentale di taratura del martinetto che dipende altresì dal rapporto fra area del martinetto e area del taglio.

I risultati delle prove sono riepilogati nella tabella 2.

Per il calcolo del Modulo di elasticità si è utilizzata la formula valida per materiale omogeneo isotropo ed elastico

$$E = \frac{\sigma a}{d} \left\{ \left( 1 - \nu \right) \left[ \left( 1 + \frac{b^2}{a^2} \right)^{1/2} - \frac{b}{a} \right] + \left( 1 + \nu \right) \left( 1 + \frac{b^2}{Q^2} \right)^{-1/2} \right\}$$

dove:

- E = modulo di deformabilità (MPa);
- $\sigma$  = pressione di ripristino (MPa);
- a = apertura del taglio (cm);
- d = spostamento misurato;
- $\nu$  = coefficiente di Poisson (assunto pari a 0,2);
- b = lunghezza della base di misura (cm).

Pur non potendosi parlare di valori medi significativi dei valori trovati, si possono però trarre alcune interessanti conclusioni.

Si nota intanto una netta differenza fra il modulo di elasticità accertato nel cunicolo e quello ricavato dalle misure effettuate nella sezione di scavo della galleria.

Il valore del modulo non appare influenzato invece dalla distanza del fronte di avanzamento.

La notevole differenza in valore assoluto fra i valori della sezione 1 (più regolari) e quelli della sezione 2 non trova riscontro in notevoli differenze di comportamento dell'ammasso roccioso al contorno dello scavo nel suo complesso: la prova appare cioè influenzata dalle condizioni locali puntuali e può avere maggiore e significativa validità aumentando il numero delle sezioni di prova.

Specie per quanto riguarda i valori della sezione 1, questi risultano compresi fra 250.000 e 750.000 kg/cm<sup>2</sup> e cioè abbastanza concordi con quelli determinati negli accertamenti preliminari.

### 3.2. Misure di convergenza

Con l'inizio degli scavi di avanzamento sono procedute di pari passo misure di convergenza in complessivamente 58 sezioni trasversali (55 utili).

<sup>2</sup> Le prove sono state eseguite dall'Istituto Modelli e Strutture (ISMES) di Bergamo, Italia.

Tabella 2. - Risultati delle prove con martinetto piatto

| N. prova         | Tipo                | Sollecitazione (MPa) | Modulo E (MPa) |         |              |         |
|------------------|---------------------|----------------------|----------------|---------|--------------|---------|
|                  |                     |                      | Ciclo normale  |         | Ciclo rapido |         |
|                  |                     |                      | carico         | scarico | carico       | scarico |
| <b>SEZIONE 1</b> |                     |                      |                |         |              |         |
| 1                | Cunicolo            | 19,25                | 40420          | 45150   | 43840        | 45530   |
| 2                | Cunicolo            | 9,66                 | 22150          | 25650   | 24810        | 25260   |
| 3                | Cunicolo            | 19,26                | 77440          | 77800   | 77800        | 77800   |
| 4                | Cunicolo            | 6,88                 | 42420          | 42720   | 43330        | 44290   |
| 5                | Gall. vicino av.to  | 4,33                 | 3840           | 5170    | 4820         | 5010    |
| 6                | Gall. vicino av.to  | 7,04                 | 11410          | 15650   | 14880        | 15260   |
| 7                | Gall. lontano av.to | N.D.                 | —              | —       | —            | —       |
| 8                | Gall. lontano av.to | 4,62                 | 13520          | 15680   | 15480        | 16170   |
| <b>SEZIONE 2</b> |                     |                      |                |         |              |         |
| 9                | Cunicolo            | 4,11                 | 2850           | 3990    | 3460         | 3730    |
| 10               | Cunicolo            | N.D.                 | —              | —       | —            | —       |
| 11               | Cunicolo            | N.D.                 | —              | —       | —            | —       |
| 12               | Cunicolo            | N.D.                 | —              | —       | —            | —       |
| 13               | Gall. vicino av.to  | 1,03                 | 1140           | 1500    | 1660         | 1570    |
| 14               | Gall. vicino av.to  | 1,75                 | 960            | 1570    | 1420         | 1690    |
| 15               | Gall. lontano av.to | 1,71                 | 1590           | 1620    | 1650         | 1700    |

Le misure di convergenza venivano eseguite di norma, con frequenza giornaliera, nei primi giorni di installazione per essere poi diradate a frequenza settimanale o più, in relazione al gradiente di variazione delle letture.

In generale, la stabilizzazione si è verificata entro periodi compresi fra qualche giorno ed il mese.

Per la misura di convergenza più significativa e cioè quella del diametro di calotta, i 55 valori utili sono stati analizzati in modo statistico come risulta dai due abachi della figura 2 in cui sono riportate le frequenze delle due variabili più significative e cioè il periodo di tempo, in giorni, entro il quale si è verificata la stabilizzazione della convergenza ed il valore massimo in mm raggiunto.

