

ACTE ALE ORGANELOR DE SPECIALITATE ALE ADMINISTRAȚIEI PUBLICE CENTRALE

MINISTERUL DEZVOLTĂRII REGIONALE ȘI ADMINISTRAȚIEI PUBLICE

ORDIN

pentru aprobarea reglementării tehnice „Ghid de proiectare privind lucrările subterane cu aplicații în hidrotehnică și transporturi. Alcătuire constructivă, calculul sprijinirii și cămășuielii. Indicativ GP 125—2014”*)

În conformitate cu prevederile art. 10 și art. 38 alin. 2 din Legea nr. 10/1995 privind calitatea în construcții, cu modificările ulterioare, ale art. 2 alin. (3) și (4) din Regulamentul privind tipurile de reglementări tehnice și de cheltuieli aferente activității de reglementare în construcții, urbanism, amenajarea teritoriului și habitat, aprobat prin Hotărârea Guvernului nr. 203/2003, cu modificările și completările ulterioare,

având în vedere Procesul-verbal de avizare nr. 2/2014 al Comitetului tehnic de specialitate nr. 7 — Construcții hidrotehnice și hidroedilitare și Procesul-verbal de avizare nr. 1/2014 al Comitetului tehnic de coordonare generală,

în temeiul art. 4 pct. II lit. e) și al art. 12 alin. (7) din Hotărârea Guvernului nr. 1/2013 privind organizarea și funcționarea Ministerului Dezvoltării Regionale și Administrației Publice, cu modificările ulterioare,

viceprim-ministrul, ministrul dezvoltării regionale și administrației publice, emite prezentul ordin.

Art. 1. — Se aprobă reglementarea tehnică „Ghid de proiectare privind lucrările subterane cu aplicații în hidrotehnică și transporturi. Alcătuire constructivă, calculul sprijinirii și cămășuielii. Indicativ GP 125—2014”, prevăzută în anexa care face parte integrantă din prezentul ordin.

Art. 2. — Prezentul ordin se publică în Monitorul Oficial al României, Partea I, și intră în vigoare la 30 de zile de la data publicării.

p. Viceprim-ministru, ministrul dezvoltării regionale și administrației publice,

Shhaideh Sevil,
secretar de stat

București, 21 iulie 2014.

Nr. 1.340.

*) Ordinul nr. 1.340/2014 a fost publicat în Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 788 din 29 octombrie 2014 și este reprodus și în acest număr bis.

**Ghid de proiectare privind lucrările subterane cu aplicații în hidrotehnică și transporturi.
Alcătuire constructivă, calculul sprijinirii și cămășuielii. Indicativ GP 125-2014**

CUPRINS

1. Obiectul ghidului.
2. Domeniul de aplicare.
3. Definiții și terminologie.
4. Clasificarea masivelor de rocă.
 - 4.1. Sistemul RQD.
 - 4.2. Sistemul RMR.
 - 4.3. Sistemul Q.
5. Stabilizarea excavațiilor subterane.
 - 5.1. Mecanisme de instabilitate.
 - 5.2. Diagrama convergență – fretare.
6. Sisteme de sprijinire - clasificare și alcătuire.
 - 6.1. Clasificare.
 - 6.2. Alegerea sistemului de sprijinire.
 - 6.3. Adaptarea în execuție a sprijinirilor la situațiile din teren.
7. Calculul sprijinirilor.
 - 7.1. Calculul sprijinirilor elastice prin metoda convergență – fretare.
 - 7.2. Calculul sprijinirilor prin metoda bolții de surpare
8. Elemente specifice cavernelor subterane.
9. Elemente specifice galeriilor hidrotehnice sub presiune.

Anexa nr.1: Referințe tehnice.

Anexa nr.2: Exemplu de calcul a unei sprijiniri elastice-anexă informativă.

Lista figurilor

Nr. crt.	Denumire
Figura nr.1	Diagrama convergență – fretare.
Figura nr.2	Clasificarea sprijinirilor în funcție de diagrama convergență-fretare.
Figura nr.3	Sisteme de sprijinire: (A) cu ancore și șprîț-beton; (B) cu cintre metalice.
Figura nr.4	Grafic de alegere a sistemului de sprijinire în funcție de indicele Q.
Figura nr.5	Urmărirea stabilizării excavației prin măsurători: <i>a</i> – echiparea secțiunii de măsură; <i>b</i> – reprezentarea deplasărilor măsurate în funcție de timp.
Figura nr.6	Caracteristica rocii în cazul comportării elastice.
Figura nr.7	Caracteristica rocii în cazul comportării neliniare a rocii.
Figura nr.8	Formarea bolții de surpare.
Figura nr.9	Caracteristica sprijinirii.
Figura nr.10	Sprijinirea cu ancore: <i>a</i> - schema sprijinirii; <i>b</i> – rezultatele încercării de smulgere a unei ancore.
Figura nr.11	Trasarea caracteristicii sprijinirilor combinate.
Figura nr.12	Notații pentru relațiile de calc.
Figura nr.13	Faze de execuție la excavarea și sprijinirea bolții: <i>a</i> – cu galerie direcțională centrală; <i>b</i> – cu galerii direcționale la cuzineți.
Figura nr.14	Necesarul de ancorare, exprimat prin raportul p_{anc} / γ_r , în funcție de unghiul de frecare internă pe discontinuități.
Figura nr.15	Recomandări privind lungimea ancorelor din zona bolții.
Figura nr.16	Prevenirea alunecărilor progresive interstrat: <i>a</i> – mecanismul de instabilitate; <i>b</i> – notații
Figura nr.17	Definirea reacțiunii elastice a rocii.
Figura nr. A1	Diagrama de convergență-fretare pentru analiza stabilității galeriei din exemplul numeric.

Lista tabelelor

Nr. crt.	Denumire
Tabelul nr.1	Calitatea masivului în funcție de RQD.
Tabelul nr.2	Indici corespunzători parametrilor caracteristici.
Tabelul nr.3	Clase de rocă departajate prin RMR.
Tabelul nr.4	Caracterizarea orientării tunelului în raport cu discontinuitățile.
Tabelul nr.5	Corecțiile indicelui RMR.
Tabelul nr.6	Factorul de reducere al eforturilor pentru roci masive.
Tabelul nr.7	Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de RQD.
Tabelul nr.8	Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de RMR.
Tabelul nr.9	Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de indicele Q.
Tabelul nr.CF1	Calculul coordonatelor caracteristici rocii.

1. Obiectul ghidului

(1) Ghidul de proiectare al lucrărilor subterane cu aplicații în hidrotehnică și transporturi se referă la tunele, galerii și caverne subterane realizate în rocă. Ghidul tratează alcătuirea constructivă și calculul sprijinirilor excavațiilor subterane. Capitole speciale se referă la specificul cavernelor subterane și la specificul galeriilor de aducțiune a apei sub presiune.

(2) În cadrul ghidului:

- a) se prezintă clasificarea masivelor de rocă cu aplicabilitate în proiectarea lucrărilor subterane.
- b) se stabilesc metodele de stabilizare a conturului excavat.
- c) se definesc sistemele de sprijinire a excavațiilor în rocă și modul de alegere a acestora.
- d) se detaliază modul de calcul al sprijinirilor pentru galerii și tunele.
- e) se prezintă elementele specifice care caracterizează cavernele subterane în rocă și galeriile hidrotehnice sub presiune.

(3) Ghidul servește la asigurarea unei abordări (principii, metode și modele) unice a problemelor de siguranță a digurilor.

2. Domeniul de aplicare

(1) Ghidul se aplică la alegerea și verificarea prin calcul a sprijinirilor excavațiilor pentru tunele și galerii realizate în rocă.

(2) Ghidul se adresează proceselor de decizie inginerescă în domeniul sprijinirilor excavațiilor subterane prin furnizarea unei corelări directe între caracteristicile masivului de rocă și tipul de sprijinire adecvat.

(3) Ghidul servește unei abordări unitare a conceptelor privind stabilitatea lucrărilor subterane ca fenomen de interacțiune între masa de rocă și structurile de sprijinire.

(4) Ghidul se aplică și pentru proiectarea și calculul cămășuielilor galeriilor sub presiune.

(5) Prezentul ghid se adresează tuturor factorilor implicați în procesul investițional: proiectanți, verificatori de proiecte, experți tehnici atestați, executanți, responsabili tehnici cu execuția, investitori, proprietari, administratori și utilizatori, personalul responsabil cu exploatarea obiectivelor, operatori/agenți economici, precum și autorităților administrației publice și organismelor de verificare și control (verificarea și/sau expertizarea proiectelor, verificarea, controlul și/sau expertizarea lucrărilor), din domeniul construcțiilor hidrotehnice și domeniul apelor.

3. Definiții și terminologie

Masivul de rocă eterogen și discontinuu este mediu de construcție și parte integrantă a lucrării subterane.

Clasificarea masivelor de rocă reprezintă departajarea acestora în funcție de gradul de fragmentare și de anumiți parametri caracteristici.

Sistemele de clasificare caracterizează comportamentul la excavare al masivului de rocă și au ca principal element prezența și caracterul discontinuităților.

Lucrările de sprijinire, denumite în continuare sprijiniri, sunt lucrările care intervin în procesul de reechilibrare a rocii, prevenind surpările și asigurând securitatea lucrării, atât în faza de execuție, cât și în perioada de exploatare.

Stabilizarea excavației subterane este rezultatul unui proces de interacțiune între masa de rocă și structurile de sprijinire.

Mecanismul de cedare a conturului excavat este modalitatea prezumată prin care fragmentele de rocă din conturul excavat devin instabile sub greutatea proprie, inițiind surparea.

Structura lucrării subterane cuprinde golul excavat, lucrările de sprijinire/cămășuire care asigură stabilitatea excavației și masa de rocă înconjurătoare.

Deplasare de convergență sau prescurtat convergență este deplasarea conturului excavat către gol în procesul excavării.

Fretarea este împiedicarea deplasărilor de convergență dată, după caz, de prezența frontului sau de sprijinire.

Diagrama convergență-fretare este redarea grafică a efectul tridimensional creat de front și împiedicarea parțială a deplasărilor de convergență.

Caracteristica rocii reprezintă relația dintre deplasarea de convergență produsă și efortul normal pe contur.

Caracteristica sprijinirii reprezintă relația dintre deplasarea radială impusă sprijinirii de deplasarea de convergență a rocii și presiunea normală exercitată de sprijinire pe contur.

Sistemul de sprijinire este ansamblul lucrărilor ingineresti care asigură stabilizarea conturului excavat.

Sprijinirea de tip elastic, denumită și sprijinirea cu ancore, cu șpriț-beton sau cu ancore și șpriț-beton, este sprijinirea care devine activă din momentul instalării, se deformează odată cu roca și contribuie la reechilibrarea masivului de rocă.

Sprrijinirea rigidă, denumită și sprrijinirea cu cintre metalice, este sprrijinirea care devine activă numai după surparea conturului excavat, când roca începe să exercite presiuni asupra extradodusului cintrelor.

Bolta de surpare este extinderea spre cheie a conturului excavației prin prăbușirea către gol, datorită forțelor gravitaționale, a fragmentelor de rocă ce se desprind ca urmare a ruperilor locale în masa de rocă.

Politica sprrijinirilor este procesul de predimensionare, adaptare și corectare a sistemelor de sprrijinire pe baza măsurării efectelor create de sprrijinirile propuse.

Caverna subterană este o excavație ale cărei dimensiuni sunt cu mult mai mari decât cele ale tunelelor sau galeriilor.

Galeria direcțională este o galerie realizată în avans în zona bolții cavernei; galeria direcțională poate fi centrală, de la care excavația se lărgeste spre cuzineți, concomitent cu ancorarea, fie laterală, poziționată în zona cuzineților, de la care excavația bolții se face către zona centrală.

Cămășuiala definitivă pentru tunele sau caverne subterane este structura de rezistență finală, care asigură stabilitatea pe termen lung a excavației subterane și, în același timp, funcționalitatea lucrării.

Interacțiunea cămășuială - masiv de rocă este procesul prin care roca exercită presiuni pe extradodusul cămășuiei, datorate formării bolții de surpare sau, în cazuri speciale, umflării sau curgerii lente a rocii, iar roca exercită la extradodus reacțiuni proporționale cu deplasările către masiv ale cămășuiei.

Cămășuiala galeriilor sub presiune este ansamblul structural compus din inelul de beton armat și din coroana de rocă injectată din vecinătatea acestuia.

Reacțiunea elastică este presiunea exercitată de masivul de rocă pe extradodusul cămășuiei galeriilor sub presiune, fiind mobilizată de deformarea către masivul de rocă a cămășuiei supuse presiunii interioare a apei.

4. Clasificarea masivelor de rocă

(1) Comportarea masivelor de rocă ca medii de construcție a lucrărilor ingineresti, depinde esențial de gradul de fragmentare a rocii de către discontinuități și de gradul de alterare a rocii în zona acestora. Sistemele de clasificare a masivelor de rocă au, deci, ca principal element discontinuitățile, cărora, după caz, li se asociază și anumiți parametri caracteristici.

(2) Dat fiind faptul că determinarea parametrilor caracteristici și prezentarea acestora se face prin procedee standardizate, clasificările masivelor de rocă prezintă avantajul că pot conduce la decizii ingineresti bazate pe experiența lucrărilor de același tip realizate în roci similare.

