

**Ejemplos  
resueltos  
y problemas  
a resolver  
de construcción  
subterránea**

**Parte I**

**MECANICA  
DE ROCAS**

Ing. Valery Provotorov  
Ing. Roberto Blanco Torrens  
Ing. José Otaño Noguel

Edición: Lic. Magaly López Ramos/Diseño: Ramón Jiménez Sánchez/  
Composición: Daniel Peña Pérez/Corrección: Héctor Bellver Alvarado/  
Emplante: José Angel Aponte León

© Valery Provotorov, 1991

© Sobre la presente edición:  
Ediciones ENPES, 1991

Ediciones ENPES  
San Miguel No 1111, esq. Mazón  
Vedado, La Habana, Cuba

## PROLOGO

El presente título *Ejemplos resueltos y problemas por resolver de Construcción Subterránea* se espera sea de gran utilidad para los alumnos que cursan la carrera de Ingeniería de Minas, así como también para los técnicos de nivel superior y medio de la producción. También puede ser utilizado por alumnos de la especialidad de **fortificación** de la Escuela Interarmas "Antonio Maceo". Este material es el primero de una serie de trabajos con los que se pretende dar solución a toda la actividad práctica del alumnado de la carrera de Ingeniería de Minas y propiciar aún más su estudio independiente.

Se agradece cualquier sugerencia o señalamiento que tienda a mejorar la calidad de los futuros trabajos.

Los autores

---

En el presente trabajo se dan un grupo de ejemplos resueltos y de problemas a resolver de construcción subterránea.

En la primera parte se ven algunos casos de cálculo de las diferentes propiedades físico-mecánicas de las rocas y en la segunda se dan ejemplos de cálculo de la presión minera para diferentes condiciones del macizo rocoso y distintos tipos de excavaciones.

### **PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS ROCAS**

Las rocas están constituidas por partículas minerales enlazadas entre sí por las fuerzas de interacción molecular o por sustancias cementantes. Sin embargo, a pesar de esto, ellas no se pueden considerar como cuerpos totalmente monolíticos, ya que presentan poros, oquedades, grietas, etcétera.

Cuando no existe el enlace entre las partículas minerales que la constituyen, la roca es como una acumulación mecánica de partículas sólidas o de detritos y se denomina roca suelta.

Para las rocas es característico la heterogeneidad de su estructura y de su composición (textura).

Se entiende por estructura de las rocas la disposición recíproca de las distintas partículas minerales o de los agregados minerales en las que las rocas pueden descomponerse y por textura de las rocas la disposición de los elementos estructurales y mecánicos en las capas de rocas. Las rocas según su textura pueden ser: estratificadas, esquistosas, agrietadas, desordenadas y homogéneas.

La textura y la estructura de las rocas influyen significativamente sobre sus propiedades físico-mecánicas. El conocimiento de las propiedades físico-mecánicas es de gran importancia ya que nos permite valorar una serie de factores los cuales son necesarios conocer para la correcta realización de los trabajos mineros.

A continuación en forma breve se hace un recuento de las principales propiedades físico-mecánicas:

*Masa específica:* Es el peso de la unidad de volumen de roca en estado **absolutamente** denso.

$$\gamma_e = \frac{G}{V_s}, \text{ kg/m}^3, \text{ g/cm}^3 \quad (1)$$

donde:

G- peso de la muestra de roca, kg o g

V<sub>s</sub>- volumen de la muestra de roca en estado denso, m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>

*Masa volumétrica:* Es el peso de la unidad de volumen de roca en estado natural.

$$\gamma_v = \frac{G}{V}, \text{ kg/m}^3, \text{ g/cm}^3 \quad (2)$$

donde:

V- volumen de la muestra de roca en estado natural, m<sup>3</sup>

*Densidad de la roca:* Es el grado de llenado de su volumen por la sustancia mineral.

$$D = \frac{V_s}{V}$$

o en por ciento:

$$D = \frac{V_s}{V} \cdot 100, \% \quad (3)$$

Sustituyendo en la fórmula (3) el valor de V<sub>s</sub> y V de las fórmulas (1) y (2) obtenemos

$$D = \frac{\gamma_v}{\gamma_e}$$

*Porosidad de las rocas:* Es el grado de llenado del volumen de la roca por poros (V<sub>p</sub>).

$$N = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad (4)$$

Considerando (1) y (2) se puede señalar que:

$$N = 1 - \frac{\gamma_v}{\gamma_e} \text{ o en por ciento}$$

$$N = 1 - \frac{\gamma_v}{\gamma_e} \cdot 100, \%$$

o considerando:

$$(D = \frac{\gamma_v}{\gamma_e})$$

$$N = 1 - D$$

*Esponjamiento:* Es la capacidad de la roca de aumentar su volumen después de ser extraída del macizo. El grado de esponjamiento se determina por el coeficiente de esponjamiento (K<sub>e</sub>).

$$K_e = \frac{V_o}{V_m} \quad (5)$$

donde:

V<sub>o</sub>- volumen de la roca mullida, m<sup>3</sup>

V<sub>m</sub>- volumen de la roca en el macizo, m<sup>3</sup>

El coeficiente de esponjamiento para una misma roca depende del método mediante el cual ella es separada del macizo y de las dimensiones de los pedazos que se obtienen como resultado de su fragmentación del macizo. Con el tiempo, la magnitud del coeficiente de esponjamiento disminuye, ya que la roca se densifica bajo la acción de la fuerza de gravedad. El esponjamiento de las rocas se utiliza en los cálculos de la cantidad de medios de transporte y del relleno del espacio laboreado.

