

# Slow deformation of high rock slopes and their influence on hydraulic structures

Albino Lembo-Fazio\*, Renato Ribacchi\*\*,  
Maurizio Sciotti\*\*

## Summary:

Deformations of high rock slopes are often characterized by very low velocities so that sometimes they are recognized only because they interfere with pressure tunnels or penstocks. Two typical cases occurring in the Adda valley (Northern Italy) are discussed and the solutions adopted in order to maintain the plant in operation are presented.

## 1. Introduction

Geomorphologic evidence suggesting that many high slopes in the Alpine range have undergone deep-seated gravitational deformations was already described many years ago, for instance by STINI [1941] and ZISCHINSKI [1966]. Reviews of many cases in the world were provided by RADBRUCH-HALL [1979] and by HUTCHINSON [1988], who also proposed a classification scheme.

It is frequently assumed that in the Alps these phenomena began at the end of the last glacial era, when the slopes of the valleys excavated by the glaciers were no longer supported by the pressure of the ice. Although these phenomena may affect many rock types, they are more frequently found in crystalline schists with well developed foliation [GIRAUD *et al.*, 1990].

As the displacement rates are often small, sometimes only a few millimetres a year, it is not always easy to ascertain whether the slopes are still moving or whether they have reached a stable configuration; it is even more difficult to define the characteristics of the deformation in depth, that is whether it is localized along distinct shear surfaces or whether it is more or less continuous. In some cases, the actual deformation of the slope was detected only because it interfered with engineering structures, typical examples being road tunnels [SPAUN, 1979], pressure tunnels [BAKER, 1991] and penstocks founded on the slope surface [BEAUJOINT and MARTIN, 1966].

A recent survey of subsurface investigations carried out in Switzerland in several sites of large un-

stable zones [BONNARD *et al.*, 1996; NOVERRAZ, 1996] has shown that in most of these cases creep deformation is confined to well developed slide surfaces, although a diffuse deformation is sometimes present.

In a geotechnical setting where slope movements interfere with hydraulic tunnels or penstocks the following options can be envisaged:

- the plant is kept at the surface and provision is made to compensate the movements; a monitoring system is installed in order to give early warning in case of instability
- the pressure conduit is relocated inside the rock mass, below the zone affected by the displacement
- the slope is stabilised with a network of tunnels and drainage holes.

In the following, two typical cases of slow slope movements occurring in the Adda Valley will be concisely discussed and the adopted solutions presented.

## 2. Lanzada Plant

The characteristics of the site are illustrated in Fig.1. Water is conveyed from the Campo Moro reservoir to the Lanzada power-house by means of a concrete-lined pressure tunnel (80 metre hydraulic head) and a 900 metre-high surface penstock. The penstock rests upon saddles and is anchored to nine concrete blocks (V1-V9). Downstream from each block an axial joint in the pipe allows for relative displacements of the pipe segments.

The slope is about 1200 m high; its mean inclination is 36° on average with some stretches reaching 50°. The bedrock is formed by micaschists and serpentines, their foliation dipping towards the mountain. Some drilling up to 50 m depth have shown the rock to be highly fractured with marked core discing in some stretches.

Uniaxial compression strength values of about 120 MPa and 50 MPa were obtained for intact samples respectively of serpentines and micaschists. Joints in the serpentine are characterised by friction angle values of 46° and 40° ( $c'=0$ ), respectively in peak and residual conditions; the corresponding values for the micaschists were 46° and 34°.

A photogeologic survey shows that the mountain ridge is affected by an evident "sagging". The morphology of the spur where the penstock is located is shown in Fig.1; the profile is irregular and characterised by terraces delimited by steep scarps; locally one can observe longitudinal linear trenches, furrows or deep gaping fractures (indicating tensile strains in the rock), as well as outcrops of highly fractured and loosened rock which could represent zones of high shear and compression strains.

\* III Università di Roma.

\*\* Università di Roma "La Sapienza".