Detalii privind procedeele standardizate prin care se determină parametrii caracteristici precum și indicii de clasificare sunt prezentați în standardul SR EN ISO 14689-1:2004: Cercetări și încercări geotehnice. Denumire și clasificarea rocilor. Partea 1: Denumire și descriere. Referiri sunt și în SR EN 1997-2:2007-Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 2: Investigarea și încercarea terenului.

4.1. Sistemul RQD

a) Indicele RQD (**R**ock **Q**uality **D**esignation) se bazează pe analiza carotelor recuperate din foraje de studii.

b) Indicele RQD se definește ca fiind expresia procentuală a raportului dintre suma lungimilor fragmentelor de carotă care au lungimea mai mare sau egală cu 10 cm și lungimea forajului din care s-a extras carota :

$$RQD = \frac{\sum \text{fragmente recuperate} \geq 10 \text{ cm}}{\text{lungimea carotata}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

c) Clasificarea rocilor în funcție de indicele RQD este prezentată în tabelul nr.1.

Tabelul nr.1. Calitatea masivului în funcție de RQD

RQD (%)	0 – 25	25 – 50	50 – 75	75 – 90	>90
Calitatea masivului de rocă	Foarte slabă	Slabă	Acceptabilă	Bună	Foarte bună

d) Procedura de determinare a indicelui RQD este foarte sensibilă la calitatea echipamentului și la gradul de calificare a personalului. Se va avea în vedere ca la extragere sau manipulare să nu se rupă carota, modificând lungimea fragmentelor.

4.2. Sistemul RMR

a) Clasificarea RMR (**R**ock **M**ass **R**ating) ține cont de cinci parametri caracteristici :

- rezistența la compresiune uniaxială a rocii intacte ;
- indicele RQD ;
- interspațiul dintre rosturi (discontinuități) ;
- caracteristicile rosturilor (rugozitate, alterarea fețelor, deschidere, material de umplutură) ;
- prezența apei subterane.

b) Fiecărui dintre parametri caracteristici i se atașează un indice numeric parțial. Valorile indicilor parțiali sunt determinate conform tabelului nr.2.

Tabelul nr.2. Indici corespunzători parametrilor caracteristici

Parametri	Descriere și valori numerice						
Rezistența punctuală / Rezistența uniaxială	$\frac{> 10 \text{ MPa}}{> 250 \text{ MPa}}$	$\frac{4 - 10 \text{ MPa}}{100 - 250 \text{ MPa}}$	$\frac{2 - 4 \text{ MPa}}{50 - 100 \text{ MPa}}$	$\frac{1 - 2 \text{ MPa}}{25 - 50 \text{ MPa}}$	$\frac{-}{1 - 25 \text{ MPa}}$		
					5-25	1-5	<1
Indice n_1	15	12	7	4	2	1	0
RQD (%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
Indice n_2	20	17	13	8	3		
Interspațiul dintre discontinuități	>2 m	0,6 – 2 m	20 – 60 cm	6 – 20 cm	< 6		
Indice n_3	20	15	10	8	5		
Caracteristica rosturilor	Rosturi discontinue fără separație	Pereți ușor ru-goși deschidere <1mm fără alterări	Pereți ușor ru-goși deschidere <1 mm cu alterări	Pereți liși sau umpluturi < 5 mm sau deschideri 1-5 mm	Umplutură slabă >5 mm sau deschideri > 5mm		
Indice n_4	30	25	20	10	0		
Apa subterană (l/min, 10m)	0	< 10	10-25	25-125	>125		
Raport u/σ	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
Aspect	uscat	umezit	umed	picurări	debitează		
Indice n_5	15	10	7	4	0		

c) Indicele *RMR* se evaluează prin sumarea indicilor numerici parțiali.

d) Pe baza valorii indicelui *RMR* rocile se clasifică în 5 clase, după domeniile indicate în tabelul nr.3.

Tabelul nr.3. Clase de rocă departajate prin RMR

$RMR = \sum_{i=1}^5 n_i$	0...25	25... 40	40 ...- 60	60... 80	80... - 100
Clasa	V	IV	III	II	I
Caracterizare	Foarte slabă	Slabă	Medie	Bună	Foarte bună
Coeziune c (Mpa)	< 0,1	0,1...-0,12	0,12...-0,3	0,3... -0,4	> 0,4
Unghi de frecare interioară φ°	< 15	15... -25	25... -35	35... 45	> 45

e) Pentru fiecare clasă din tabelul nr.3 se atribuie și estimări globale ale coeziunii și unghiului de frecare interioară pentru masivul de rocă.

f) Indicele global RMR poate fi corectat în funcție de orientarea stratificației și căderea discontinuităților în raport cu direcția de avans a tunelului sau galeriei.

g) Caracterizarea situației lucrării în funcție de direcția și orientarea discontinuităților rezultă din tabelul nr.4.

Tabelul nr.4. Caracterizarea orientării tunelului în raport cu discontinuitățile

Direcția stratificației	Căderea discontinuităților față de sensul excavării	Caracterizarea
Perpendiculară pe axa galeriei	Căderea 45° ... 90° în sensul excavării	foarte favorabilă
	Căderea 20° ... 45° în sensul excavării	favorabilă
	Căderea 45° ... 90° inversă față de sensul excavării	acceptabilă
	Căderea 20° ... 45° inversă față de sensul excavării	defavorabilă
Paralelă cu axa galeriei	Căderea 50° ... 90°	foarte defavorabilă
	Căderea 20° ... 45°	acceptabilă
Oricare	Căderea 0° ... 20°	defavorabilă

g) Corecțiile indicelui global RMR în funcție de orientarea stratificației și căderea discontinuităților sunt cele din tabelul nr.5.

Tabelul nr.5. Corecțiile indicelui RMR

Orientarea și căderea Tipul lucrării	Foarte favorabilă	Favorabilă	Acceptabilă	Defavorabilă	Foarte defavorabilă
Excavații subterane	0	-2	-5	-10	-12

4.3. Sistemul Q

a) Clasificarea Q ține cont de șase parametri caracteristici :

- indicele RQD ;
- numărul de familii de rosturi (J_n) ;
- rugozitatea pereților discontinuităților cu efect direct asupra stabilității (J_r) ;
- gradul de alterare a pereților discontinuității și eventual prezența umpluturii (J_a) ;
- prezența apei (J_w) ;
- factorul de relaxare a eforturilor (SRF).

b) Indicele de calitate Q al masivului de rocă se determină din expresia :

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right). \quad (2)$$

c) Factorii produsului ce definește indicele Q au fiecare o semnificație fizică distinctă. Raportul RQD / J_n caracterizează dimensiunile blocurilor, raportul J_r / J_a caracterizează rezistența la forfecare interblocuri, iar raportul J_w / SRF caracterizează efortul efectiv pe contactul dintre blocuri.

d) Fiecărui dintre indici i se atribuie o valoare numerică, pe criterii cantitative sau calitative.

e) **Pentru RQD** valoarea numerică este dată de relația (1), cu singura corecție că pentru $RQD < 10$ se atribuie $RQD = 10$ (%).

f) **Pentru numărul de familii de rosturi** valorile numerice ale indicelui parțial J_n se atribuie pe baza inventarului discontinuităților din amplasament :

– Rocă cu foarte puține rosturi (N1)	$J_n = 0,5 \dots 1$
– O familie de rosturi (N2,a)	$J_n = 2$
– O familie de rosturi însoțită de rosturi rare pe alte direcții (N2,b)	$J_n = 3$
– Două familii de rosturi (N3,a)	$J_n = 4$
– Două familii de rosturi însoțite de rosturi rare pe alte direcții (N3,b)	$J_n = 6$
– Trei familii de rosturi (N4)	$J_n = 9$
– Patru sau mai multe familii de rosturi însoțite de rosturi și pe alte direcții care fragmentează masivul în blocuri de dimensiuni reduse (N5)	$J_n = 15$
– Rocă foarte fracturată	$J_n = 20$

g) **Pentru rugozitatea pereților** valorile numerice ale indicelui parțial J_r se atribuie în funcție de continuitatea și aspectul fețelor rostului :

– Rosturi discontinue	$J_r = 4$
– Rosturi neregulate, ondulate	$J_r = 3$
– Rosturi lise, ondulate	$J_r = 2$
– Rosturi spălate, ondulate	$J_r = 1,5$
– Rosturi plane, neregulate	$J_r = 1,5$
– Rosturi plane, lise	$J_r = 1,0$
– Rosturi plane, spălate	$J_r = 0,5$

În cazul rosturilor cu material de umplutură alcătuit din minerale argiloase, în grosime suficientă ca să împiedice contactul dintre fețe, se atribuie o valoare $J_r = 1$. În oricare dintre situațiile anterioare, dacă interspațiul mediu dintre rosturi este mai mare de 3 m, J_r se majorează cu o unitate.

h) **Pentru gradul de alterare** valorile indicelui J_a se evaluează diferențiat pentru trei cazuri distincte, definite de contactul dintre fețele rosturilor :

1. Fețele rostului sunt în contact :

- Rosturi cimentate, cu liant cuarțitic sau similar $J_a = 0,75$
- Rosturi cu pereți nealterați, cu pete numai în suprafață $J_a = 1,0$
- Rosturi cu pereți ușor alterați, având umpluturi cu minerale rigide sau cu particule nisipoase fără argilă $J_a = 2,0$
- Rosturi cu fețe acoperite de argile prăfoase sau nisipoase $J_a = 3,0$
- Rosturi cu fețe acoperite de minerale argiloase cu caolinit, talc, mică, gips sau grafit în grosimi de maxim 1 ... 2 mm $J_a = 4,0$

2. Fețele rostului intră în contact la forfecări de maxim 10 cm :

- Rosturi cu umplutură din nisip sau roci dezintegrate $J_a = 4,0$
- Rosturi cu material de umplutură din minerale puternic consolidate cu grosime < 5 mm $J_a = 6,0$
- Rosturi cu material de umplutură mediu sau slab consolidat, din minerale argiloase cu grosime < 5 mm $J_a = 8,0$
- Rosturi cu umpluturi din argile cu proprietăți de umflare, de tip montmorillonit, cu grosime < 5 mm $J_a = 8,0..12,0$

3. Fețele rostului nu sunt în contact :

- Rosturi cu zone sau benzi de rocă dezintegrată $J_a = 6,0$
- Rosturi cu umplutură din fragmente de rocă $J_a = 6,0..8,0$
- Rosturi cu umplutură din materiale argiloase, în funcție de gradul de consolidare $J_a = 8,0..12,0$
- Rosturi cu umplutură din argile nisipoase sau prăfoase, fără înmuiere $J_a = 5,0$
- Rosturi cu umplutură argiloasă $J_a = 13,0..20,0$

g) **Pentru influența dată de prezența apei** valorile indicelui J_w se determină în funcție de afluxul de apă la deschiderea excavației sau/și în funcție de presiunea apei interstițiale. Astfel :

- Excavații uscate sau cu aflux minor de apă, local sub 5 l /min ; presiune interstițială $< 0,1$ MPa $J_w = 1,0$
- Aflux mediu de apă, cu spălări ocazionale ale rostului; presiune interstițială în gama 0,1 – 0,25 MPa $J_w = 0,66$
- Aflux mare de apă :
presiune interstițială mare în gama 0,25-1 MPa $J_w = 0,5$
- Aflux mare de apă, cu spălarea materialului din rost ;
presiuni interstițiale în gama 0,5 – 1 MPa $J_w = 0,33$
- Aflux foarte mare de apă la deschiderea excavației cu diminuare în timp ;
presiune interstițială > 1 MPa $J_w = 0,1..0,2$
- Aflux foarte mare de apă, constant în timp $J_w = 0,05..0,1$

h) **Pentru factorul de reducere a eforturilor**, valorile indicelui parțial *SRF* se determină diferit, în trei situații posibile.

1. În cazul în care excavația în rocă intersectează o zonă slabă, susceptibilă de a produce surpări :
 - Zone slabe extinse, conținând argile sau roci descompuse $SRF = 10,0$
 - Zone cu multiple rupturi prin forfecare $SRF = 7,5$
 - O singură zonă slabă, cu conținut argilos $SRF = 2,5 \dots 5,0$
 - O singură zonă de forfecare în rocă masivă $SRF = 2,5$
2. În cazul rocilor masive, în funcție de starea de efort *in situ* (efort principal σ_1), comparată cu rezistențele la compresiune (σ_c) și la întindere (σ_t), conform tabelului nr.6.

