

Osservazioni sulle proprietà meccaniche in sede delle argille varicolori molisane ***

G. FEDERICO *, G. TANCREDI **

SOMMARIO: Si è inteso dare un contributo alla conoscenza del comportamento meccanico in sede di una « formazione strutturalmente complessa » esaminando il caso particolare di due cunicoli scavati nelle « argille varicolori » della valle del fiume Trigno.

Il comportamento dei due cunicoli osservati è stato interpretato introducendo i valori dei parametri geotecnici, ricavati con prove di laboratorio su provini di piccole dimensioni, nel metodo di calcolo elasto-plastico adottato per lo studio dello stato di tensioni e di deformazioni nell'intorno dei cunicoli stessi.

Il buon accordo tra i risultati ottenuti dall'analisi effettuata ed il comportamento delle cavità osservate giustifica l'applicazione ad un mezzo a scaglie del modello meccanico del mezzo continuo deformabile e dimostra che i valori dei parametri geotecnici introdotti nel calcolo sono rappresentativi del comportamento in sede del materiale studiato.

1. Premesse

Il punto sullo stato delle conoscenze delle proprietà meccaniche delle argille con struttura a scaglie è stato fatto di recente al Simposio Internazionale sulle « Formazioni strutturalmente complesse » [1977]. A queste formazioni che, come è noto, hanno subito intense deformazioni per cause tettoniche e per frana, non è immediatamente applicabile, dal punto di vista meccanico, né il modello del continuo deformabile né il modello del rigido discontinuo a causa della eterogeneità di costituzione ed a causa dei caratteri strutturali. La conoscenza del comportamento meccanico di un terreno « strutturalmente complesso » presuppone l'acquisizione di dati relativi alle proprietà meccaniche dei singoli componenti e di dati relativi al comportamento di massa. L'eterogeneità e l'anisotropia che caratterizzano questi terreni rendono particolarmente difficile il prelievo di campioni indisturbati e l'esecuzione delle prove di laboratorio necessarie per la determinazione delle proprietà meccaniche. Anche nei casi in cui è possibile eseguire prove di laboratorio permangono notevoli incertezze sulla reale significatività e sulla estrapolabilità dei risultati ottenuti. È necessario quindi ricorrere a prove in sito su grandi campioni o all'in-

terpretazione del comportamento di opere in vera grandezza.

In occasione del Simposio di Capri sono stati forniti i primi dati quantitativi sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità di alcuni terreni con struttura a scaglie [D'ELIA, 1977; EVANGELISTA *et al.*, 1977; JAPPELLI *et al.*, 1977]. Tali dati sono piuttosto dispersi, tuttavia consentono di avere un'idea generale del comportamento meccanico di questi terreni.

Nella presente nota si fa riferimento in particolare alle « argille varicolori », diffuse in vaste zone dell'Italia centro-meridionale. Questi terreni sono formati in più zone da aggregati di scaglie di argilla indurita con struttura generalmente caotica e da frammenti di materiale lapideo dispersi nella massa argillosa.

Nel quadro di un approfondimento delle conoscenze del comportamento meccanico in sede delle argille con struttura a scaglie, il presente studio si propone di indagare sulla significatività dei parametri geotecnici ricavati con prove di laboratorio su campioni di argille varicolori molisane affioranti nella valle del fiume Trigno [D'ELIA, 1977].

Per questi materiali è stato possibile definire gli intervalli di variazione dei valori dei parametri c' e ϕ' . Per valutare se tali parametri possono essere estrapolati al terreno in sede, è stata effettuata l'analisi del comportamento di alcuni scavi in sotterraneo, eseguiti nella zona ove erano stati prelevati i campioni sottoposti alle prove di laboratorio.

2. Comportamento dei cunicoli scavati nelle argille varicolori della Valle del Trigno

Le proprietà meccaniche delle argille varicolori pongono, nella esecuzione di opere in sotterraneo, gravi problemi di stabilità dello sca-

* Dott. Ing. Giovanni FEDERICO, Istituto di *Scienza e Tecnica delle Costruzioni*, Facoltà di Architettura, Università di Roma.

** Dott. Ing. Gaetano TANCREDI, Borsista del CNR presso l'Istituto di *Costruzioni Idrauliche*, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma.