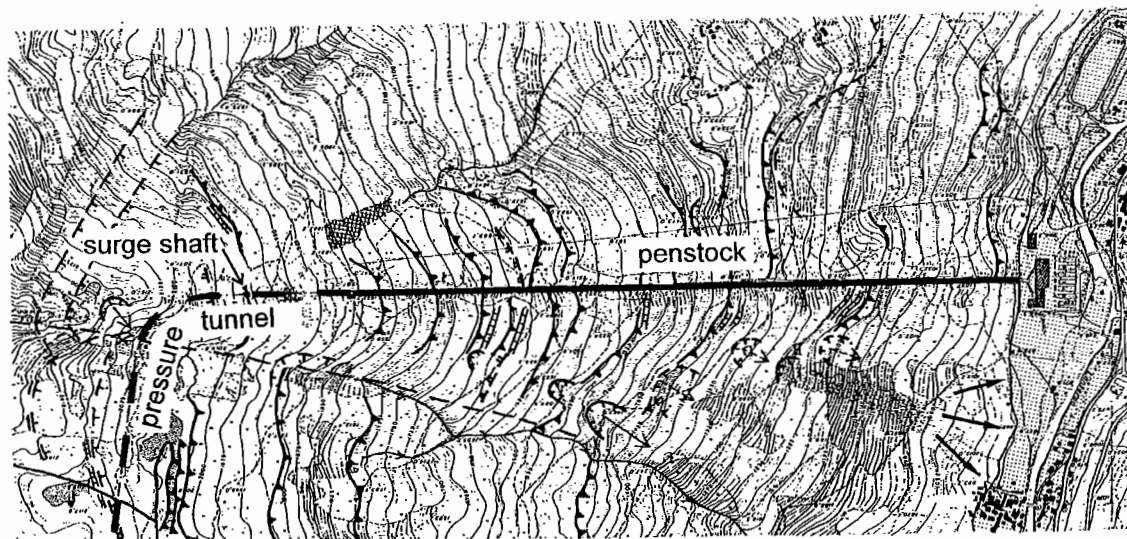
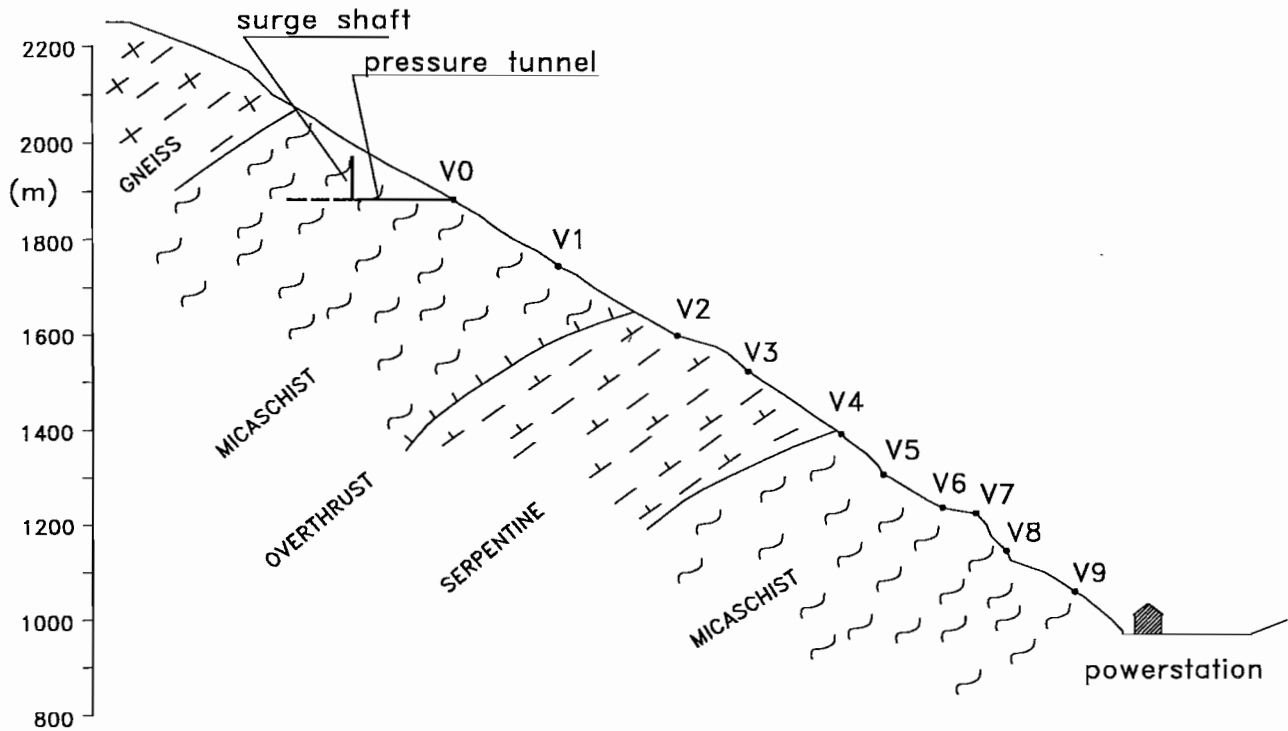


Fig. 1 – Plan and geological section of the slope above the Lanzada powerstation showing the anchorage blocks of the penstock (V1 - V2) and the terminal part of the pressure tunnel. The main structural and geomorphological elements observed on the slope are indicated in the plan.

*Fig. 1 – Pianta e sezione del versante sovrastante la centrale di Lanzada con l'indicazione dei blocchi di ancoraggio della condotta e del tratto terminale della galleria in pressione. Nella pianta sono riportati i principali elementi geomorfologici e strutturali rilevati; nella sezione le formazioni geologiche interessate.*

The plant commenced operation in 1958; a few years later cracks in the basal concrete slab of the penstock, in the lateral walls and in many saddles were observed, as well as sliding between the pipe

and the saddles and along the joints of the pipe. This situation required constant maintenance with reconstruction of some saddles and removal of pipe segments at the joints.

The evolution of the slope deformation could be monitored by means of gages for the determination of the relative sliding of the joints of the pipe (Fig. 2), the latter behaving as a very long base extensometer. Further indications on the longitudinal ground movement are given by the relative displacement at the contact between the pipe and the saddles. For a complete analysis of the displacement field, absolute displacements of the anchorage blocks of the penstock were also determined by means of a topographic survey network, although these latter measurements are affected by greater uncertainty, owing to the unfavourable characteristics of the network (Fig. 3).

Notwithstanding the marked scatter of the individual data, the general trend that can be inferred is quite clear: the movements occur at a seemingly constant rate over the years. No influence of the average annual rainfall or of intense rainfall episodes could be detected.

Fig. 4 shows the average velocity vectors of the blocks over a 15 year observation period. The movement affects a zone of the slope comprised between an elevation greater than that of the tunnel and the elevation of block V4, at an average velocity of 15-25 mm/year; below block V4 much smaller velocities (about 2-4 mm/year) have been observed. The average pipe sliding rates at the joints (also shown in Fig. 4) are in agreement with the absolute displacements of the blocks.