Tabelul nr.6. Factorul de reducere al eforturilor pentru roci masive

Caracteristica	σ_c/σ_1	σ_t/σ_1	<i>SRF</i>
<i>RMR</i> redus	> 200	> 13	2,5
Eforturi medii	200 ... 10	13 ... 0,5	1,0
Eforturi mari	10 ... 5	0,5 ... 0,3	0,5 ... 2,0
Roci mediu fracturate	5 ... 2,5	0,3 ... 0,15	5 ... 10
Roci puternic fracturate	< 2,5	< 0,15	10 ... 20

3. În cazul rocilor cu dilatanță majoră sau cu potențial de umflare :
 - împingerea muntelui este moderată $SFR = 5 \dots 10$
 - împingerea muntelui este ridicată $SFR = 10 \dots 20$
 - umflarea rocii este moderată $SFR = 5 \dots 10$
 - umflarea rocii este semnificativă $SFR = 10 \dots 15$

5. Stabilizarea excavațiilor subterane

(1) În procesul de excavare starea de efort preexistentă în masiv este perturbată, iar în zona golului creat apar concentrări de eforturi. Roca din vecinătatea conturului excavat poate deveni instabilă și pot apărea surpări, uneori de mare amploare. Lucrările de sprijinire sunt cele care trebuie să intervină în procesul de reechilibrare a rocii, prevenind surpările și asigurând securitatea lucrării, atât în faza de execuție, cât și în perioada de exploatare.

5.1. Mecanisme de instabilitate

a) În cazul rocilor omogene și izotrope instabilitatea conturului excavat este generată de concentrările de efort care apar în zona conturului ca urmare a redistribuirii eforturilor inițiale din masiv.

b) Creșterea eforturilor tangențiale în vecinătatea conturului excavat poate conduce uneori la expulzarea unor fragmente de rocă sau chiar a unor blocuri de rocă din contur. Instabilitatea are un caracter fragil, cu cedare instantanee, favorizată de combinații defavorabile ale discontinuităților preexistente.

c) În cazul rocilor stratificate apar mecanisme de cedare specifice. În cazul rocilor cu stratificație înclinată, afectată de fisurația perpendiculară pe stratificație, conturul excavat devine instabil prin desprinderea de blocuri cauzată în principal de câmpul gravitațional. Dacă stratificația este orizontală, atunci la cheie se produce încovoierea unor lespezi de rocă, care se rup succesiv prin întinderea fibrei inferioare cu propagare spre masiv. Dacă stratificația este verticală cedarea se produce prin flambarea unor coloane verticale la pereți urmată de formarea unei bolți de surpare, ca urmare a cedării nașterilor.

d) În cazul în care masivul de rocă este afectat de plane de discontinuitate majoră, însoțite adesea de fisurație, în cheie are loc o surpare prin cedarea nașterilor și căderea de blocuri de rocă sub propria greutate. La cheie, sau în zona pereților laterali, apar blocuri de rocă instabile, care se pot desprinde din conturul excavat.

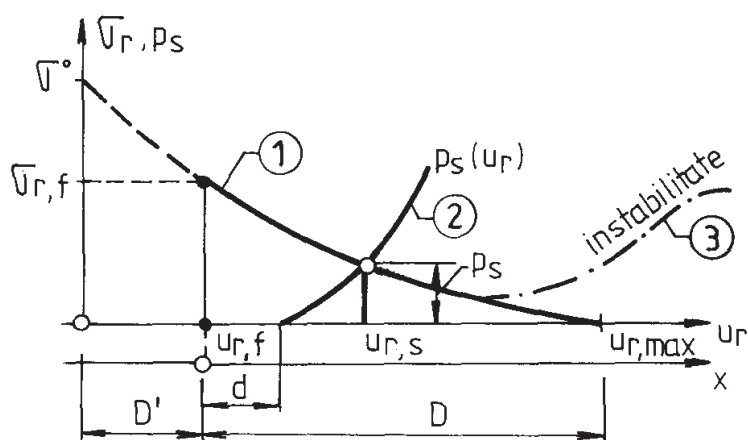
5.2. Diagrama convergență - fretare

(1) Structura unei lucrări subterane cuprinde golul excavat, lucrările de sprijinire/cămășuire care asigură stabilitatea excavației și masa de rocă înconjurătoare. Excavarea este un proces care se desfășoară în spațiu și în timp, iar redistribuirea eforturilor inițiale din masiv și interacțiunea dintre masa de rocă (care suferă deformații) și structurile de sprijinire (care tind să limiteze aceste deformații și se încarcă odată cu propria deformare) sunt, de asemenea, fenomene ce evoluează pe măsura progresului excavării.

a) Deplasarea conturului excavat către gol în procesul excavării poartă denumirea de deplasare de convergență sau prescurtat convergență.

b) Împiedicarea deplasărilor de convergență se numește fretare. Frontul excavației împiedică parțial producerea deplasărilor de convergență prin masa de rocă neexcavată și, ca urmare, prezența frontului are efect de "fretare". Pe măsură ce efectul de fretare indus de frontul excavației descrește în timp ce excavația progresează, în spatele frontului sprijinirea instalată intervine la rândul ei în împiedicarea deformațiilor mobilizând un nou efect de fretare.

c) Efectul tridimensional creat de front și împiedicarea parțială a deplasărilor de convergență pot fi puse în evidență printr-o reprezentare grafică denumită diagrama convergență - fretare (figura nr.1). În ordonată se reprezintă efortul radial normal pe conturul excavat. Sunt două abscise. Prima corespunde deplasărilor de convergență u_r , iar a doua poziției frontului, respectiv poziției sprijinirii.



Legendă:

σ_r - efortul normal pe conturul excavat	σ^0 - efortul inițial din masivul de rocă
$\sigma_{r,f}$ - cota parte din efortul inițial existent la momentul activării susținerii	p_s - presiunea exercitată de sprijinire
$u_{r,f}$ - deplasarea de convergență produsă pînă la activarea susținerii	u_r - deplasarea de convergență
d - distanța față de front a sprijinirii	$u_{r,s}$ - deplasarea spre gol a sprijinirii
D - distanța față de front unde nu se mai resimte influența frontului	$u_{r,max}$ - deplasarea de convergență maximă la reechilibrare fără sprijinire

Figura nr.1. Diagrama convergență - fretare

d) Curba nr.1 din diagrama convergență - fretare, denumită curba caracteristică a rocii, reprezintă relația dintre deplasarea radială produsă și efortul radial pe contur. Când frontul este situat chiar în dreptul secțiunii, deplasarea radială este $u_{r,f}$, iar efortul radial $\sigma_{r,f}$ este o cotă parte din efortul inițial σ^0 . Pe măsură ce frontul avansează, efectul de fretare dat de roca neexcavată descrește. Dacă masivul de rocă are capacitatea de a se reechilibra singur, se atinge o situație de echilibru dată de $u_r = u_{r,max}$ și $\sigma_r = 0$. Dacă însă, datorită deplasărilor de convergență excesive excavația devine instabilă (ramura 3 a curbei nr.1), atunci contribuția sprijinirii este absolut necesară.

e) Curba nr.2 din diagrama convergență - fretare, denumită curba caracteristică a sprijinirii, reprezintă relația dintre deplasarea radială impusă sprijinirii de deplasarea de convergență a rocii și presiunea radială exercitată de sprijinire pe contur, p_s , care se opune deplasării radiale.

f) Intersecția celor două curbe din diagrama convergență - fretare corespunde situației de echilibru, în care sprijinirea preia efectul de fretare indus pînă acum de front, deplasarea de convergență se stabilizează la $u_{r,s}$, iar pe conturul excavat interacțiunea rocă-sprijinire este caracterizată de presiunea de fretare p_s .

6. Sisteme de sprijinire - clasificare și alcătuire

6.1. Clasificare

a) În funcție de efectele structurale ale sprijinirilor sunt două sisteme:

- sprijinirea de tip elastic, cu ancore, cu șprîț-beton sau cu ancore și șprîț-beton, care devine activă din momentul instalării, se deformează odată cu roca și contribuie la reechilibrarea masivului de rocă;
- sprijinirea rigidă, cu cindre metalice, care devine activă numai după surparea conturului excavat; roca rămasă stabilă este un element pasiv în raport cu sprijinirea și exercită încărcări asupra cintrelor la deformarea către conturul excavat.

b) Suportul grafic al clasificării este dat de diagrama convergență-fretare din figura nr.2, iar alcătuirea constructivă este schițată în figura nr.3.

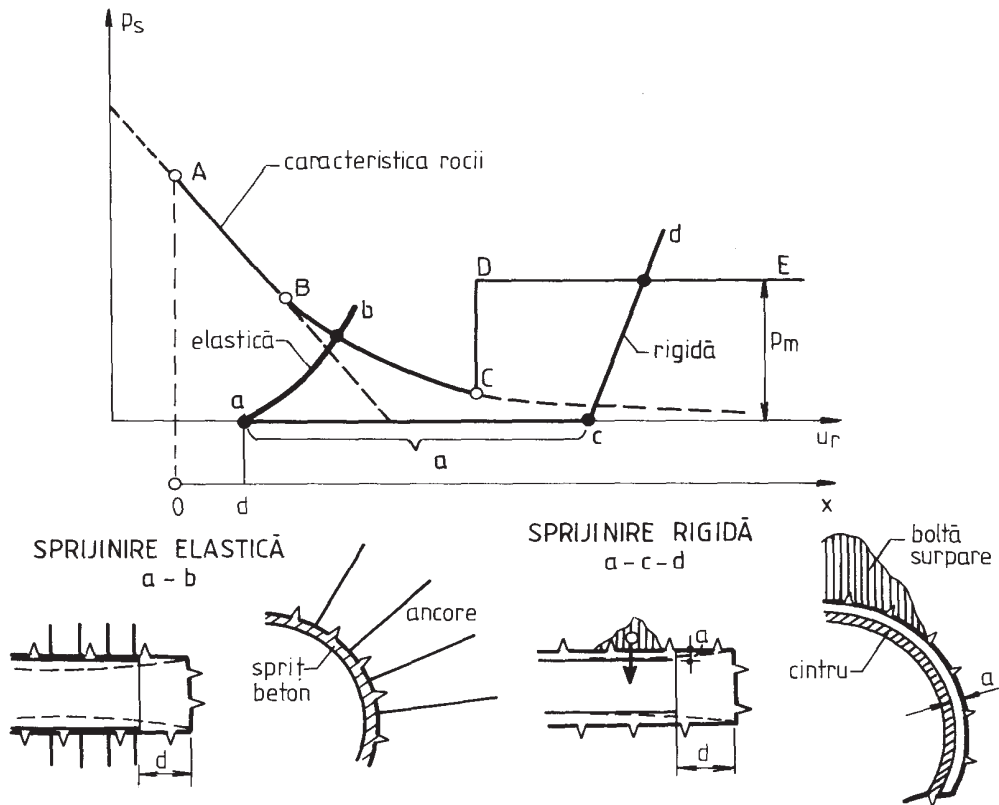


Figura nr.2. Clasificarea sprijinirilor în funcție de diagrama convergență-fretare

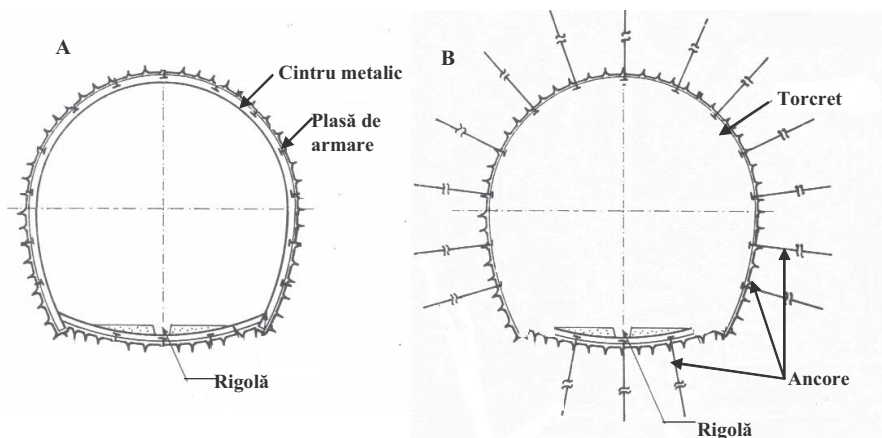


Figura nr.3. Sisteme de sprijinire: (A) cu ancore și șprîț-beton; (B) cu cintre metalice

6.2. Alegerea sistemului de sprijinire

a) Dimensionarea lucrărilor de sprijinire este posibilă numai în cazul rocilor omogene, neafectate de discontinuități. Complexitatea de comportare a maselor de rocă a impus formularea unor reguli empirice de alegere și predimensionare a sistemelor de sprijinire, având la bază clasificările uzual folosite pentru masivele de rocă: *RQD*, *RMR*, și *Q*.