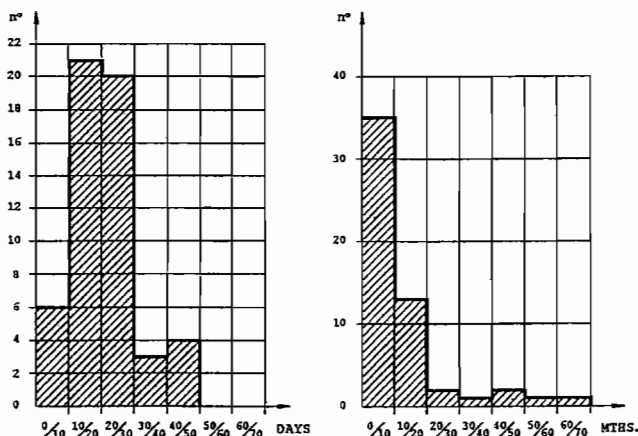


Fig. 2. - Distribuzione statistica delle misure di convergenza.

Come si vede, la maggior parte dei valori di durata sono compresi nel periodo 10/20 e 20/30 giorni.

La modesta coda, per durata inferiore ai 10 giorni, è da attribuirsi alle letture nella formazione del Calcarea Massiccio e della Corniola e megabrecce, mentre la modesta coda oltre i 30 giorni di durata è attribuibile indifferentemente ai tre tipi di formazione che, pertanto, sostanzialmente si equivalgono salvo il marcato riscontro nella formazione della Corniola fratturata di periodi di stabilizzazione di brevissima durata.

Analogamente, le misure dei valori finali di convergenza sono concentrate nel campo dei 10 mm e, in minor misura, fra i 10 ed i 20 mm.

La modesta coda dei valori maggiori si è verificata solo nella formazione della Corniola fratturata a conferma, in analogia con la durata della stabilizzazione, di un più scadente comportamento elastico di detta formazione.

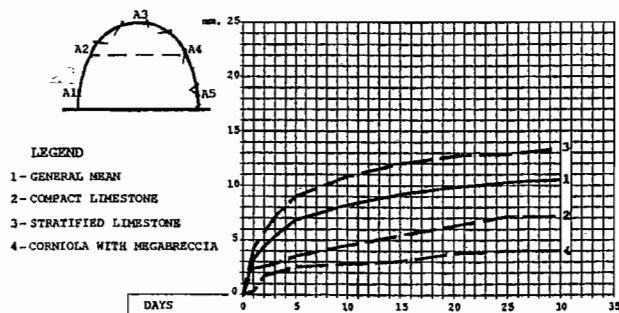


Fig. 3. - Curve caratteristiche di convergenza.

La stessa conferma si ritrae dalla figura 3 dove sono rappresentate le curve caratteristiche di convergenza, sempre per il diametro di calotta nelle tre formazioni e quindi il valore medio per tutta la galleria.

Tali curve, nel confermare una non sostanziale differenza di comportamento fra le tre formazioni, evidenziano comunque le migliori caratteristiche di deformabilità della Corniola a megabrecce, anche rispetto al Calcare Massiccio, peraltro già riscontrabile nei valori del modulo di elasticità accertati in sede di indagini preliminari.

### 3.3. *Misure estensimetriche*

Sono state impostate 5 sezioni trasversali di misura con 5 misure radiali di deformazione della roccia entro fori di lunghezza 3, 6 e 9 metri per un totale di 75 serie di misure.

Per le stazioni di misura di due sezioni trasversali le misure sono state proseguite anche dopo l'avvenuto rivestimento definitivo dello scavo.

Nei due anni di periodo di osservazione non è stata registrata alcuna deformazione a rivestimento avvenuto.

Per quanto invece riguarda le letture eseguite durante la fase di sostegno provvisorio, le letture sono state estremamente variabili e in discordanza fra loro per cui nessuna indicazione o elaborazione statistica si è potuta sviluppare sui dati raccolti.

### 3.4. *Misure pressiometriche*

Sono state strumentate sei sezioni trasversali del rivestimento definitivo, ciascuna con cinque coppie di celle pressiometriche poste in posizione radiale e tangenziale in modo da poter misurare le pressioni relative secondo le due direzioni fra loro ortogonali e rispettivamente normali e tangenziali rispetto alla superficie del rivestimento.

La distribuzione dei valori delle sollecitazioni misurate è risultata abbastanza concentrata nell'intorno dello zero con oltre il 70% dei valori compresi fra zero e  $1\text{kg/cm}^2$  sia per le sollecitazioni radiali che per le tangenziali.

I valori medi sono risultati rispettivamente di  $1,48\text{kg/cm}^2$  di compressione per le sollecitazioni tangenziali e di  $0,83\text{kg/cm}^2$  di trazione per le sollecitazioni radiali.

Trattasi ovviamente di valori non significativi come valori assoluti, ma di conferma di assenza di sollecitazioni apprezzabili nel calcestruzzo di rivestimento.

#### SUMMARY

##### Measurements in a tunnel in rocks

The measurements taken during the construction of the tunnel under the Forca Canapine pass are described. A road tunnel 4,430 m long was driven in the calcareous rocks of the Apennines chain in Umbria and the Marche. The following measurements were taken: the cross-section deformation; the deformation of the rock ring surrounding the excavation; the radial and tangential stresses in the concrete lining; the modulus of elasticity. The latter were made using a flat jack, both behind the tunnel heading and at some distance from the faces, as well as in the pilot tunnel which was excavated prior to the full section heading.