The slope deformation pattern determined on the basis of the characteristics of the fractures in the slab and in the retaining walls clearly indicate that some of them were caused by tensile strains, others by compression or shear strains, in a way which is

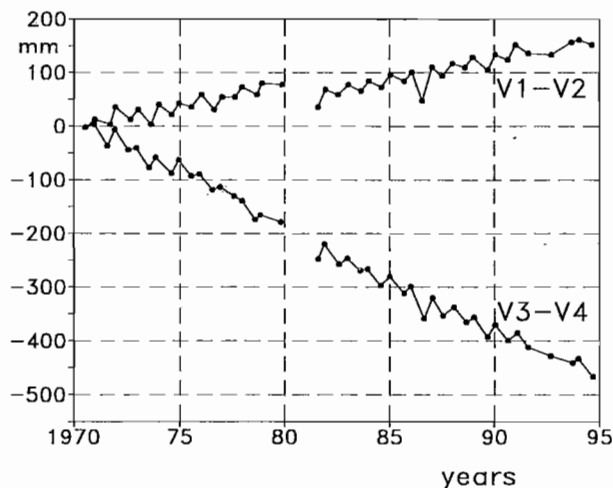


Fig. 2 - Relative sliding of two joints of the penstock (between blocks V1 and V2 and between V3 and V4); extension is taken as positive.

*Fig. 2 - Andamento degli scorrimenti relativi rilevati in due giunti della condotta (rispettivamente tra i blocchi V1 e V2 e tra i blocchi V3 e V4). Sono considerati positivi gli scorrimenti relativi di estensione.*

fairly consistent with the deformation pattern of the slope determined on the basis of the movements of the monitored blocks. In particular shear failures (one of them showing a large displacement) are observed in the basal slab a few meters above block V4; they probably correspond to the outcropping of deep shear surfaces in the rock mass.

It is to be noted that the pipe joints allow compensation only for the longitudinal differential movements so that the transversal components of the pipe deformation between any two blocks are also monitored; these components can induce abnormal stresses which, however, have thus far been very modest with respect to the design stresses related to the water pressure.

The slope movement also affects the final portion of the pressure tunnel and transversal fractures have been observed in the lining for depths down to 150 m below ground surface. In the damaged zones a steel liner was installed; however, it is to be expected that slope movement will in the long term also affect the steel liner.

In order to maintain the plant in operation, the option of keeping the penstock at the surface has been adopted for the time being, on the grounds that the movements have been occurring at a constant rate for many years. A system for adjusting (both vertically and transversally) the pipe supports on the saddles has been installed in the more critical zones (block V3 - V4) and further improvements can be developed if required. A real-time monitoring system and an early warning system for the detection of joint displacements was installed; given the conditions of the site, this type of measure is more accurate and can be more easily automated than topographic surveying. Since the movement affects also the outermost portion of the pressure tunnel, the latter could be replaced in this area by an unrestrained pipe.

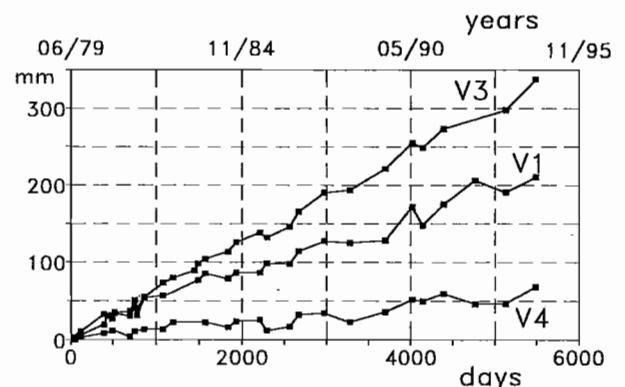


Fig. 3 - Displacements of three blocks determined by topographic surveying; only the components along the penstock are represented.

*Fig. 3 - Componenti lungo l'asse della condotta degli spostamenti di tre blocchi di ancoraggio.*