6.2.1. Alegerea sistemului de sprijinire în funcție de *RQD*

Tabelul nr.7. Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de *RQD*

Calitatea rocii	Metoda de excavație	Sistemul de sprijinire		
		Ancorare	Șprîț-beton	Cintre metalice
Foarte bună $RQD > 90$	Forare Explozivi	Ocazional Ocazional	Ocazional, local Local, 6...8 cm	Ocazional 0...0,2 <i>B</i> Ocazional 0...0,3 <i>B</i>
Bună $75 < RQD < 90$	Forare Explozivi	Ocazional sau la 1,5...2 m În șah, la 1,5..2 m	Local, 6...8 cm La cheie și lateral 8...10 cm	La 1,5...2 m 0...0,4 <i>B</i> La 1,5...2 m 0,3...0,4 <i>B</i>
Acceptabilă $50 < RQD < 75$	Forare Explozivi	În șah, la 1,2..2 m În șah, la 1..1,5 m	La cheie, 6..8 cm La cheie și lateral 10 cm	La 1,5... 2 m 0,4...1 <i>B</i> La 1,2...1,5 m 0,6...1,3 <i>B</i>
Slabă	Forare	În șah, la 1..1,5 m	Contur, 8..10 cm combinat cu ancore	La 1,0...1,2 m 1,0...1,6 <i>B</i>

25<RQD<50	Explozivi	În șah, la 0,6..1,2 m	Contur, 10 cm combinat cu ancore	La 0,6...1,2 m 1,3...2 B
Foarte slabă RQD<25	Forare	În șah, la 0,6..1,2 m	Contur, 10 cm combinat cu cintre Contur, 10..12 cm	La 0,5 m 1,6...2,2 B
	Explozivi	În șah, la 1 m	combinat cu cintre	La 0,5 m 2,0...2,4 B

b) Recomandările sintetizate în tabelul nr.7 sunt valabile pentru galerii și tunele circulare cu $R = 1,5... 6$ m. Sunt tratate separat cerințele de susținere și încărcările în funcție de modalitatea de excavare, cu mașină de forat la secțiune plină sau cu explozivi.

c) În cazul sprijinirii cu cintre înălțimea bolții de surpare se exprimă ca o cotă x din lățimea B a excavației, iar împingerea verticală a muntelui este $p_m = \gamma_r \cdot x \cdot B$, unde γ_r este greutatea specifică a rocii.

6.2.2. Alegerea sistemului de sprijinire în funcție de RMR

d) Recomandările se referă numai la tunelele și galeriile excavate cu explozivi, cu deschideri între 6 și 12 m. Sinteza recomandărilor este redată în tabelul nr.8.

Tabelul nr.8. Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de RMR

Clasa de rocă	Excavarea	Sistemul de sprijinire		
		Ancorare	Șprîț-beton	Cintre metalice
I Foarte bună RMR: 81-100	La secțiune plină avans: 3 m	Nu este necesară sprijinirea, cu excepția unor ancore locale		
II Bună RMR: 61-80	La secțiune plină avans: 1-1,5 m sprijinire la 10..15m de front	Local, la cheie $l_{anc} = 3$ m la 2...2,50 m	Ocazional, 5 ... 6 cm	nu
III Medie RMR: 41-60	În două trepte avans: 1,50-3 m sprijinire la avans la 6 m de front	În șah, la 1,50 ... 2 m $l_{anc} = 3...3,5$ m plasă la cheie	La cheie 6 ... 10 cm La pereți 3 cm	nu
IV Slabă RMR: 21-40	În două trepte avans: 1-1,5 m sprijinire imediată după avans	În șah, la 1 ... 1,5 m $l_{anc} = 3...4,5$ m plasă pe contur	La cheie 10...15 cm La pereți 10 cm	Cintre ușoare sau medii, la 1,5 m
V Foarte slabă RMR < 20	În mai multe trepte avans: 0,5-1,5 m sprijinire imediat după avans șprîț- beton după pușcare	În șah, la 1 ... 1,5 m $l_{anc} = 4,5...6$ m plasă pe contur ancore în vatră	La cheie 15...18 cm La pereți 12 cm În front 5 cm	Cintre medii sau grele, la 0,75 m, cu palplanșe

6.2.3. Alegerea sistemului de sprijinire în funcție de clasificarea Q

e) În funcție de indicele Q și de dimensiunile excavației subterane sunt definite 38 de categorii de sprijinire. În lucrarea de față s-au reținut numai sistemele de sprijinire (cu numerotarea originală) specifice galeriilor și tunelurilor (deschideri sub 6 ... 10 m).

f) Sinteza recomandărilor este prezentată în tabelul nr.9 și în figura nr.4.

Tabelul nr.9. Recomandări pentru sistemele de sprijinire în funcție de indicele Q

Categoria sprijinirii	Q	RQD/Jn	Jr/Jn	Deschiderea (m)	Presiune de fretare (MPa)	Sistemul de sprijinire
17	10-4	>30	-	3,5...9	0,1	- ancorare ocazională, ancore libere sau betonate
		10-30	-	"	"	- ancorare sistematică, ancore libere sau betonate, la 1..1,5 m
		<10	-	>6	"	- ancorare sistematică, ancore libere sau betonate, la 1..1,5 m și șprîț-beton 2..3 cm
		<10	-	<6	"	șprîț-beton 3...5 cm
21	4-1	>12,5	<0,75	2...6	0,15	- ancorare sistematică, ancore libere sau betonate, la 1 m și șprîț-beton 2...3 cm
		<12,5	<0,75	"	"	- șprîț-beton 3...5 cm
		-	>0,75	"	"	ancorare sistematică, ancore libere sau betonate, la 1 m
22	4-1	10-30	>1	4-10	0,15	- ancorare sistematică, la 1 m și plasă
		<10	>1	"	"	- șprîț-beton 3...8 cm
		<30	<1	"	"	- ancorare sistematică, la 1 m și șprîț-beton cu plasă de armare 3...5 cm
		>30	-	"	"	- ancorare sistematică, la 1 m
25	1-0,4	>10	>0,5	1,5...4	0,225	- ancorare sistematică la 1 m și șprîț-beton pe plasă armare 5 cm
		<10	>0,5	"	"	- idem, ancore cu plasă
26	1-0,4	-	-	3...7	0,225	- ancorare sistematică la 1 m și șprîț-beton pe plasă de armare, ochiuri de 5...7,5 cm
30	0,4-	>5	-	2...6	0,3	- ancorare sistematică la 1m și șprîț-beton 5 cm

	0,1	<5		“	“	- ancorare sistematică la 1 m și șprîț-beton pe plasă de armare, ochiuri de 5...7,5 cm
--	-----	----	--	---	---	--

g) Recomandările referitoare la ancorare trebuie adaptate corespunzător în cazul rocilor la care, datorită eforturilor mari pe contur, există tendința desprinderii de fragmente. De obicei, distanța dintre ancore scade la 0,8 m și se utilizează ancore ușor pretensionate prin strîngerea piuliței.

h) O modalitate echivalentă de alegere preliminară a sprijinirii se bazează pe graficul din figura 4. Se utilizează un parametru adițional, intitulat “dimensiunea echivalentă”, D_e . Acesta se obține prin împărțirea dimensiunii semnificative a lucrării subterane – deschidere, diametru sau înălțime – la un coeficient denumit *ESR* (**E**quivalent **S**upport **R**atio).

i) Valorile coeficientului *ESR* sunt alese în funcție de scopul excavației subterane și de gradul de siguranță cerut lucrărilor de sprijinire:

- Galerii de studii, excavații temporare. *ESR* = 3-5
- Galerii hidrotehnice, tunele pilot, galerii direcționale ale unor caverne. *ESR* = 1,6
- Depozite subterane, tunele rutiere sau de cale ferată de mici dimensiuni, castele de echilibru, tunele de acces. *ESR* = 1,3
- Centrale hidroelectrice subterane, tunele de mari proporții, intersecții de galerii, caverne ale apărării civile. *ESR* = 1,0

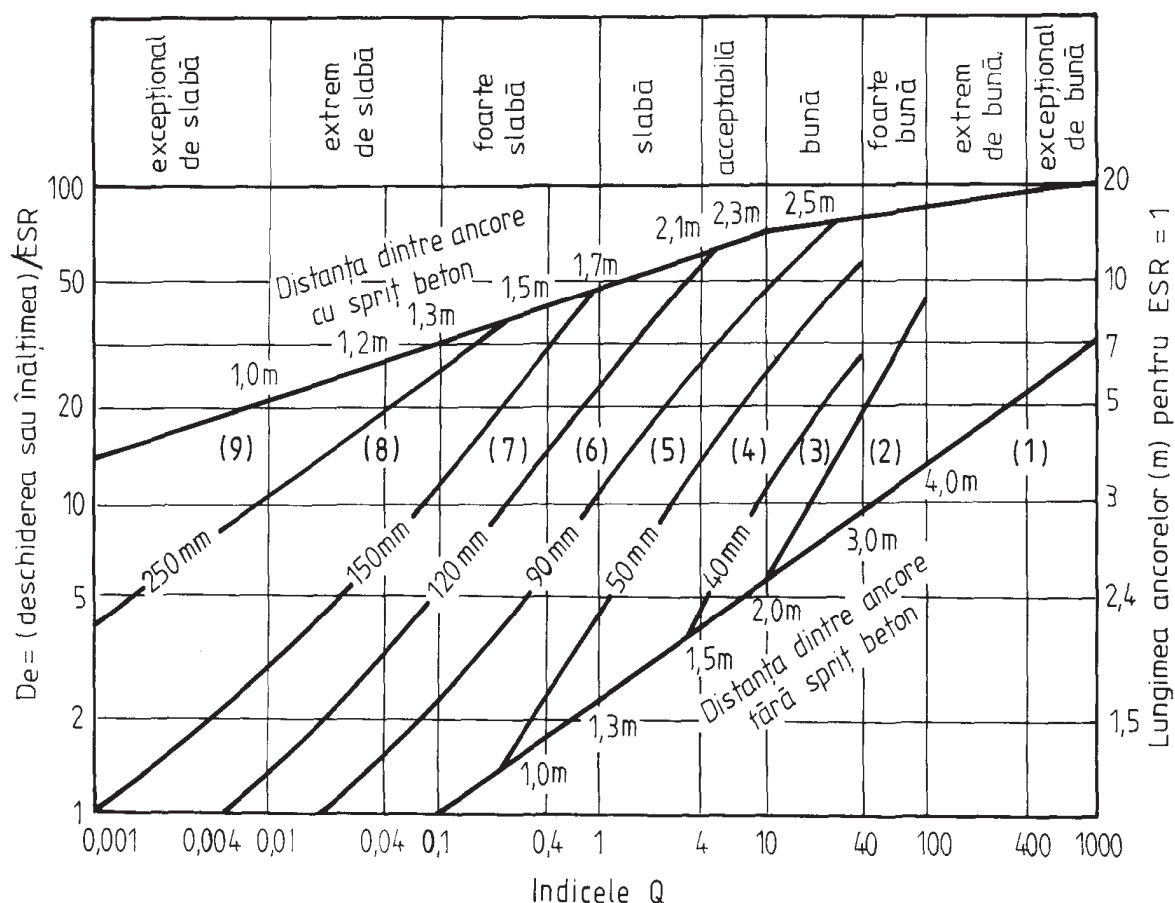


Figura nr.4. Grafic de alegere a sistemului de sprijinire în funcție de indicele Q.

j) Tipurile de sprijinire, a căror numerotare apare în figura nr.4 sunt:

- (1) - nesprrijinit;
- (2) - ancorare ocazională;
- (3) - ancorare sistematică;
- (4) - ancorare sistematică și șprîț-beton narmat sau, după caz, armat cu plasa, în grosime de 4-10 cm;
- (5) - ancore și șprîț-beton armat cu fibre de 5-9 cm;
- (6) - ancore și șprîț-beton armat cu fibre de 9-12 cm;
- (7) - ancore și șprîț-beton armat cu fibre de 12-15 cm;
- (8) - ancore, șprîț-beton armat cu fibre ≥ 15 cm și cindre ușoare;
- (9) - cămășuială de beton armat.

k) Sprijinirea prin ancorare utilizează de obicei ancore libere pe gaura de foraj, blocate în adâncimea forajului, fie prin despicare, fie prin sistemul conexpan. Acestea prezintă avantajul unei instalări rapide și nu necesită o tehnologie dificilă.

l) Ancorele sunt confecționate din fier beton cu diametrul de 25 sau 30 mm. Lungimea este uzual cuprinsă între 2 și 4 m, dar cel mai adesea, dacă nu sunt condiții geologice speciale, se utilizează

ancore de 2,50 m lungime. În mod normal, lungimea trebuie să fie proporțională cu deschiderea excavației, pentru a mări grosimea inelului de rocă autoportantă pe măsură ce deschiderea crește. O recomandare empirică, frecvent utilizată, specifică lungimea ancorei la $1/4-1/3$ din deschidere.

6.3 Adaptarea în execuție a sprijinirilor la situațiile din teren

a) La execuția lucrării subterane se impune adaptarea continuă a sprijinirii la condițiile din front. Adaptarea se face pe baza experienței dar, în egală măsură, și pe baza măsurării efectelor create de sprijinirile propuse. Procesul de predimensionare, adaptare și corectare a sistemelor de sprijinire poartă denumirea de “politica sprijinirilor”.

b) Pe măsură ce frontul avansează se stabilesc secțiuni de măsură care se echipează cu sisteme de monitorizare a deplasărilor rocii și ale eforturilor de contact între rocă și sprijinire. Secțiunile de măsură corespund unor zone caracteristice cu condiții geologice similare și cu parametri geomecanici asemănători.

c) Echiparea minimă a unei secțiuni de măsură cuprinde reperi pentru măsurarea convergenței și extensometre de foraj. Direcțiile de măsură sunt radiale, cel puțin una la cheie și câte una la nașteri.

d) Deplasările de convergență sunt principalul indicator al stabilizării sistemului rocă-sprijinire. Măsurarea lor se face cu distometru cu fir de invar tensionat sau, mai simplu, cu banda de oțel.

e) Deplasările de convergență, ca și cele de la extensometre, se măsoară la anumite intervale de timp și se reprezintă pe grafice care au în abscisă timpul (figura nr.5). Frecvența măsurătorilor se reduce în timp, de la o măsurătoare la câteva ore, la o măsurătoare la câteva zile și apoi la una la câteva săptămâni.

f) Dacă deplasările se stabilizează în timp (cazul-din figura nr.5) înseamnă că ansamblul rocă-sprijinire a atins o nouă stare de echilibru și deci că sprijinirea propusă este potrivită. Dacă există tendința de amplificare în timp a deplasărilor (cazul nr.2-din figura nr.5) atunci, pe de o parte trebuie intervenit cu armoferme sau cintre în zona deja sprijinită, iar pe de altă parte, în zonele următoare ce urmează a fi sprijinite se va reconsidera sprijinirea propusă, îndesind ancorele, măbind lungimea acestora, îngroșând sprijit-betonul etc.