*** Lavoro eseguito nell'ambito del Progetto Finalizzato del CNR « Conservazione del suolo » - sottoprogetto « Fenomeni Franosi » - Unità operative: Istituto di *Scienza e Tecnica delle Costruzioni*, Facoltà di Architettura di Roma, resp. Prof. B. D'Elia (contratto CNR n. 78.00682.87); Istituto di *Costruzioni Idrauliche*, Facoltà di Ingegneria di Roma, resp. F. Esu (contratto CNR n. 78.0091.87).

vo. Il comportamento di questi terreni è stato descritto da COTECCHIA [1960, 1973] per il caso di gallerie stradali, ferroviarie ed idrauliche.

Il presente lavoro prende spunto dai rilievi fatti in due cunicoli scavati a profondità variabili da pochi metri ad una trentina di metri. Il comportamento osservato nei cunicoli è stato confrontato con quello desunto da un calcolo teorico sullo stato di tensioni e deformazioni nell'intorno delle cavità. In tale calcolo sono stati introdotti i valori medi dei parametri ottenuti in laboratorio.

I cunicoli scavati a mano, hanno una sezione di forma ellittica di dimensioni $2,40 \times 2,70$ m. Per il sostegno degli scavi è stata utilizzata un'armatura provvisoria di centine metalliche NP160 poste ad 80 cm l'una dall'altra e successivamente annegate nel calcestruzzo del rivestimento definitivo.

In genere si sono registrate forti spinte sulle armature provvisorie, messe in vista dalle deformazioni delle centine. In un caso, in cui venne ritardata di alcuni giorni la posa in opera del rivestimento definitivo, che di regola seguiva immediatamente lo scavo, si ebbe un forte restringimento della sezione che si trovava alla profondità di circa 19 m (fig. 1).

3. Metodo di calcolo adottato

L'analisi del comportamento dei cunicoli è stata fatta con il metodo di calcolo proposto da AMBERG e LOMBARDI [1974], ricavato dalla teoria dell'espansione di una cavità cilindrica in un mezzo isotropo a comportamento elasto-plastico (fig. 2a). Il metodo di calcolo adottato fa riferimento ad uno stato di deformazione piano nell'intorno della cavità e non tiene conto dell'effetto tridimensionale dell'avanzamento del fronte di scavo.

I cunicoli, scavati a mano, hanno una sezione colari e si è studiata la deformazione della sezione e la distribuzione delle tensioni nelle zone circostanti al variare della pressione di stabilizzazione p , supposta uniformemente distribuita lungo il perimetro interno della sezione di scavo. Tale pressione, come è noto, rappresenta l'azione stabilizzante del rivestimento.

Si è trascurata l'influenza del peso proprio del terreno e delle forze di massa dovute al moto di filtrazione dell'acqua verso la cavità. Tale ipotesi porta ad una distribuzione circolare e concentrica alla galleria delle linee di egual tensione radiale ed in generale a considerare la zona di rottura del terreno intorno alla galleria (zona plastica) meno estesa che nel caso in cui

si tenga conto delle forze di massa [RIBACCHI, 1978].

Come è noto il raggio della zona di rottura, che si forma intorno al vuoto a causa del superamento del limite elastico del materiale, è funzione delle dimensioni della cavità, della tensione litostatica (σ_n), della pressione di stabilizzazione (p) e dei parametri di resistenza al taglio di picco (c', φ') e residui (c'_r, φ'_r) del terreno.

Il calcolo è stato effettuato nell'ipotesi che le pressioni neutre nella zona circostante la cavità siano mediamente nulle. Si è ammesso, cioè, che i valori negativi delle u che si generano in alcuni punti della zona plasticizzata per ef-

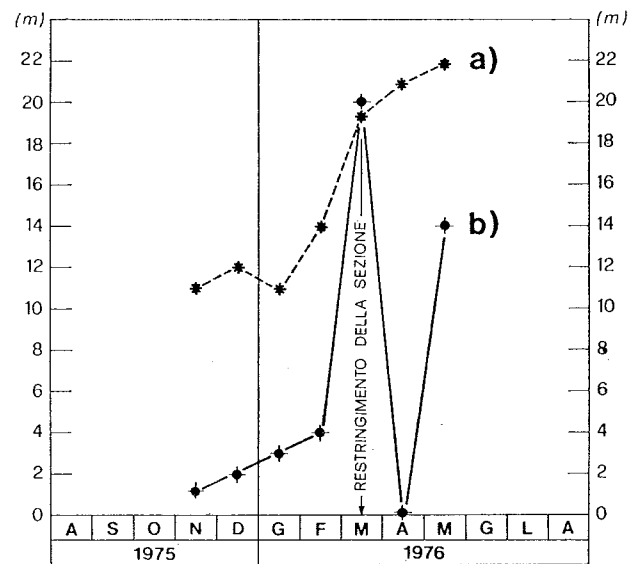


Fig. 1. - a) coperture sul fronte di scavo; b) distanza tra rivestimento definitivo e fronte di scavo.