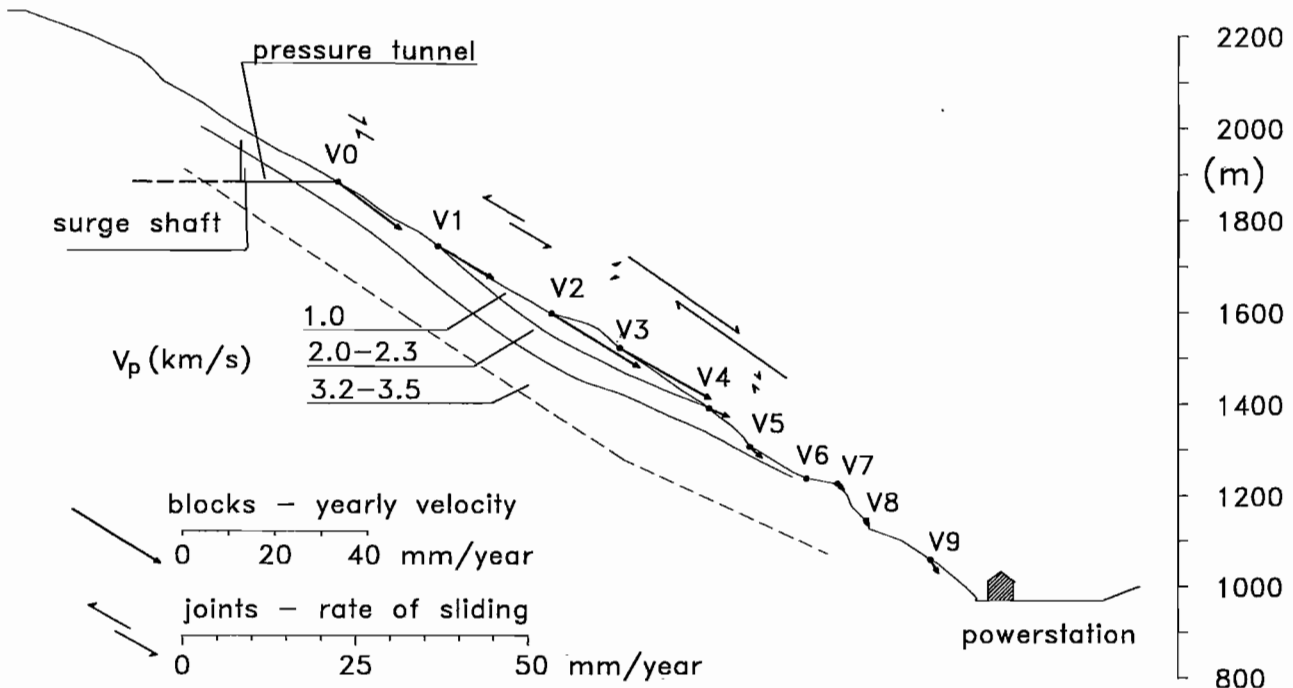


Fig. 4 - Average yearly displacement rates of the anchorage blocks (components in the plane of the section) and yearly sliding rate of the pipe joints between the blocks. The seismic velocity in the bedrock are also shown.

Fig. 4 - Velocità medie dei blocchi di ancoraggio e velocità di scorrimento relativo in corrispondenza dei giunti tra i blocchi. Nel basamento roccioso sono indicate le zone caratterizzate da diverse velocità delle onde elastiche.

For a better assessment of the present instability conditions of the slope and in order to evaluate the feasibility of a relocation of the conduit, it is necessary to know the extent of the deforming zones and the hydraulic conditions of the slope.

Preliminary indications were obtained through a seismic refraction investigation whose results are summarised in Fig.4. In the zone of the unstable slope, a rock layer with a seismic velocity less than 2 km/s, and varying in thickness from 50 to 100 m was found; in this layer the rock mass is undoubtedly highly broken and loosened. In the underlying basement the seismic velocity along the slope dip is 3.2-3.5 km/s, a value which is lower than that expected for a sound rock mass; it is possible therefore that the movement may involve a part of this zone as well. Indeed, inside the pressure tunnel, failures in the lining are present at around 150 m below the surface, whereas the low-velocity layer is 50m thick in this zone.

The exploration phase will be completed by instrumenting the slope with inclinometers and piezometric pipes driven down to a depth of 150-200m. The difficulties in obtaining reliable results with inclinometric measurements at such great depths are well known, but it is felt that an adequate installation technique may enable to obtain satisfactory results, as was the case in a similar geotechnical situation in Canada [BAKER, 1991].

### 3. Grosotto Plant

Another deep-seated slope deformation, but at rates of around one order of magnitude less, has affected the 300 m high penstock above the Grosotto power-house (Fig. 5) [BORSETTO *et al.*, 1986]. The penstock, which was built in 1910, is located at the base of a slope which is some 1400 m high and whose profile is decidedly convex; the inclination ranges from around 35° in the penstock area to some 25° in the upper part of the slope.

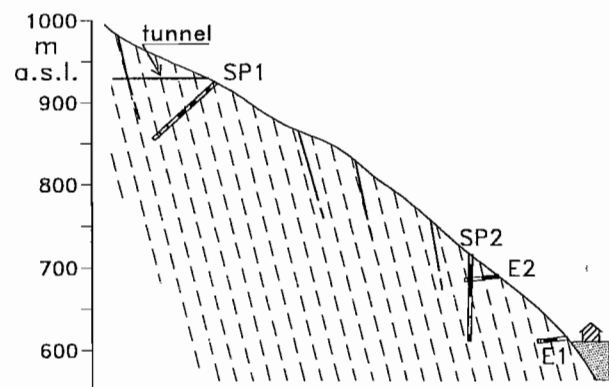


Fig. 5 - Profile of the slope above the Grosotto powerstation; the exploratory boreholes (SP1, SP2, E1, E2) and the zones of intensely sheared rock observed in the boreholes (in black) are indicated.

Fig. 5 - Profilo del versante sovrastante la centrale di Grosotto; sono indicati i sondaggi esplorativi (SP1, SP2, E1, E2) e le zone di taglio osservate in questi sondaggi (in nero).

The mountain range below which the penstock is located is affected for tens of kilometres by extensive gravitational deformations, evidenced by ridge spreading and both downslope scarps and upslope counterscarps [FORCELLA, 1984]. The lower portion, which is characterised by terraces that are delimited by steep walls, gives the impression of having bulged and spread towards the valley, almost reaching the Adda riverbed (Fig. 6).

In the zone of the penstock, the rock mass consists of schists with quartzite layers; in two exploratory drillings down to a depth of 100 m (Fig. 5), intense fracturing of the rock and many shear zones up to one metre thick consisting of coarse-grained sands, slickensided scales and sandy-grained material was observed. The rock mass is highly permeable and the water level was not reached.

Topographic surveys (Fig. 7) have shown that the foot of the slope and the lower anchorage block are moving by about 3-4 mm/year with a 15° upward dip. The pressure applied by the slope and by the penstock to the power house has caused intense fissuring in the building and above all in the support structures of the hydraulic machines. In the upper part of the penstock the displacement rate is likely higher (around 5 mm/year), as indicated by the closure of the joint of the penstock which is occurring at a rate of 2 mm/year; a deformation of the penstock with a lateral arching of around 100 mm was also observed.