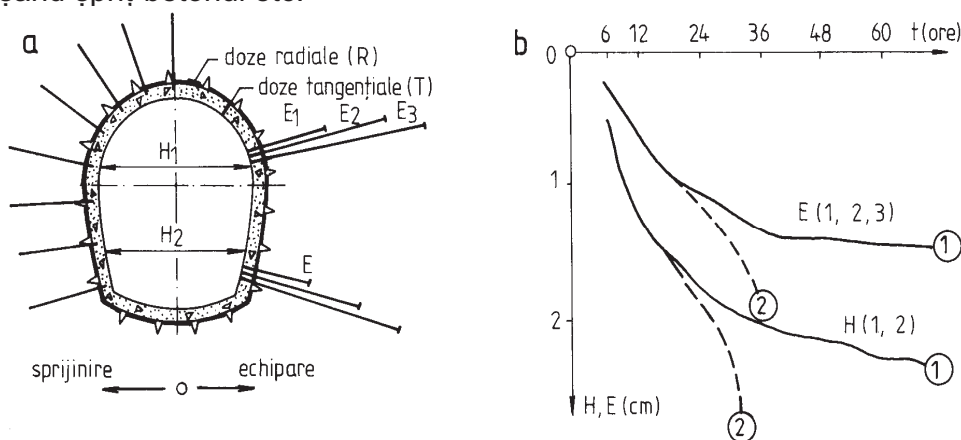


Figura nr.5. Urmărirea stabilizării excavației prin măsurători: a – echiparea secțiuni de măsură; b – reprezentarea deplasărilor măsurate în funcție de timp.

g) Pe baza datelor obținute în secțiunea de măsură se face validarea sprijinirii propuse sau se procedează la corectarea acesteia. Decizia este extrapolată pentru întreaga zonă caracteristică.

h) În cazul tunelelor sau galeriilor de mari dimensiuni, realizate în roci mai slabe, aplicarea simultană a sprijinirii odată cu deschiderea golului impune excavarea în trepte sau cu galerii direcționale. După excavarea unei trepte sau odată cu progresul galeriilor direcționale, se procedează la ancorarea conturilor care sunt comune cu cele ale excavației finale și la aplicarea de șpriț-beton.

i) În cazul unor deplasări de convergență mari, datorită cărora nu se mai poate asigura gabaritul interior al galeriei, se recurge la reprofilarea conturului.

j) Adaptarea tehnologiei de excavare la condițiile rocii, la dimensiunile excavației și la posibilitatea de reechilibrare a acesteia după excavare este parte integrantă a politicii sprijinirilor.

7. Calculul sprijinirilor

(1) Stabilirea soluției de sprijinire a excavațiilor subterane este bazată în principal pe înțelegerea fenomenelor de interacțiune, pe intuiție și pe experiență. În cadrul fazelor de proiectare se impune însă dimensionarea lucrărilor de sprijinire. Dimensionarea servește organizării tehnologice a execuției și, în special, estimării costurilor proiectelor. Datorită dificultăților de modelare prin calcul a fenomenelor și de determinare prin încercări a multitudinii de parametri care intervin în calcule, dimensionarea sprijinirilor are numai un caracter preliminar și orientativ.

7.1. Calculul sprijinirilor elastice prin metoda convergență - fretare

(1) Calculul sprijinirilor elastice se referă la verificarea unei soluții de sprijinire propuse având la bază caracteristicile rocii, presiunea de fretare necesară echilibrării masivului și capacitatea portantă a sprijinirii.

a) Etapele de calcul sunt:

- trasarea curbei caracteristice a rocii pe baza proprietăților mecanice ale acesteia;
- stabilirea unei anumite alcătuirii a sprijinirii, pentru care se trasează curba ei caracteristică.
- definirea noii stări de echilibru la intersecția dintre cele două curbe caracteristice și

determinarea presiunii de fretare necesare.

- compararea presiunii de fretare necesare cu presiunea maximă care poate fi exercitată de sprijinire și validarea sau invalidarea sprijinirii propuse:

i. dacă presiunea de fretare necesară este egală sau apropiată de presiunea capabilă a sprijinirii atunci sprijinirea propusă este satisfăcătoare;

ii. dacă presiunea de fretare necesară este mai mare decât presiunea capabilă a sprijinirii atunci sprijinirea se suplimentează.

7.1.1. Curba caracteristică a rocii

a) Caracteristica rocii în cazul comportării liniar elastice este o dreaptă (figura nr.6). În dreptul frontului efortul radial are valoarea aproximativă $\sigma_{r,f} = 0,7 \sigma^0$. Deplasarea maximă are valoarea: dată de relația nr.(2).

$$u_{r,\max} = \frac{1+\mu}{E} \sigma^0 R \quad (2)$$

unde: σ^0 este efortul inițial din masiv;
E este modulul de elasticitate al rocii;
 μ este coeficientul Poisson al rocii.

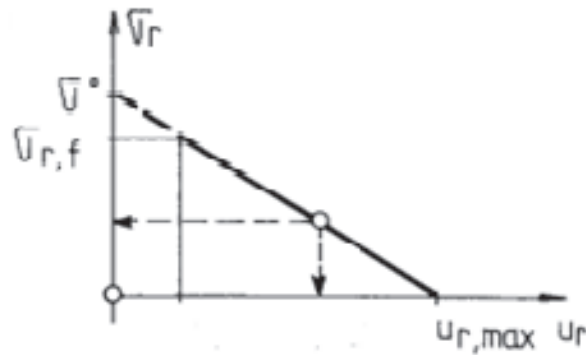


Figura nr.6. Caracteristica rocii în cazul comportării elastice

b) Caracteristica rocii în cazul comportării neliniare (elastoplastice sau elasto fragil plastice) are trei zone, departajate de intrarea în stadiu plastic (punctual B în figura nr.7, caracterizat de parametrul λ_e) și de declanșarea surpării (punctual C în figura nr.7, caracterizat de parametrul λ_{lim}).

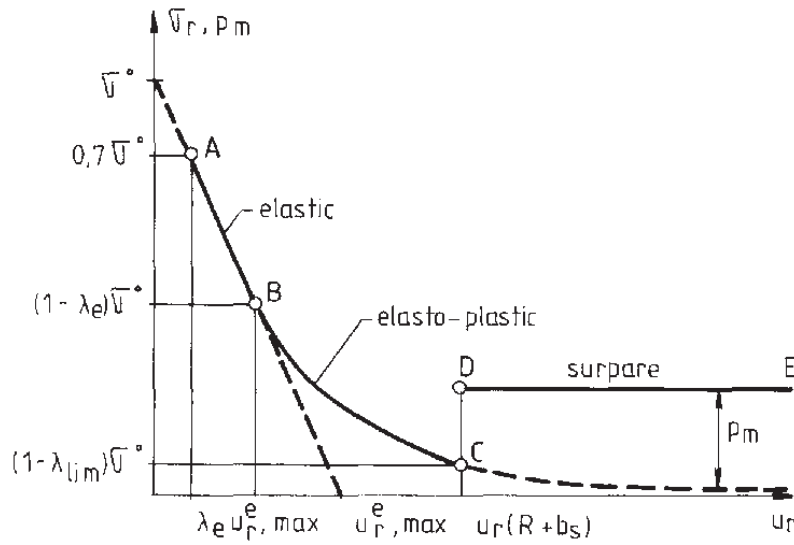


Figura nr.7. Caracteristica rocii în cazul comportării neliniare a rocii

c) În cazul comportării neliniare criteriul de plasticizare este criteriul Mohr - Culomb:

$$\sigma_1 = k_p \sigma_3 + c_p, \quad (3)$$

unde:

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad c_p = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

cu φ - unghiul de frecare internă al rocii și c - coeziunea.

iar σ_1 și σ_3 reprezintă eforturile principale maxime și minime.

d) Parametrul λ_e care definește intrarea în zona plastică este dat de expresia:

$$\lambda_e = \frac{1}{k_p + 1} \left(k_p - 1 + \frac{c_p}{\sigma^0} \right) \quad (5)$$

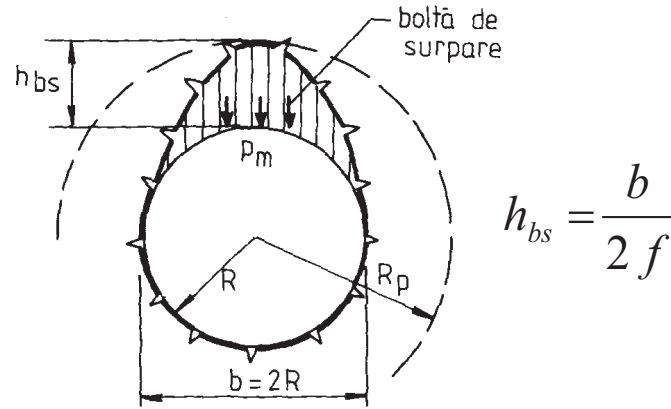
iar ramura BC a curbei caracteristice (figura nr.7) se construiește dând valori λ în domeniul 0,60 ... 0,95 și calculând ordonata $(1-\lambda)\sigma^0$ și abscisa

$$u_r = \frac{\lambda_e u_{r,max}^e}{\alpha + 1} \left[2 \left(\frac{R_p}{R} \right)^{\alpha + 1} + \alpha - 1 \right] \quad (6)$$

unde:
$$R_p = R \left(\frac{p}{1 - \lambda} \right)^n \quad p = \frac{2 - c_p / \sigma^0}{k_{p+1}} \quad \text{si} \quad n = \frac{1}{k_p - 1} \quad (7)$$

iar α este dilatanța rocii.

e) Curba caracteristică se modifică atunci când zona plastică se extinde și apare boltă de surpare. Înălțimea boltii de surpare este (figura nr.8):



$$h_{bs} = \frac{b}{2f}$$

Figura nr.8. Formarea boltii de surpare

unde $b = 2R$ este deschiderea excavatiei, iar f este coeficientul de tărie a rocii.

f) Delimitarea zonei de valabilitate a curbei caracteristice este dată de λ_{lim} , care rezultă din egalitatea:

$$R_p = R \left(\frac{P}{1 - \lambda_{lim}} \right)^n = R + h_{bs} \quad (8)$$

g) După apariția boltii de surpare, materialul desprins acționează asupra sprijinirii cu o presiune maximă $p_m = \gamma_r \cdot h_{bs}$, unde γ_r este greutatea specifică a rocii.

7.1.2. Curba caracteristică a sprijinirii

a) Caracteristica sprijinirii (denumită și curba efectului de fretare) este relația dintre creșterea deformației radiale, Δu_r , și sporul de efort radial exercitat de sprijinire asupra conturului excavat, Δp_s . Conform figurii nr.9, relația are abscisă inițială $u_{r,a}$, care ține seama de momentul instalării și de interspațiul dintre conturul excavat și sprijinire (ca la armoferme) și are forma generală:

$$\Delta p_s = \frac{k_s \Delta u_r}{R} \quad , \quad (9)$$

în care k_s este rigiditatea sprijinirii, iar R raza echivalentă a golului excavat.