fetto della diminuzione delle tensioni totali compensino i valori positivi che si hanno in altri punti.

Lo stato di sollecitazione naturale prima dello scavo è ipotizzato di tipo idrostatico $\sigma_n = \gamma H$, con γ peso di volume del terreno e H profondità dello scavo.

Il calcolo, assunto valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb porta alla seguenti relazioni risolutive per le tensioni radiali σ_r e tangenziali σ_t nella zona plastica:

$$\sigma_r = (p + c'_r \cotg \varphi'_r) \left[\frac{r_0}{r} \right]^{1-\lambda} - c'_r \cotg \varphi'_r$$

$$\sigma_t = \lambda (p + c'_r \cotg \varphi'_r) \left[\frac{r_0}{r} \right]^{1-\lambda} - c'_r \cotg \varphi'_r$$

dove r_0 è il raggio della cavità e $\lambda = \frac{1 + \sin \varphi'_r}{1 - \sin \varphi'_r}$

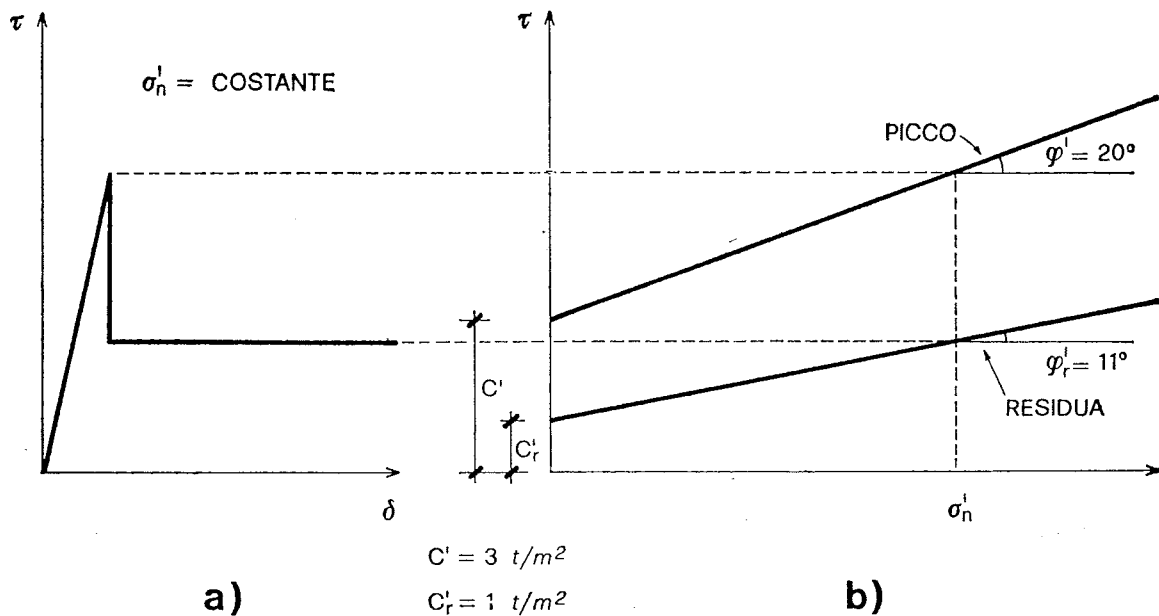


Fig. 2. - Caratteristiche di deformabilità e resistenza: a) curva sforzi-deformazioni idealizzata; b) curve intrinseche di picco e residua.