In the last stretch of the diversion tunnel, which is perpendicular to the slope and is about 100m long, many transverse fractures can be observed, some of which have been repaired time and time

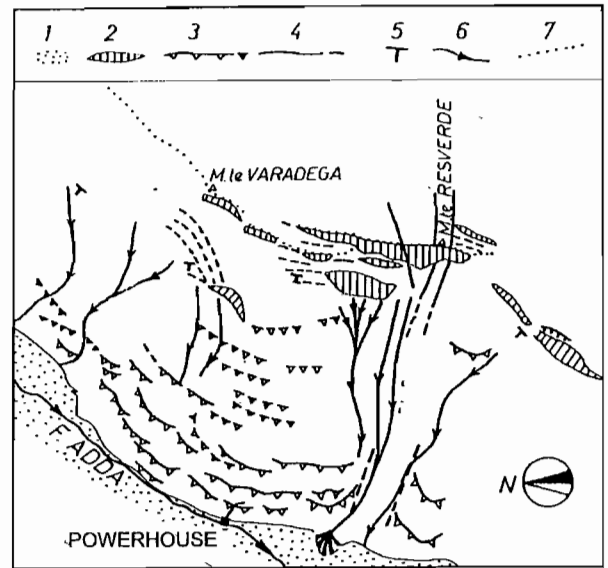


Fig. 6 - Morphological and structural conditions of the mountain slope above the Grosotto powerstation. 1) Alluvial plain; 2) Downslope scarps; 3) Edge of terrace; 4) Fractures; 5) Schistosity; 6) Inflows; 7) Mountain ridge.

Fig. 6 - Condizioni geomorfologiche e strutturali del versante sovrastante la centrale di Grosotto: 1) piana alluvionale; 2) piani di movimento in esposizione; 3) bordi di terrazze; 4) fratture; 5) scistosità; 6) impluvi; 7) crinale del versante.

again. This indicates that the movement affects the rock down to great depths.

Since the penstock was old and it had to be replaced in any case, alternative solutions envisaging the relocation of the pressure conduit at depth were examined.

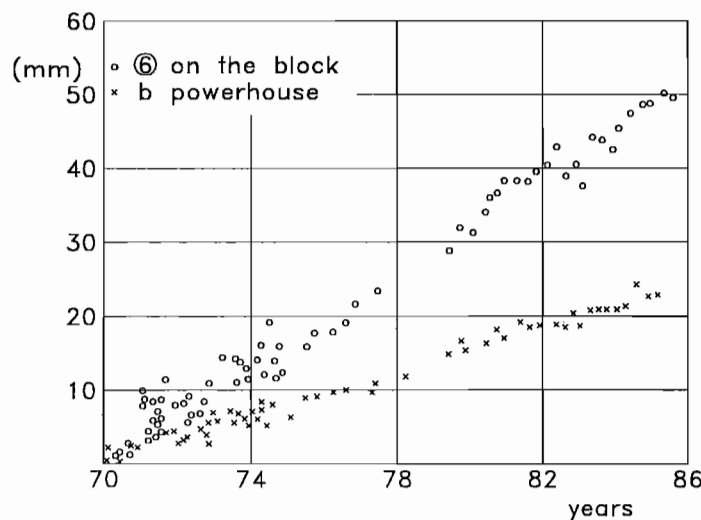
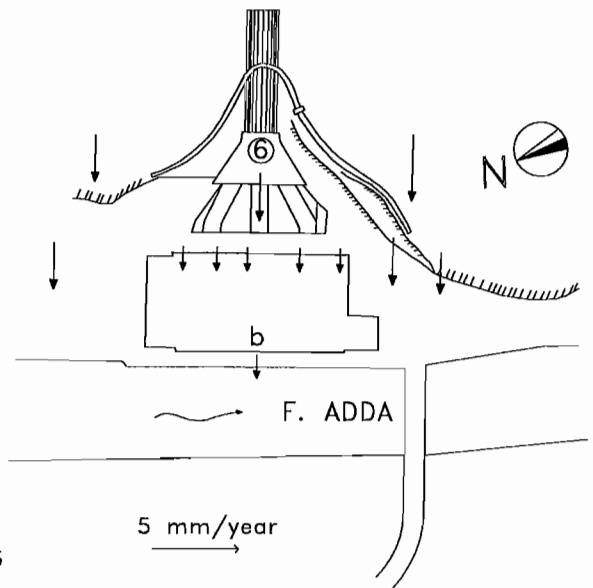


Fig. 7 - Displacements versus time in two survey points (left); average velocity (horizontal component) for all the survey points (right) at the base of the slope.

Fig. 7 - Spostamenti in funzione del tempo (componente orizzontale) per due punti di controllo (in sinistra); velocità medie per anno per tutti i punti di controllo alla base del versante (in destra)



The adoption of a pressure tunnel was not deemed advisable owing to the poor conditions of the rock mass and to the fact that the movements are active even at the foot of the slope where the outlet of the pressure tunnel would be located.

Reconstructing the penstock in its original position at the surface was found to be the most convenient solution after all, because since the displacement rates are so small, it is quite acceptable and feasible to install, without any particular difficulties, joints in the pipe as well as compensation systems in the supports, thus eliminating the problems which had occurred during the previous operation period. This solution was to be supplemented by reinforcement with passive bolts and grouting of the lower part of the slope behind the power house, where the rock mass has been considerably disrupted as a consequence of the movements.