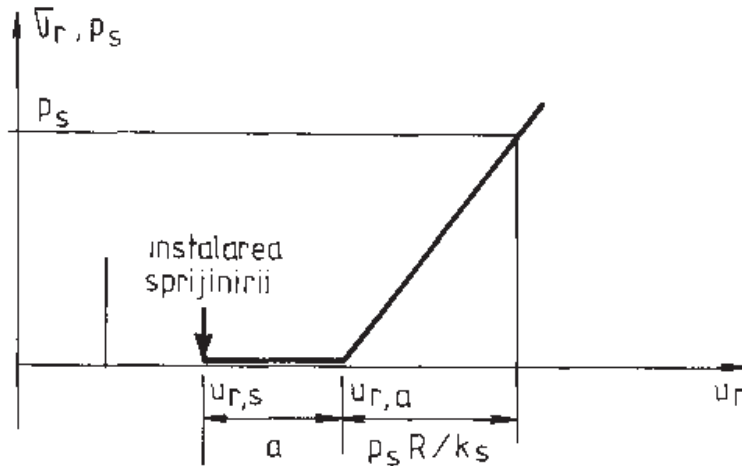


Figura nr.9. Caracteristica sprijinirii

b) Rigiditatea sprijinirii cu torcret are expresia:

$$k_s = \frac{E_t e}{(1 - \mu_t)^2 R} \quad (10)$$

unde: e este grosimea torcretului, E_t este modulul de elasticitate al torcretului, iar μ_t este coeficientul Poisson al acestuia.

c) Relația (10) este valabilă numai dacă inelul de șprîț-beton se închide în vatră. Dacă inelul rămâne deschis, rigiditatea acestuia se reduce corespunzător.

d) Valoarea maximă a presiunii de fretare exercitată de sprijinirea cu torcret se limitează la:

$$p_{t,\max} = \sigma_{c,t} \frac{e}{R}, \quad (11)$$

unde $\sigma_{c,t}$ este rezistența la compresiune a torcretului. În evaluările numerice însă, se alege uneori $\sigma_{c,t} \leq 6\text{Mpa}$, limitare care reduce riscul de voalare a inelului de torcret. Deși torcretul se mulează pe o plasă de armare, efectul acesteia se neglijează, dat fiind faptul că inelul lucrează în compresiune.

e) Ancorarea conturului excavat se face cu ancore nebetonate, blocate la capul dinspre masiv și fixate pe fața excavației cu plăcuțe. La fixare, prin rotirea pe filet a plăcuței, se obține, pe lângă blocare și o pretensionare a ancorei.

e) Rigiditatea sprijinirii cu ancore are expresia:

$$k_s = \frac{R}{e_r e_L} \cdot \frac{1}{\frac{4l}{\pi d^2 E_a} + Q} \quad (12)$$

unde, conform figurii nr.10, semnificația termenilor este:

R - raza excavației;

e_r - distanța dintre ancore pe contur;

e_L - distanța dintre ancore în lungul tunelului;

d - diametrul ancorei;

l - lungimea efectivă a ancorei;

E_a - modulul de elasticitate al ancorei;

Q este factorul de proporționalitate aferent încercării de zmulgere a ancorei (conform diagramei și notațiilor din figura nr.10,b):

$$Q = \frac{(u_2 - u_{2,e}) - (u_1 - u_{e,1})}{T_{a_2} - T_{a_1}} \quad (13)$$

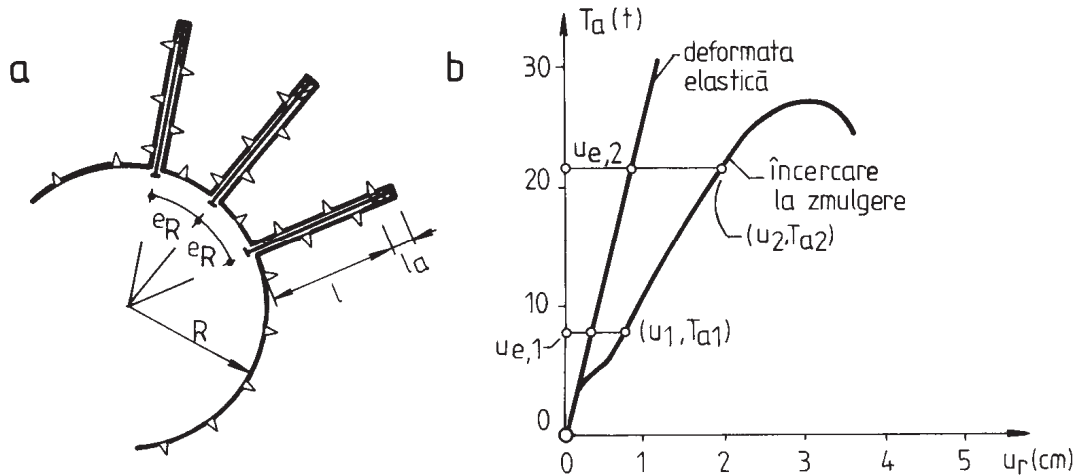


Figura nr.10. Sprijinirea cu ancore: a - schema sprijinirii;

b - rezultatele încercării de smulgere a unei ancore.

f) Valoarea maximă a presiunii de fretare exercitată de sprijinirea cu ancore se limitează la:

$$p_{s,max} = \frac{T_{a,r}}{e_r e_L}, \quad (14)$$

unde $T_{a,r}$ este forța maximă din ancoră la smulgere, determinată prin încercări proprii sau asimilată pe baza datelor din literatura de specialitate referitoare la încercări de smulgere pentru același tip de rocă și aceleași dimensiuni ale ancorei.

g) Trasarea curbei sprijinirii în cazul sistemelor de sprijinire combinate (torcret și ancore) ține seama de faptul că instalarea elementelor sprijinirii se face secvențial. Dacă se notează cu u_{r,a_1} deplasarea radială suportată de rocă până când devine activă componenta nr.1 a sistemului de sprijinire și cu u_{r,a_2} deplasarea radială la contur până când devine activă componenta nr.2 (figura nr.11), atunci se pot scrie relațiile:

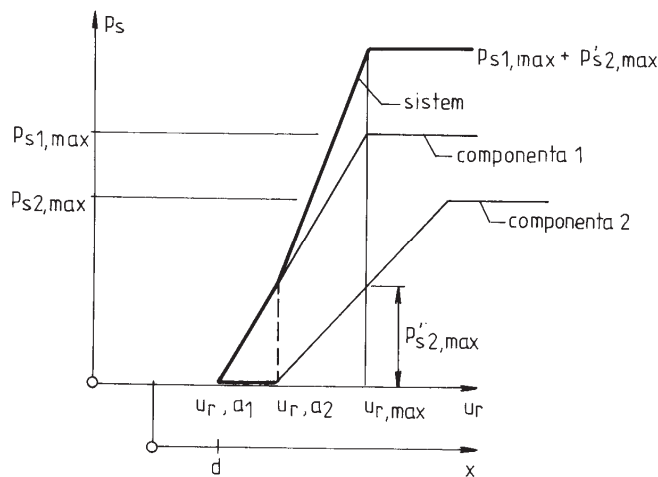


Figura nr.11. Trasarea caracteristicii sprijinirilor combinate.

$$u_r = u_{r,a_1} + \frac{R}{k_{s_1}} P_s \quad \text{pentru } u_{r,a_1} < u_r < u_{r,a_2} \quad (15,a)$$

$$u_r = u_{r,a_2} + \frac{R}{k_{s_1} + k_{s_2}} P_s \quad \text{pentru } u_r > u_{r,a_2} \quad (15,b)$$

Deplasarea radială maximă pe care o poate prelua sistemul de sprijinire este egală cu deplasarea maximă admisibilă pentru prima componentă a sistemului.

h) Valorile maxime ale presiunilor de fretare bazate pe date experimentale și măsurători în execuție sunt:

- pentru sprijinirea cu torcret, cu grosimi cuprinse între 5 și 20 cm, presiunea de fretare poate ajunge la 0,5 MPa în tunele/galerii circulare cu diametrul sub 4 m, respectiv până la 0,2 MPa în cazul tunelelor/galeriilor circulare cu diametrul de 10 m.

- pentru sprijinirea cu ancore, în funcție de distanța dintre ancore, lungimea acestora și rezistența rocii în zona de ancorare, presiunile de fretare variază între 0,05 MPa și 0,2 MPa;

7.2. Calculul sprijinirilor prin metoda bolții de surpare

(1) Metoda bolții de surpare se aplică la calculul sprijinirilor rigide, cu cintre grele. Cintrele și plasa sau elementele longitudinale pozate pe extradadosul cintrelor (între acestea și conturul excavat) trebuie să preia încărcările date de roca desprinsă din contur – surpări sau blocuri.

(2) În prezentul ghid relațiile de calcul se bazează pe teoria bolții de surpare a lui Protodiaconov, care asimilează roca – considerată puternic fisurată și fragmentată de excavarea cu exploziv - cu un mediu pulverulent. Deasupra excavației se formează o boltă de surpare, iar materialul de peste boltă își transmite încărcările către pereții laterali, printr-o zonă comprimată, denumită boltă de descărcare (figura nr.12). Încărcarea verticală este egală cu greutatea materialului surpat, iar Încărcarea orizontală este dată de împingerea activă exercitată pe pereții laterali.

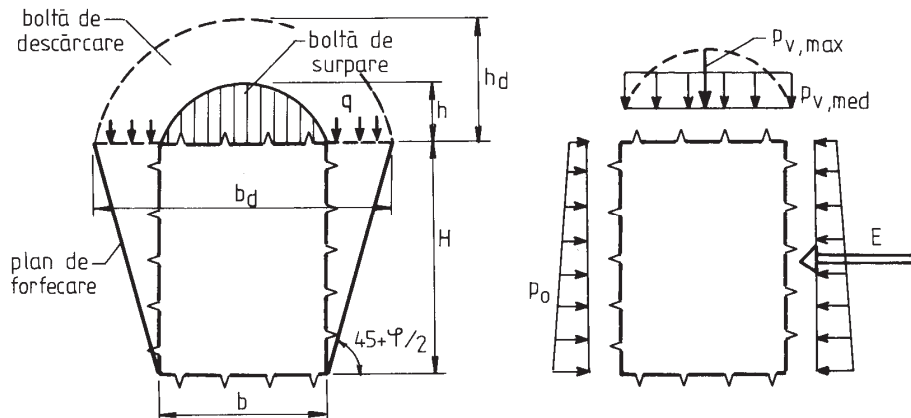


Figura nr.12. Notății pentru relațiile de calcul

a) Înălțimea boltii de surpare se evaluează în funcție de deschiderea b a excavației:

$$h = \frac{b}{2f} \quad (16)$$

unde f reprezintă coeficientul de frecare internă, denumit coeficient de tărie sau coeficient Protodiaconov.

b) Mărimea lui f se evaluează pe baza datelor culese în teren pentru galerii excavate, prin asimilare, în funcție de condițiile geologice reale. Încadrarea în baza de date și selecția coeficientului de tărie, se recomandă să se realizeze de inginerul geolog. Cu titlul informativ, sunt prezentate valorile lui f pentru câteva tipuri de roci.

Roca	Granite	Calcare	Conglomerate	Calcare fisurate	Marne argiloase
f	≥ 10	8	4	2	1

În multe situații se utilizează și o evaluare estimativă a coeficientului de tărie $f = R_c / 10$, în funcție de rezistența la compresiune a rocii R_c , unde R_c este exprimat în MPa.

c) Ordonata maximă a împingerii verticale asupra sprijinirii și respectiv împingerea medie sunt date de expresiile:

$$p_{v,\max} = \gamma_r \frac{b}{2f} \quad p_{v,\text{med}} = \frac{\gamma_r b}{3f} \quad (17)$$

d) Împingerea laterală totală are valoarea:

$$E = \frac{1}{2} H (2q + \gamma_r H) \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi / 2), \quad (18)$$

care se poate distribui liniar (cu distribuție trapezoidală sau constantă pe înălțimea excavației). Valoarea unghiului de frecare interioară φ rezultă din $\varphi = \arctg f$. Presiunea laterală este mult mai mică decât presiunea verticală. Ea nu apare decât în roci moi (cu $f < 2$), în care este posibilă formarea planurilor de alunecare.

e) În cazul rocilor stratificate sau cu planuri de și stuozitate bine definite teoriile bazate pe bolta de surpare sunt practic neaplicabile. Încărcarea transmisă sprijinirilor rigide depinde de direcția și căderea planurilor de discontinuitate, de frecvența și distanța dintre acestea și de efectele induse de excavarea cu explozivi. Încărcarea verticală este exprimată sub forma greutateii înălțimii coloanei de rocă ($p_v = \gamma_r \cdot h$). Valoarea coloanei h nu poate depăși $h = 0,5 b$ în cazul stratificației/ și stuozității orizontale, respectiv $h = 0,25 b$ în cazul stratificației/ și stuozității verticale.

8. Elemente specifice cavernelor subterane

a) Excavarea cavernelor nu se face la secțiune plină ci etapizat, în faze succesive, care asigură condiții de stabilitate mult mai bune. Datorită deschiderilor și înălțimilor mari, se excavează inițial bolta cavernei, într-o succesiune care să permită permanent controlul stabilității.

b) Pentru sprijinirea din zona bolții se utilizează curent două variante privind secvențele de excavare și sprijinire (figura nr.13):

- În prima variantă (figura nr.13,a) se realizează inițial o galerie direcțională centrală, sprijinită cu șprîț-beton, după care excavația se lărgeste spre cuzineți, concomitent cu ancorarea;

- În a doua variantă (figura nr.13,b), excavarea se începe cu două galerii direcționale în zona cuzineților, sprijinite prin ancorare. Deschiderea excavației bolții se face către zona centrală, utilizând roca neexcavată de sub boltă pentru suportul cofrajului bolții.