L'estensione della zona plastica si definisce attraverso il valore del raggio R:

$$\frac{R}{r_0} = \left[\frac{(\sigma_n + c'_r \cotg \varphi'_r) - (\sigma_n + c' \cotg \varphi') \operatorname{sen} \varphi'}{p + c'_r \cotg \varphi'_r} \right]^{\frac{1}{\lambda-1}}$$

Nella zona elastica si ha: $\sigma_r = \sigma_n - 0.34375 \frac{R^2}{r^2} q$; $\sigma_t = \sigma_n + 0.34375 \frac{R^2}{r^2} q$

dove $q = 2.91 (\sigma_n - \sigma_R)$ essendo σ_R il valore della tensione radiale σ_r per $r = R$.

Lo spostamento radiale (convergenza) δ_r di un punto del terreno situato ad una distanza r_1 dall'asse della galleria è dato dalla seguente espressione:

$$\delta_{r1} = \frac{1.2 R^2}{E r_1} (\sigma_n + c' \cotg \varphi') \operatorname{sen} \varphi' + \frac{0.72}{E} \left[\left[(\sigma_n + c'_r \cotg \varphi'_r) \right] \left[\frac{R^2}{r_1} - r_1 \right] + \left[(p + c'_r \cotg \varphi'_r) \right] \left[r_1^\lambda - \frac{R^{1+\lambda}}{r_1} \right] r_0^{1-\lambda} \right] + \frac{\Delta v}{v} \left[\frac{R^2}{r_1} - r_1 \right]$$

ove $\frac{\Delta v}{v}$ è l'aumento di volume nella zona plastica.

4. Proprietà geotecniche dei terreni

Si sono attribuiti al terreno compreso nella zona di « rottura » i valori medi dei parametri di resistenza al taglio residui ($\varphi'_r = 11^\circ$, $c'_r = 1.0$ t/m²) ricavati da prova di taglio diretto, al materiale della zona circostante (zona elastica) i valori medi dei parametri di picco ($\varphi' = 20^\circ$, $c' = 3.0$ t/m²) ricavati da prove di taglio diretto e da prove triassiali (fig. 2b) [D'ELIA, 1977]. Per la zona elastica e la zona plastica si

è ritenuto opportuno assumere, in prima approssimazione, lo stesso valore del modulo di deformabilità E pari a 10.000 t/m². Tale modulo è stato valutato in base ai risultati di prove di carico, facendo riferimento ai valori minimi dei moduli di carico e scarico (E_{ul}) [D'ELIA, 1977]. Si è assunto inoltre un valore di $\frac{\Delta v}{v}$ (aumento di volume nella zona plastica) uguale a 0,005 ed un coefficiente di Pois-

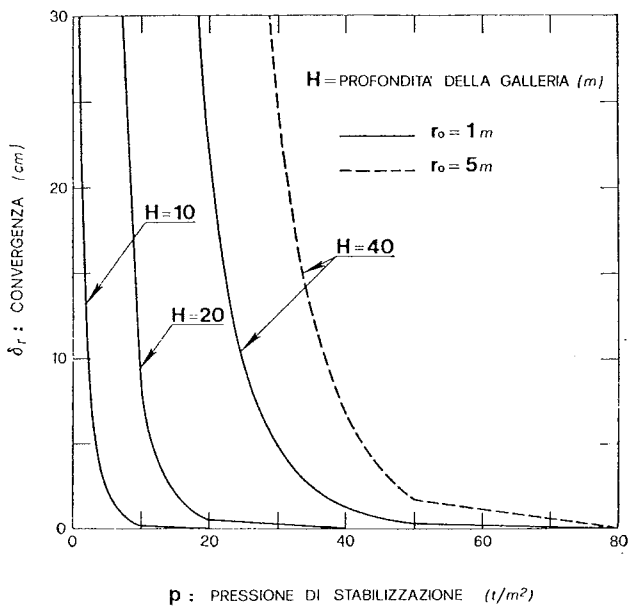


Fig. 3. - Linee caratteristiche.

son $\nu = 0.2$. Per il peso di volume γ si è assunto il valore medio di 2.0 t/m^3 .

5. Risultati del calcolo

Allo scopo di interpretare il comportamento dei cunicoli osservati, si è sviluppato il calcolo per il caso di una cavità circolare di raggio $r = 1 \text{ m}$. I risultati di questo calcolo sono sintetizzati nella figura 3, dove sono riportate le linee caratteristiche che esprimono i valori delle deformazioni radiali del foro (convergenza δ_r) in funzione della pressione di stabilizzazione p . Tali curve sono state ricavate per diversi valori delle coperture. Nella figura 3 è anche riportata, per motivi di confronto, la linea caratteristica di una galleria di raggio $r = 5 \text{ m}$ sotto la copertura di 40 m .