## References

- BAKER D.G. (1991) – *Wahleach power tunnel monitoring*. Field Measurements in Geotechnics, pp. 467-479, Falun.
- BONNARD CH., NOVERRAZ F., DUPRAZ H. (1996) – *Long-term movements of substabilized versants and climatic changes in the Swiss Alps*. 7th ISL, 3, pp. 1525-1530, Trondheim.
- BORSETTO M., LIONETTI F., RIBACCHI R. (1986) – *Ripercussioni di lenti fenomeni deformativi di un versante su opere idrauliche*. XVI Conv. AGI, 1, pp. 123-132.
- FORCELLA F. (1984) – *Brevi note sulla tettonica gravitativa di versante nelle Alpi Centrali*. Boll. Soc. Geol. It., pp. 103-689-696.
- GIRAUD A., ROCHET L. ANTOINE P. (1990) – *Processes of slope failure in crystallophillian formations*. Eng. Geol., 29, pp. 241-253.
- HUTCHINSON J.N. (1988) – *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology*. 5th ISL, 1, pp. 3-36, Lausanne.
- NOVERRAZ F. (1996) – *Sagging or deep seated creep: fiction or reality?* 7th ISL, 2, pp. 821-828, Trondheim.
- RADBRUCH-HALL D.H. (1978) – *Gravitational creep of rock masses on slopes*. in "Rockslides and avalanches", ed. B.Voight, pp. 607-657.
- SPAUN G. (1979) – *Tunnelbau und Talzuschub*. Rock Mech., Suppl. 8, pp. 333-348.
- STINI J. (1941) – *Unsere Täler wachsen zu*. Geol. Bauwesen, 13, pp. 71-79.
- ZISCINSKY U. (1966) – *On the deformation of high slopes*. 1st Congr. ISRM, 2, pp. 179-185, Lisboa.

## Lenti fenomeni deformativi di alti versanti in roccia e loro interferenza con strutture di impianti idroelettrici

Albino Lembo-Fazio, Renato Ribacchi, Maurizio Sciotti

### Sommario:

Movimenti di alti versanti rocciosi si manifestano spesso con velocità di evoluzione molto lenta per cui, in alcuni casi, essi vengono riconosciuti solo a seguito dell'interferenza con gallerie in pressione o condotte forzate posizionate sul pendio. Vengono presentati due casi tipici verificatisi nella valle dell'Adda, riportando alcuni risultati delle misure di spostamento effettuate nei numerosi anni di osservazione e discutendo i provvedimenti richiesti per consentire di continuare l'esercizio degli impianti.

### 1. Premessa

Le evidenze geomorfologiche osservate su alti versanti rocciosi dell'arco Alpino fanno ritenere che molti di questi versanti siano stati interessati da fenomeni deformativi profondi [STINI, 1941; ZISCINSKI, 1966]. La descrizione di numerosi casi osservati è stata fornita da RADBRUCH-HALL [1979] e da HUTCHINSON [1988] il quale ha anche proposto uno schema di classifica di questi movimenti.

Nella zona alpina è stato per lo più ipotizzato che questi fenomeni deformativi abbiano avuto inizio al termine dell'ultima era glaciale, quando le pareti delle incisioni vallive scavate dai ghiacciai non vennero più sostenute dalla pressione dei ghiacci. Questo fenomeno interessa prevalentemente rocce cristalline con marcata scistosità [GIRAUD *et al.*, 1990], benché possa essere osservato anche in altri tipi di roccia.

Le velocità di evoluzione del fenomeno sono in genere modeste, spesso con spostamenti in superficie di qualche millimetro all'anno, e pertanto non è sempre facile stabilire se un versante interessato in passato da fenomeni di questo tipo sia attualmente ancora in movimento o se abbia raggiunto una configurazione stabile. Le caratteristiche delle deformazioni in profondità risultano inoltre difficili da definire, così come è spesso difficile individuare le eventuali superfici di scivolamento, più o meno continue, su cui si verificano gli scorrimenti. In molti casi la deformazione del versante è stata riconosciuta solo a seguito dell'interferenza con opere di inge-

gneria, tra cui tipicamente: gallerie stradali [SPAUN, 1979], gallerie idrauliche [BAKER, 1991] e condotte forzate [BEAUJOINT e MARTIN, 1966].

I risultati dei rilievi inclinometrici effettuati in Svizzera su alcuni versanti interessati da lente deformazioni, illustrati da BONNARD *et al.* [1996] e NOVERRAZ [1996], hanno indicato che lo scorrimento è per lo più localizzato in corrispondenza di superfici ben definite, benché in alcuni casi le deformazioni interessino con continuità una fascia di roccia.

Nei casi in cui i movimenti del versante interferiscono con gallerie idrauliche o condotte forzate, per proseguire in sicurezza l'esercizio dell'impianto possono essere ipotizzate le seguenti soluzioni alternative:

- la condotta viene mantenuta sulla superficie del versante e si provvede a compensare i movimenti relativi tra le varie zone; un sistema di monitoraggio viene installato per controllare i movimenti e dare l'allarme in caso di aggravamento delle condizioni di stabilità del versante segnalate da una accelerazione dei movimenti;
- la condotta viene spostata all'interno dell'ammasso roccioso, in pozzi e gallerie, al di sotto della zona interessata dalla deformazione;
- il versante viene stabilizzato con un sistema di gallerie e fori drenanti.

Di seguito vengono presentati due casi tipici di lenti movimenti di versante verificatisi nella valle dell'Adda, illustrando le soluzioni adottate.

## 2. Impianto di Lanzada

Le caratteristiche morfologiche e geologiche della zona sono illustrate nella Fig. 1. L'acqua viene convogliata dall'invaso di Campo Moro alla centrale idroelettrica di Lanzada mediante una galleria in pressione rivestita in calcestruzzo (carico idraulico di 80m) ed una condotta forzata situata sulla superficie del versante con un dislivello di 900m. La condotta forzata poggia su selle in calcestruzzo ed è ancorata a 9 blocchi (V1-V9). A valle di ciascun blocco è presente un giunto telescopico che consente lo spostamento relativo tra la condotta ed il blocco stesso.