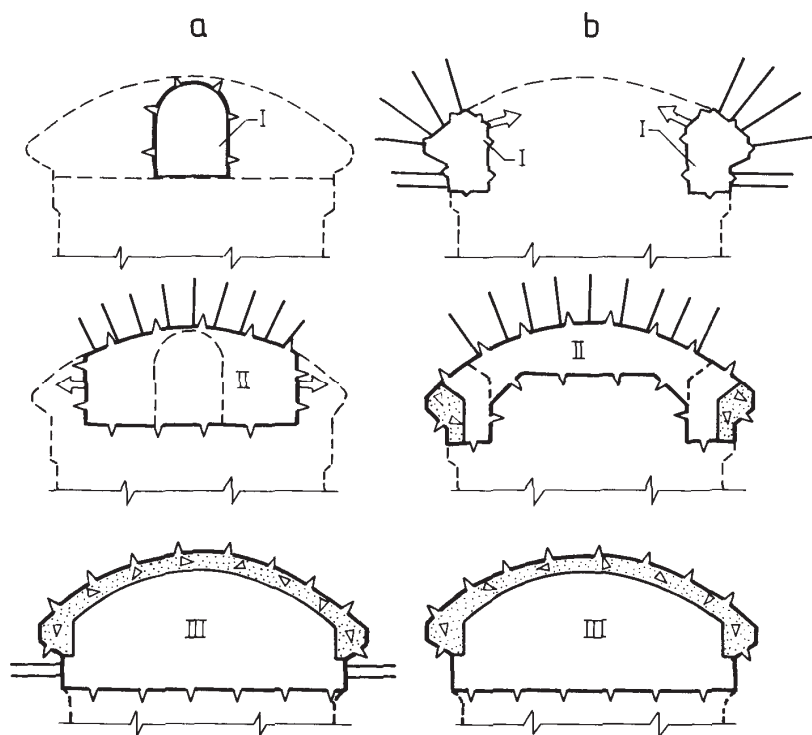


Figura nr.13. Faze de execuție la excavarea și sprijinirea bolții:
 a – cu galerie direcțională centrală; b – cu galerii direcționale la cuzineți.

c) Deschiderea excavației bolții, în lungul cavernei se face în sistemul cu lamele campioane alternante, păstrând între ele roca neexcavată cu rol de suport. Excavarea lamelor rămase se face numai după execuția bolții de beton armat aferentă lamelor excavate, care are astfel și rol de sprijinire pentru excavarea din a doua fază.

d) Instalarea ancorării se face imediat după fiecare etapă de deschidere a excavației din zona bolții, cât de repede permite tehnologia de excavare. În cazul rocilor cu $RQD \geq 50\%$, așa cum sunt cele din amplasamentele marilor caverne subterane, predimensionarea ancorării se face admițând că presiunea de fretare pe care trebuie să o asigure la limită ancorarea este de $p_{anc} = (0,1...0,2) \gamma_r B$, unde γ_r este greutatea specifică a rocii, iar B este deschiderea cavernei.

e) În cazul în care roca este fragmentată cu rosturi lise, cu frecare redusă, dimensionarea ancorării se face în funcție de unghiul de frecare pe discontinuități, conform graficului din figura nr.14.

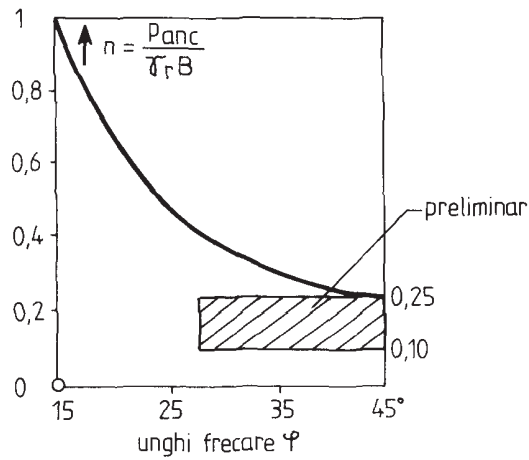


Figura nr.14. Necesarul de ancorare, exprimat prin raportul P_{anc} / γ_r , în funcție de unghiul de frecare internă pe discontinuități.

f) Lungimea ancorelor din zona bolții se stabilește în funcție de deschiderea cavernei. În figura nr.15, domeniul hașurat servește pentru dimensionarea preliminară. În grafic se prezintă și tendința actuală, bazată pe experiența lucrărilor executate în ultima perioadă.

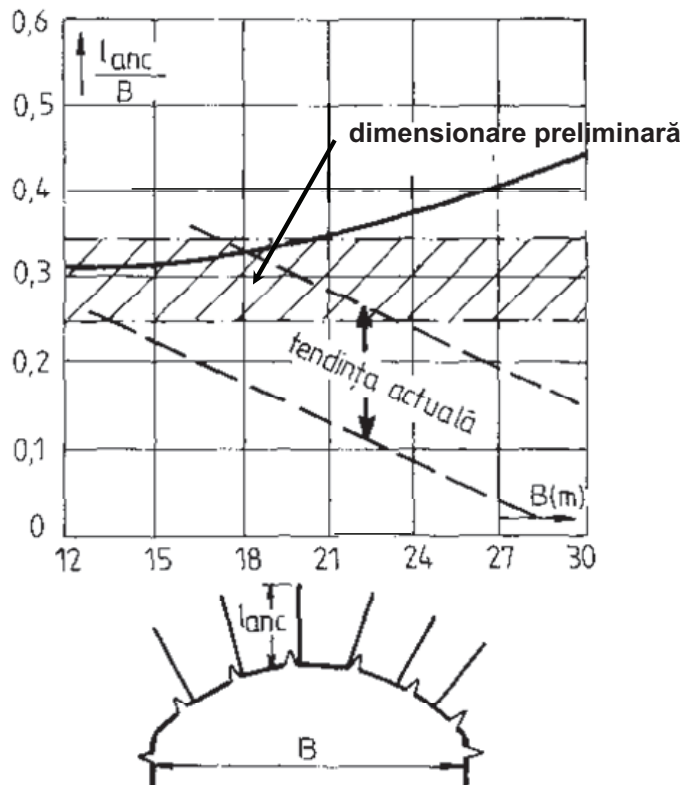


Figura nr.15. Recomandări privind lungimea ancorelor din zona bolții.

g) Excavarea zonei inferioare a cavernei propriu-zise se atacă după ce se betonează integral bolta, cu rol de cămășuială definitivă.

h) Dacă prin excavarea pereților cavernei se formează blocuri instabile, decupate de stratificație, ancorele sau ancorajele pretensionate trebuie astfel plasate încât să majoreze rezistența la forfecare mobilizată pe suprafața de alunecare (figura nr.16). Majoritatea ancorelor trebuie să traverseze planul de alunecare, urmând să se reducă la minim ancorele ce traversează planurile de separare. Orientarea primei categorii de ancore trebuie să formeze cu planul de alunecare un unghi $\theta = 15...30^\circ$, pentru a asigura rezistența la forfecare maximă.

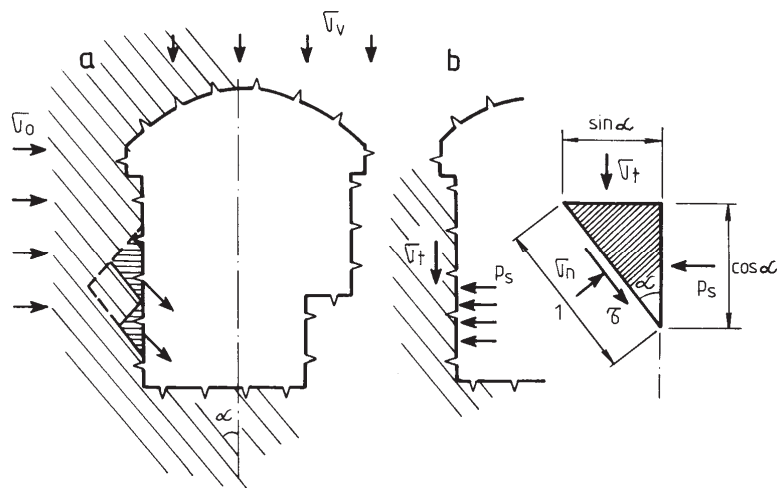


Figura nr.16. Prevenirea alunecărilor progresive interstrat:
a – mecanismul de instabilitate; b – notații

i) Ancorarea trebuie să asigure o presiune normală, p_s , care să mențină rezistența la forfecare interstrate. Mărimea acestei presiuni echivalente, date de ancorare, este:

$$p_s \geq \frac{\sigma_t \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} (\alpha + \varphi)}, \quad (19)$$

unde σ_t este efortul tangențial la perete, φ este unghiul de frecare între strate, iar α este înclinarea stratelor față de verticală.

9. Elemente specifice galeriilor hidrotehnice sub presiune

(1) Cămășuiala galeriilor sau tunelelor (boltă, boltă-pereți sau contur integral betonat) este tratată ca fiind o structură hiperstatică. Reacțiunile mobilizate pe conturul de rezemare a cămășuielii se evaluează admițând că roca este un mediu continuu și elastic. La evaluarea încărcării active exercitate de rocă, denumită împingerea muntelui, se face abstracție de efectul stabilizator al sprijinirilor, care sunt considerate lucrări provizorii. Împingerea muntelui se calculează conform subcapitolul 7.2, referitor la evaluarea încărcărilor asupra sprijinirilor rigide.

(2) În cazul galeriilor sub presiune, fenomenele de interacțiune au un caracter special, impus de concepția diferită a cămășuielilor acestor structuri. De această dată principala încărcare este dată de presiunea interioară a apei. Principalul rol al cămășuielii îl constituie asigurarea condițiilor de curgere, cu rugozitate controlată, în timp ce presiunea interioară este transferată, în cea mai mare măsură, masivului de rocă în care este realizată galeria.

a) Cămășuiala galeriei sub presiune se realizează sub forma unui inel relativ subțire din beton armat, cu grosimi de 15...30 cm, care supus presiunii interioare, este solicitat la întindere și fisurează și o coroană de rocă injectată cu lapte de ciment sub presiune în jurul cămășuielii care asigură etanșeitatea.

b) Se admite ipoteza simplificatoare conform căreia roca este un material continuu, elastic și izotrop, caracterizat prin modulul de elasticitate (deformație) E_r și prin coeficientul Poisson μ_r .

c) Reacțiunea elastică a rocii, q , este mobilizată de deformarea către masivul de rocă a cămășuielii supuse presiunii interioare a apei, p_i . (figura nr.17). Ea acționează în egală măsură atât la extradrosul cămășuielii, cât și pe conturul (suprafața) excavat al rocii.

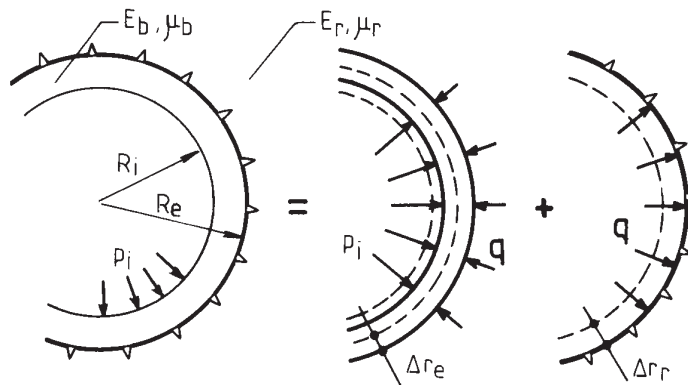


Figura nr.17. Definierea reacțiunii elastice a rocii

Valoarea reacțiunii elastice este:

$$q = \frac{2(1 - \mu_b) p_i}{R(a^2 - 1) + 2a^2(1 - \mu_b)} \quad (20)$$

unde notațiile sunt cele din figura nr.21, E și μ semnifică modulul de deformare și respectiv coeficientul Poisson, cu indicii b - beton, r - rocă, iar abrevierile sunt:

$$a = \frac{R_e}{R_i}, \text{ denumită grosimea relativă a cămășuielii,}$$

$$R = \frac{1 + \mu_r}{1 + \mu_b} \cdot \frac{E_b}{E_r}, \text{ denumită rigiditatea relativă cămășuială-masiv.}$$

d) În cazul rocilor mai puțin deformabile ($R < 5$) cămășuiala este puțin solicitată, o bună parte din presiunea interioară fiind preluată de masiv. Când roca este mai deformabilă ($R > 10$) este rațional să se prevadă cămășuieli mai subțiri pentru a majora transferul presiunii către masiv.

e) Grosimea inelului de beton al cămășuiei se alege pe criterii constructive, la un minim tehnologic rațional, iar armarea are rol de control al fisurației inelului –întins centric – care trebuie să-și mențină o continuitate la limită, fără însă ca deschiderea fisurilor să fie o stare limită de dimensionare.

f) Injecțiile de impermeabilizare/consolidare realizate la presiuni mari forțează masa de rocă să se deplaseze către cămășuiala de beton armat producând comprimarea acesteia; efectul, fiind premergător punerii galeriei sub presiune de apă, este denumit de precomprimare.

g) Efectul de precomprimare se include în calcule fiind asimilat cu exercitarea pe extrados a unei presiuni suplimentare βp_{inj} , cu $\beta < 1$, unde p_{inj} este presiunea de injectare. Mărimea lui β depinde de raportul E_r / E dintre modulul de deformare al masei de rocă și modulul de deformare a rocii propriu-zise. β variază între 0,1 pentru $E_r / E = 1$ și 0,4 pentru $E_r / E = 0,1$.