L'esame delle curve riportate in figura 3 mostra che, con i valori dei parametri geotecnici ricavati dalle prove e introdotti nel calcolo, il cunicolo, in assenza di rivestimento portante ($p = 0$) non è stabile.

L'andamento delle curve relative alla galleria di raggio 1 m permette di riconoscere un valore di soglia della pressione di stabilizzazione che, nel caso studiato, è pari a circa $1/3$ della pressione litostatica σ_n corrispondente, al disotto del quale le deformazioni del terreno divengono inaccettabili. Tale valore di soglia aumenta all'aumentare del raggio della galleria (per $r = 5 \text{ m}$ risulta circa $1/2$ della σ_n).

Nella fig. 4 è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione delle tensioni radiali σ_r e delle

tensioni tangenziali σ_t per il caso della cavità di raggio 1 m con pressione di stabilizzazione $p = 30 \text{ t/m}^2$ e copertura 40 m ($\sigma_n = 80 \text{ t/m}^2$).

L'ipotesi di comportamento elasto-plastico fragile del terreno porta ad una distribuzione irregolare delle sollecitazioni nell'intorno della galleria. Mentre le tensioni radiali σ_r , pur mostrando una discontinuità nel passaggio dalla zona plastica alla zona elastica crescono progressivamente al crescere di r e tendono asintoticamente dal basso al valore di σ_n , le tensioni tangenziali σ_t passano da valori minori a valori maggiori di σ_n nel punto in cui $r = R$ e nella zona elastica tendono dall'alto a σ_n all'aumentare di r .

Nell'esempio riportato in fig. 4, per il quale il valore della pressione di stabilizzazione non supera la soglia al disotto della quale le convergenze aumentano rapidamente, è riportato anche il raggio della zona plastica R . Tale raggio aumenta rapidamente non appena la pressione di stabilizzazione scende al di sotto dei valori corrispondenti a deformazioni dell'ordine dei centimetri.

6. Considerazioni conclusive

Le forti spinte registrate sulle armature provvisorie dei cunicoli ed il collasso avvenuto, confermano che nelle argille varicolori in esame

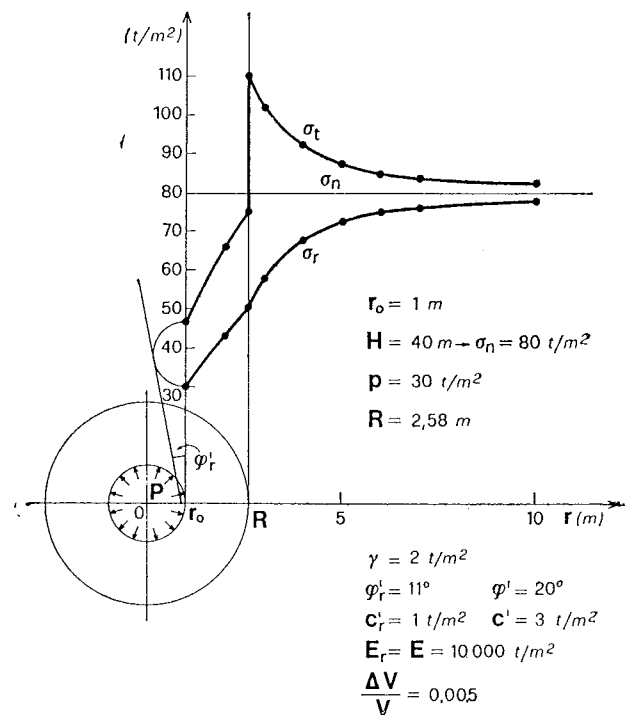


Fig. 4. - Distribuzione delle tensioni radiali (σ_r) e tangenziali (σ_t) nell'intorno della cavità di raggio $r_0 = 1,0 \text{ m}$.

non è garantita la stabilità di gallerie, anche di piccolo diametro e sotto modeste coperture, in assenza di un adeguato sostegno.

I risultati ottenuti attraverso l'analisi effettuata sono in accordo con il comportamento reale osservato e pertanto il modello di mezzo continuo deformabile appare applicabile all'interpretazione del comportamento globale del mezzo a scaglie considerato. Attraverso il calcolo effettuato, inoltre, il comportamento osservato trova giustificazione nei valori dei parametri geotecnici adottati che, pur se ricavati da prove di laboratorio su provini di piccole dimensioni, appaiono rappresentativi del comportamento meccanico del terreno in sede.