Il versante è alto circa 1200m, con inclinazione media di circa 36° e tratti localmente più ripidi sino a 50°. Il basamento roccioso è costituito da formazioni di micascisti e di serpentiniti con scistosità immergente verso l'interno del versante. Alcuni sondaggi, che hanno raggiunto profondità fino a 50m, hanno mostrato condizioni di intensa fratturazione della roccia e, per alcuni tratti, una marcata suddivisione delle carote in fette discoidali.

La resistenza a compressione uniassiale, determinata su campioni di roccia intatta di serpentini ed i micascisti, è risultata rispettivamente pari a circa

120 MPa e 50 MPa. Nei serpentini i giunti sono caratterizzati da valori dell'angolo di attrito di picco di 46° e valori residui di 40° ( $c'=0$ ); per i micascisti i corrispondenti valori sono di 46° e 34°.

Un rilievo fotogeologico ha mostrato che la catena montuosa è interessata da evidenti fenomeni di "insaccamento"; il versante su cui è ubicata la condotta presenta una morfologia accidentata (Fig. 1), caratterizzata da alternanze di ripiani e balze rocciose; localmente sono presenti solchi longitudinali delimitati da paretine o profonde fratture (indizi di importanti deformazioni di estensione) e zone di accentuata fratturazione o sconnessione dell'ammasso.

Alcuni anni dopo la costruzione della condotta, avvenuta nel 1958, si sono cominciati ad osservare dissesti del piano inclinato e deformazioni della condotta, sia in senso trasversale all'asse sia longitudinale, con distacco delle tubazioni dalle selle e scorrimenti relativi tra i diversi tratti separati dai giunti telescopici. Questa situazione ha richiesto continui controlli ed interventi di manutenzione con spessoramenti o ricostruzione delle selle ed asportazione o prolungamento di tratti di tubazione in corrispondenza dei giunti.

L'evoluzione del movimento del versante può essere efficacemente controllata mediante la misura dello scorrimento relativo in corrispondenza dei giunti telescopici della condotta (Fig. 2); l'insieme dei blocchi di ancoraggio, le tratte delle tubazioni ed i giunti telescopici formano infatti come una successione di estensimetri in serie, a base molto lunga. Ulteriori indicazioni puntuali sui movimenti montevalle del versante sono forniti dagli scorrimenti relativi tra la condotta e le selle. Per un'analisi completa della deformazione del versante sono stati anche rilevati gli spostamenti assoluti dei blocchi di ancoraggio della condotta mediante una rete di misure topografiche effettuate dal versante opposto. Tali misure sono tuttavia affette da sensibili incertezze per le sfavorevoli caratteristiche della rete (Fig. 3).

Nonostante la marcata dispersione delle singole misure, l'andamento generale del fenomeno deformativo ricavabile da più anni di osservazione è molto chiaro ed indica che è in atto un movimento con velocità apparentemente costante nel tempo. Il movimento non sembra influenzato né dall'entità delle precipitazioni medie annuali né da singoli episodi di particolare intensità.

In Fig. 4 sono riportati i vettori delle velocità medie dei blocchi di ancoraggio nei quindici anni di osservazione. Il movimento più intenso si verifica in corrispondenza del tratto più alto della condotta, dal blocco V4 fino ad una quota superiore a quella della galleria in pressione, con velocità dell'ordine di 15 ÷ 25 mm/anno. Al di sotto del blocco V4 le velocità sono notevolmente minori, dell'ordine di 2 ÷ 3

mm/anno. Le velocità medie di incuneamento o sfilamento della condotta in corrispondenza dei giunti (Fig.4) sono in buon accordo con quelle prevedibili in base agli spostamenti assoluti dei blocchi.

L'osservazione dei dissesti sul piano inclinato e sui muri di sostegno mostra che alcuni di questi dissesti sono da attribuire a deformazioni di estensione, altri a condizioni di compressione e taglio. Il quadro generale dei dissesti rilevati è in buon accordo con i fenomeni deformativi del versante valutati sulla base dei movimenti misurati dei blocchi di ancoraggio. In particolare, sulla soletta del piano inclinato, alcuni metri sopra il blocco V4, si osserva una importante frattura a taglio che potrebbe corrispondere alla zona in cui fuoriescono in superficie superfici di scorrimento profondo.

I giunti telescopici sul tubo consentono la compensazione dei soli movimenti differenziali in senso longitudinale; la deformazione trasversale della condotta tra due blocchi viene invece tenuta sotto controllo mediante il sistema di monitoraggio. La componente trasversale della deformazione può infatti indurre tensioni anomale nella tubazione che tuttavia, fino ad oggi, sono di modesta entità rispetto alle tensioni dovute alla pressione dell'acqua nella condotta.

Il movimento del versante ha avuto ripercussioni anche sul tratto terminale del rivestimento della galleria di derivazione; la presenza di fratture trasversali nel rivestimento in calcestruzzo è stata rilevata fino ad una profondità di circa 150m sotto la superficie del terreno, talora con netto spostamento dei due lembi della frattura. Nella zona dissestata è stato installato un rivestimento interno in acciaio che ha portato all'eliminazione delle perdite; è evidente tuttavia che anch'esso verrà prima o poi coinvolto e danneggiato dal movimento in atto.

Per l'esercizio futuro dell'impianto è stato deciso di mantenere la condotta sulla superficie del versante facendo affidamento sulla regolarità del movimento, rilevato nei numerosi anni di esercizio dell'impianto. Un sistema di selle regolabili, per la compensazione dei movimenti sia in direzione verticale sia trasversale, è già stato installato nelle zone più critiche (tra i blocchi V3 e V4); tale intervento potrebbe essere esteso anche ad altre tratte qualora fosse necessario. Per il controllo delle aperture dei giunti è stato installato un sistema di monitoraggio in tempo reale ed un sistema di allarme; la misura di apertura dei giunti può essere facilmente automatizzata e, in considerazione delle condizioni morfologiche del sito, risulta più accurata dei controlli topografici. Poiché il movimento coinvolge anche il tratto terminale della galleria in pressione, in questa zona potrebbe essere realizzata una condotta libera in galleria, anch'essa dotata di sistemi di compensazione delle deformazioni.