Referințe tehnice

A. Standarde:

Nr. crt.	Indicativ	Denumire standard
1.	SR EN ISO 14689-1:2004	Cercetări și încercări geotehnice. Denumire și clasificarea rocilor. Partea 1: Denumire și descriere.
2.	SR EN 1997-2:2007-Eurocod 7	Proiectarea geotehnică. Partea 2: Investigarea și încercarea terenului.
3.	SR EN 1997-2:2007/NB:2009	Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 2: Investigarea și încercarea terenului. Anexa națională
4.	SR EN 1997-2:2007/AC:2010	Eurocod 7: Proiectarea geotehnică. Partea 2: Investigarea și încercarea terenului

Notă:

1. Referințele date au fost luate în considerare la data elaborării prezentei reglementări tehnice.
2. La data utilizării reglementării tehnice se va consulta ultima formă în vigoare a referințelor legislative și tehnice.

Exemplu de calcul a unei sprijiniri elastice

1. Datele problemei

Pentru a se pune în evidență modul în care se dimensionează, respectiv se verifică un sistem de sprijinire prin metoda convergență – fretare (CF), în cele ce urmează se tratează cazul unui tunel ovoidal excavat în șisturi cristaline ușor alterate, la o adâncime $H_a = 40$ m.

În anexa informativă se fac referiri la relațiile matematice din prezentul ghid, cu respectarea numerotării acestora.

Forma excavației se asimilează cu una circulară cu raza echivalentă $R = 4$ m. Masa de rocă este caracterizată de:

- | | |
|---|--------------------------------|
| – greutatea specifică | $\gamma_r = 27 \text{ kN/m}^3$ |
| – unghiul de frecare interioară | $\varphi = 29^\circ$ |
| – coeziunea aparentă | $c = 0,12 \text{ MPa}$ |
| – modulul de deformație la descărcare | $E = 1200 \text{ MPa}$ |
| – dilatanța | $\alpha = 1,4$ |
| – efortul inițial din masiv, izostatic | $\sigma^0 = 1,08 \text{ MPa}$ |
| – coeficientul de tărie (Protodiaconov) | $f = 0,65$ |

2. Definirea caracteristicii rocii.

În primă instanță se determina deplasarea elastică maximă teoretică, cu relația nr.(2):

$$u_e^{\max} = \frac{1 + \mu}{E} \sigma^0 R = \frac{1 + 0,2}{1200} \cdot 1,08 \cdot 4 = 0,432 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 0,432 \text{ cm}$$

Parametrii caracteristici ai criteriului de plasticizare Mohr-Coulomb, conform relațiilor nr.(3) și (4) au valorile:

$$k_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2,882$$

$$c_p = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 0,40$$

Cota λ_e din deplasarea elastică maximă teoretică care se realizează efectiv în stadiul elastic se determină cu relația (5):

$$\lambda_e = \frac{1}{k_{p+1}} \left(k_{p-1} + \frac{c_p}{\sigma^0} \right) = \frac{1}{3,882} \left(1,882 + \frac{0,4}{1,08} \right) = 0,58$$

și de aici:

$$u_r^e = \lambda_e u_e^{\max} = 0,58 \cdot 0,432 = 0,250 \text{ cm.}$$

Pe baza acestor prime valori se determină coordonatele punctelor *A* și *B* ale caracteristicii rocii (vezi figura nr.7 și figura nr.A1):

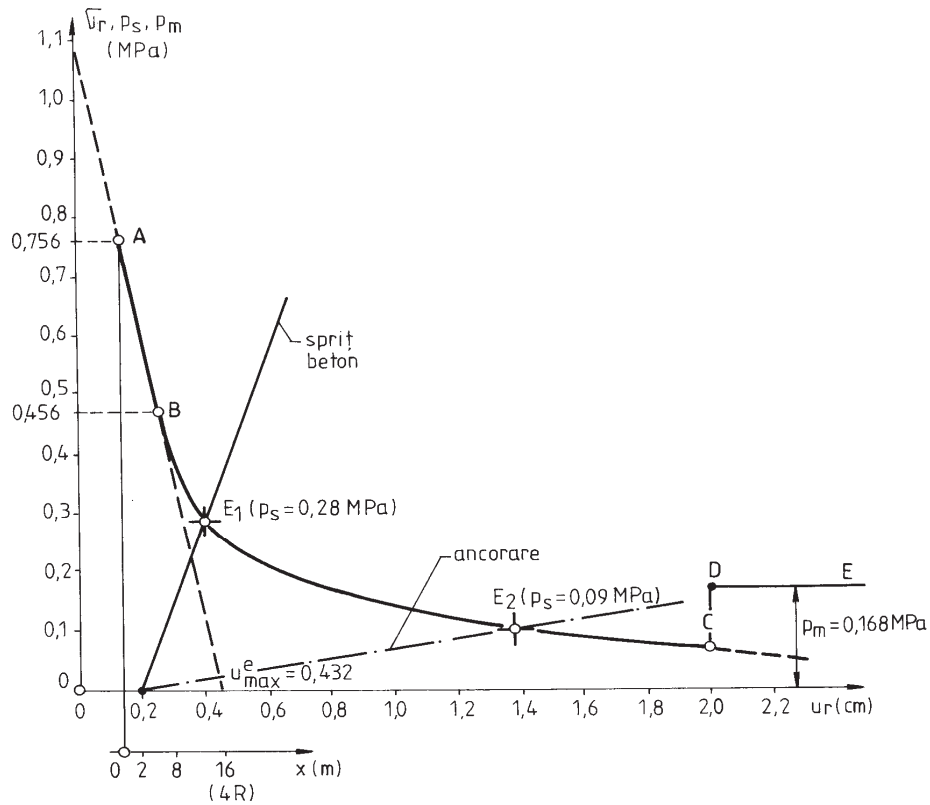


Figura nr.A1.

Diagrama de convergență-fretare pentru analiza stabilității galeriei din exemplul numeric.

$$A \begin{cases} \sigma_{r,A} = 0,7 \quad \sigma^0 = 0,756 \text{ MPa} \\ u_{r,A} = 0,3 \cdot 0,432 = 0,129 \text{ cm} \end{cases}$$

$$B \begin{cases} \sigma_{r,B} = (1 - \lambda_e) \sigma^0 = 0,453 \text{ MPa} \\ u_{r,B} = u_r^e = 0,250 \text{ cm} \end{cases}$$

Pentru trasarea porțiunii *BC* a caracteristicii, care corespunde comportării elasto-fragil plastice, se determină o serie de perechi de valori σ_r, u_r , dând valori parametrului λ în domeniul (0,60 ... 0,95). Relațiile de calcul nr.(7) pentru determinarea razei zonei plastice, respectiv nr.(6) pentru evaluarea deplasării radiale, se rescriu sub forma:

$$R_p = R \left(\frac{p}{1-\lambda} \right)^n$$

și:

$$u_r = A \left[2 \left(\frac{R_p}{R} \right)^{\alpha+1} + \alpha - 1 \right] = A \left[2 \left(\frac{R_p}{R} \right)^{2,4} + 0,4 \right],$$

unde:

$$p = \frac{2 - c_p / \sigma^0}{k_{p+1}} = 0,419$$

$$n = \frac{1}{k_{p-1}} = 0,531$$

$$A = \frac{\lambda_e u_{r,\max}^e}{\alpha + 1} = 0,104$$

În tabelul nr.A1 sunt prezentate rezultatele calculelor pentru cele patru valori caracteristice ale parametrului λ care au servit la trasarea zonei BC a curbei caracteristice.

Tabelul nr.CF.1. Calculul coordonatelor caracteristici rocii

λ	$\sigma_r = (1-\lambda)\sigma^0$ (MPa)	$R_p = R \left(\frac{0,419}{1-\lambda} \right)^{0,531}$ (m)	$u_r = 0,104 \left[2 \left(\frac{R_p}{R} \right)^{2,4} + 0,4 \right]$ (cm)
0,7	0,324	4,776	0,360
0,8	0,216	5,923	0,575
0,9	0,108	8,559	1,33
0,95	0,054	12,300	3,12

Limita de la care comportarea plastică generează formarea bolții de surpare (punctul C al caracteristicii) se determină din condiția (8), care se rescrie sub forma:

$$R \left(\frac{p}{1-\lambda} \right)^n = R + h_{bs}$$

unde înălțimea bolții de surpare are valoarea calculată conform relației (16):

$$h_{bs} = \frac{b}{2f} = \frac{8}{2 \cdot 0,65} = 6,25 \text{ m}.$$

Din relația de condiție rezultă:

$$1 - \lambda = \frac{p}{\left(\frac{R + h_{bs}}{R}\right)^{1/n}} = \frac{0,419}{\left(\frac{10,25}{4}\right)^{1,883}} = 0,07$$

Coordonatele punctului C vor fi:

$$\sigma_r = 0,07 \sigma^0 = 0,0756 \text{ MPa}$$

$$u_r = 0,104 \left[2 \left(\frac{10,25}{4}\right)^{2,4} + 0,4 \right] = 2,53 \text{ cm}$$

Ramura DE a caracteristicii rocii este o paralelă la axa u_r și are ordonata:

$$p_s = \gamma_r \cdot h_{bs} = 27 \cdot 6,25 = 168 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 0,168 \text{ MPa}$$

Caracteristica completă a rocii $ABCDE$ se poate urmări în figura nr. A1.

3. Determinarea caracteristicii sprijinirii

În conformitate cu ipoteza comportării liniar elastice a sprijinirii, caracteristica acesteia este o dreaptă a cărei ecuație este:

$$p_s = k_s \frac{u_r - u_{r,a}}{R}.$$

Pentru fiecare tip de sprijinire trebuie deci determinată rigiditatea k_s și deplasarea liberă a rocii $u_{r,a}$ până vine în contact cu sprijinirea. În continuare sunt analizate, pe rând, două tipuri de sprijinire.

4. Verificarea sprijinirilor propuse

4.1. Sprijinirea cu șpriț beton.

Se admite realizarea unui inel de torcret cu grosimea $e = 10 \text{ cm}$. La momentul întăririi, caracteristicile elastice ale materialului sunt $E_t = 20000 \text{ MPa}$ și $\mu_{sb} = 0,16$. Din relația (10) rezultă:

$$k_s = \frac{E_{sb} e}{(1 - \mu_{sb}) R} = \frac{20000 \cdot 0,1}{0,84 \cdot 4} = 595 \text{ MPa},$$

iar de aici dreapta caracteristică:

$$p_s = 1,48 \cdot u_r \text{ (MPa)}$$

cu u_r exprimat în centimetri.

În diagrama convergență-fretare din figura nr.A1 aplicarea torcretului se face la 2 m în spatele frontului ($x=d=2$ m), iar contactul cu roca este imediat ($u_{r,a}=0$).

Echilibrarea excavației se obține în punctul de intersecție a caracteristicii sprijinirii cu caracteristica rocii, E_1 . Din diagramă rezultă $p_s=0,28$ MPa.

Ținând seama că presiunea maximă ce poate fi exercitată de șpriț beton nu poate depăși valoarea determinată conform relației (11):

$$p_{s,\text{lim}}^{sb} = \sigma_{c, sb} \frac{e}{R} = 6 \text{ MPa} \frac{0,1}{4} = 0,15 \text{ MPa},$$

rezultă că torcretul nu este o sprijinire fezabilă decât dacă este asociată și cu ancorare.

4.2. Sprijinirea cu ancore

Ancorarea se realizează cu ancore nebetonate, cu lungimea $l = 2$ m, din bare de oțel cu diametrul $d = 25$ mm, dispuse într-o rețea de $e_R \cdot e_L = 1 \cdot 1$ m². Din încercările de smulgere au rezultat forța maximă din ancoră, $T_{a,\text{smulgere}} = 220$ kN, și coeficientul de proporționalitate din relația (13),

$$Q = \frac{\Delta u}{T_a} = 0,12 \text{ mm/kN}.$$

Rigiditatea sprijinirii se calculează conform relației (12):

$$k_s = \frac{R}{e_r e_L} \cdot \frac{1}{\frac{4l}{\pi d^2 E_a} + Q} = \frac{4}{1} \cdot \frac{1}{\frac{4,2}{3,14 \cdot (0,025)^2 \cdot 210\,000} + 0,12} = 32 \text{ MPa}.$$

Pe baza acesteia se exprimă apoi ecuația dreptei caracteristice:

$$p_s = \frac{k_s}{R} u_r = 0,08 u_r \text{ (MPa)},$$

cu u_r exprimat în centimetri,

Și în acest caz, instalarea ancorelor se face la 2 m în spatele frontului, iar efectul de interacțiune se manifestă imediat ($u_{r,a}=0$). Origina caracteristicii sprijinirii în diagrama convergență-fretare din figura nr.A.1 este aceeași ca în cazul sprijinirii cu șpriț-beton.

Echilibrarea excavației se obține în punctul E_2 , de intersecție între caracteristica sprijinirii cu ancore și caracteristica rocii. Din grafic rezultă $p_s = 0,09$ MPa.

Ținând seama că presiunea maximă ce poate fi exercitată de ancore poate atinge valoarea limită determinată conform relației (14):

$$p_{s,\text{lim}}^{\text{anc}} = \frac{T_{a, \text{smulgere}}}{l_r l_L} = 0,22 \text{ MPa}$$

rezultă că ancorarea asigură o sprijinire adecvată a golului excavat.

În mod similar se poate face analiza sprijinirii combinate ancore și torcret. O asemenea variantă se impune în cazul în care excavația va rămâne descoperită o perioadă lungă de timp, până la instalarea cămășuielii definitive, deci existând riscuri legate de alterarea rocii și coroziunea ancorelor.