Si è constatato che, introducendo nel calcolo valori dei parametri anche di poco diversi da quelli adottati, i risultati non sono più in accordo con il comportamento dei cunicoli. Se si aumenta la coppia dei parametri di resistenza al taglio residua, i valori della pressione di stabilizzazione necessaria per l'equilibrio diminuiscono, e per $c'_r = 3 \text{ t/m}^2$ e $\phi' = 20^\circ$ la cavità studiata di raggio 1 m risulta stabile per valori nulli della pressione di stabilizzazione.

Può concludersi che i valori dei parametri geotecnici ricavati sulla componente argillosa del materiale in esame definiscono il comportamento d'insieme della formazione e che la frazione lapidea non sembra influenzare in modo sostanziale la resistenza al taglio delle argille varicolori studiate.

BIBLIOGRAFIA

- AMBERG W. A., LOMBARDI G. (1974) - *Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine*. Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver, Vol. 2B, pp. 1055-1060.
- COTECCHIA V. (1960) - *Criteri di geologia e geotecnica nella progettazione del canale irriguo in sponda destra del fiume Fortore*. Atti del IV Convegno di Geotecnica, Padova 1959, 7, pp. 82-96.
- COTECCHIA V., VALENTINI G. (1973) - *Comportamento allo scavo in galleria di rocce argillose tipiche dell'Appennino meridionale*. Geolog. Appl. e Idrogeologia, Vol. 8, parte II.
- D'ELIA B. (1977) - *Geotechnical complexity of some Italian variegated clay shales*. Panel discussion, Session II, Proc.

Int. Symp. « The Geotechnics of Structurally Complex Formations », Capri, 1977, Vol. 2.

EVANGELISTA A., PAPARO FILOMARINO M., PELLEGRINO A. (1977) - *On the mechanical behaviour of variegated clay shales of Irpinia*. Proc. Int. Symp. « The Geotechnics of Structurally Complex Formations », Capri, 1977, Vol. 1, pp. 229-237.

JAPPELLI R., LIGUORI V., UMILTÀ G., VALORE C. (1977) - *A survey of geotechnical properties of a stiff highly fissured clay*. Proc. Int. Symp. « The Geotechnics of Structurally Complex Formations », Capri, 1977, Vol. 2.

RIBACCHI R. (1978) - *L'influenza delle forze di volume sullo stato di sollecitazione intorno ad una galleria circolare*. Rivista Italiana di Geotecnica, 1, pp. 33-47.

SUMMARY

Some observations on the in-situ mechanical properties of the Molise variegated clay shales

The behaviour of two adits excavated into the variegated clay shales of the Trigno Valley (Molise, Italy) has been studied in order to contribute to the knowledge of the in-situ mechanical properties of a structurally complex formation.

Due to the heterogeneity and anisotropy of this complex formation, to obtain undisturbed samples and reliable results of laboratory tests is difficult. The aim of this paper is that of verifying the reliability of geotechnical parameters obtained by laboratory tests on small samples of variegated clay shales by applying them to the analysis of the observed adits behaviour.

Very high soil pressures acting on the steel ribs of the temporary support were observed in the adits. In one case, a marked narrowing of the excavation cross-section was also noticed.

The stress and strain analysis in the soil around the adits was carried out using the method proposed by AMBERG and LOMBARDI. This method is based on the hypothesis of plain strain in a perfectly plastic soil obeying to the Mohr-Coulomb failure criterion. The calculations were performed using the average shear strength parameters obtained through laboratory tests; the residual strength parameters (c'_r , ϕ'_r) and the peak values (c' , ϕ') have been adopted for the plastic and elastic zone respectively.

The results of calculation have been diagrammed into lines characteristic of the cross-section deformations of adits versus stabilizing pressures. These lines show that at depths equal to the actual ones, the adits are unstable unless a support is provided, and give also the limit value of the stabilizing pressures below which the adits are unstable.

Although simplifying assumptions were introduced in the analysis, the calculation results rather conform to the adits observed behaviour. Thus, it was inferred that the shear strength parameters as measured on the clay component of the variegated clay shales represent in effect the actual in situ behaviour of the entire formation.