Per una più accurata valutazione delle attuali condizioni di stabilità del versante e per valutare l'eventuale opportunità di spostare la condotta in profondità, all'interno del versante, è necessario acquisire ulteriori informazioni sulla estensione della zona in movimento e sulle condizioni idrauliche del pendio.

Indicazioni preliminari sono state ottenute con una campagna di indagini sismiche a rifrazione i cui risultati sono sintetizzati nella Fig. 4. In corrispondenza del tratto di versante in movimento è presente una fascia di roccia con velocità inferiore a 2 km/s e spessore variabile da 50 a 100 m. In questa fascia l'ammasso roccioso presenta indubbiamente condizioni di intensa fratturazione e allentamento. Nel sottostante basamento roccioso la velocità sismica raggiunge valori di 3.5 km/sec, alquanto inferiore a quella prevedibile per un ammasso roccioso integro; è pertanto possibile che i movimenti interessino anche parte del basamento. In effetti, fratture del rivestimento della galleria in pressione sono presenti a circa 150m sotto la superficie, a profondità maggiore della fascia a bassa velocità che in questa zona ha uno spessore di 50m.

Per completare la fase esplorativa è prevista la strumentazione del pendio con piezometri e tubi inclinometrici e spinti sino ad una profondità di 150÷200m. Sono ben note le difficoltà di ottenere risultati affidabili con misure inclinometriche a profondità così elevate; si ritiene tuttavia che una adeguata tecnica di installazione possa consentire di raggiungere risultati soddisfacenti, come si è verificato in una situazione geotecnica analoga nel Canada [BAKER, 1991].

### 3. Impianto di Grosotto

Un secondo fenomeno deformativo è stato osservato in corrispondenza della condotta sovrastante la centrale di Grosotto (Fig. 5); in questo caso la velocità di deformazione del versante è circa un ordine di grandezza inferiore a quella di Lanzada. La condotta, costruita nel 1910, è situata nella parte inferiore di un versante alto circa 1400m che presenta un profilo decisamente convesso; l'inclinazione varia da circa 35° nella zona della condotta, che ha un dislivello di 300m, a circa 25° nella zona più alta.

Nella zona sommitale del versante, a monte della condotta, sono ben riconoscibili segni di deformazione gravitativa con raddoppio delle creste e formazione di depressioni e solchi che si estendono per molte decine di chilometri [FORCELLA, 1984]. Nella zona inferiore si riconosce una successione di terrazze a più debole pendenza, talora interessate da solchi e depressioni longitudinali, troncate verso valle da paretine rocciose; il versante presenta un aspetto disarticolato e dà l'impressione di una ac-



centuata deformazione verso la valle dell'Adda (Fig.6).

L'ammasso roccioso è costituito da scisti con livelli di quarziti; due sondaggi esplorativi di circa 100m di profondità (Fig.5) hanno messo in evidenza una intensa fratturazione della roccia e la presenza di numerose fasce di taglio costituite da scaglie di roccia laminate e materiale a granulometria sabbiosa. L'ammasso è molto permeabile ed il livello piezometrico non è stato raggiunto dai sondaggi.

I rilievi topografici (Fig.7) hanno evidenziato un movimento del piede del versante e del blocco di ancoraggio con velocità di circa 3÷4 mm/anno; il vettore di spostamento è inclinato di circa 15° verso l'alto. La spinta esercitata dal pendio e dalla condotta sulla centrale ha determinato una intensa fessurazione dell'edificio e delle strutture di supporto delle turbine. Nella parte più alta del pendio la velocità di deformazione è verosimilmente alquanto più elevata (circa 5 mm/anno) e, in corrispondenza di un giunto, determina l'incuneamento della condotta con velocità di 2 mm/anno. Si osservano inoltre spostamenti della condotta sulle selle ed un inarcamento laterale di circa 100 mm.

Nel tratto terminale della galleria di derivazione, perpendicolare al pendio, per una lunghezza di circa 100 m si osservano sul rivestimento varie fratture trasversali, più volte riparate nel tempo, le qua-

li indicano che il movimento si sviluppa anche in profondità.

La vetustà dell'impianto impone in ogni caso la sostituzione della condotta; sono state pertanto studiate soluzioni alternative, alcune delle quali prevedono di spostare la condotta in sotterraneo.

La realizzazione di una galleria in pressione risulta tuttavia la soluzione meno convincente per le scadenti caratteristiche dell'ammasso roccioso ed in considerazione del fatto che i movimenti interessano anche la zona bassa del versante in cui dovrebbe sboccare la galleria.

Tra le diverse soluzioni esaminate, quella che prevede la ricostruzione della condotta nella sua posizione originaria risulta la più conveniente. Per evitare i problemi verificatisi nel precedente impianto è stata tuttavia prevista la realizzazione di giunti nella tubazione e di sistemi di regolazione degli appoggi per la compensazione degli spostamenti. Questi interventi risultano semplici da realizzare e non comportano eccessivi problemi nell'esercizio dell'impianto, data anche la bassa velocità di evoluzione del fenomeno deformativo. Nella zona bassa del versante, in prossimità della centrale, è inoltre previsto il consolidamento e rinforzo dell'ammasso roccioso, sensibilmente allentato e disarticolato a seguito del movimento, mediante barre passive di ancoraggio ed iniezioni cementizie.