**Agrietamiento de las rocas:** Es el conjunto de grietas de distinto origen y de diferentes dimensiones. Existen rocas monolíticas, poco agrietadas, de agrietamiento medio y muy agrietadas.

El grado de agrietamiento se determina por la cantidad de grietas en 1 m de roca o por la distancia entre éstas.

El agrietamiento de las rocas altera considerablemente la estabilidad del macizo e influye de forma sustancial en los parámetros de los trabajos de perforación y explosivos y sobre el método de laboreo y fortificación de las excavaciones mineras.

**Exfoliación:** Es la capacidad de las rocas de separarse en hojas muy finas, prismas, fibras y lentes por planos que tienen la menor cohesión. Esta propiedad de las rocas se utiliza en el laboreo de excavaciones con ayuda de dispositivos mecánicos.

**Poder de absorción de agua:** Es la propiedad de las rocas de retener el agua en los poros, oquedades y grietas.

La higroscopicidad se expresa en por ciento, dividido entre el volumen de la muestra.

**Permeabilidad:** Es la capacidad de las rocas de permitir el paso del agua. La magnitud de la permeabilidad está caracterizada por el coeficiente de filtración, que numéricamente es igual a la cantidad de agua, que pasa a través de la unidad de área de la sección transversal de la roca infiltrada con un gradiente de presión igual a la unidad.

**Capacidad gasífica:** Es la propiedad de las rocas de retener en sus poros y oquedades gas (metano o anhídrido carbónico) y de desprenderlo durante el laboreo de las excavaciones y durante la extracción del mineral.

**Elasticidad:** Se denomina así a la propiedad de las rocas de recuperar su forma inicial y sus dimensiones después que las fuerzas que actúan sobre ella cesan.

A la variación de la forma y las dimensiones de la roca después de cesar la acción de las fuerzas sobre ella se denomina deformación.

**Plasticidad:** Se denomina a la propiedad de las rocas de conservar la nueva forma después de cesar la acción de las fuerzas que actúan sobre ellas.

**Fragilidad de la roca:** Es la capacidad de las rocas de destruirse súbitamente bajo la acción de esfuerzos externos sin una deformación remanente perceptible.

**Esgurrimiento elástico:** Es la capacidad de las rocas de deformarse pausadamente como resultado de la acción sobre ella de una carga de intensidad constante.

La elasticidad, la fragilidad y la plasticidad se toman en cuenta para la elección del método de fragmentación de las rocas y en los trabajos de perforación y explosivos.

El escurrimiento elástico tiene una gran importancia en la elección del método de sostenimiento de las excavaciones mineras y en la dirección de la presión minera, particularmente a grandes profundidades.

**Fortaleza:** Se denomina a la capacidad de las rocas de resistir la acción de esfuerzos exteriores. La fortaleza de las rocas (f) depende de su composición mineralógica, su estructura y textura. La fortaleza de las rocas se valora por el coeficiente de fortaleza que numéricamente es igual a la relación entre el límite de resistencia a compresión axial de la muestra de roca ( $R_c$ ) con respecto a un valor de referencia que se toma igual a  $100 \text{ kg/cm}^2$ , o sea

$$f = \frac{R_c}{100}$$

La clasificación de las rocas que ha tenido más amplia difusión en la URSS es la clasificación de éstas según su fortaleza del profesor M.M. Protodiakov (ver Tabla 1).

Esta clasificación de las rocas se utiliza ampliamente en la proyección de fortificaciones y en la elección de los métodos de laboreo de excavaciones mineras.

**Resistencia:** Es la capacidad de las rocas de resistir cargas externas. Las principales características de resistencia son las magnitudes de resistencia temporal a la compresión, tracción, al cizallamiento y a la flexión.

Las rocas poseen gran resistencia temporal a la compresión  $R_c$  y muy pequeña a la tracción  $R_t$ , al cizallamiento  $R_{ciz}$  y a la flexión  $R_{flex}$ , es decir,  $R_c > R_{ciz} > R_t$ . Entre las características de resistencias señaladas para las rocas existen las siguientes relaciones que poseen un carácter orientativo.

$$R_c \approx (10 \text{ a } 30) R_t \text{ y } R_{ciz} \approx \sqrt{\frac{R_c \cdot R_t}{3}} \quad (6)$$

**TABLA 1. Clasificación de las rocas según la fortaleza (de M. M. Protodiakonov)**

<i>Categoría</i>	<i>Grado de fortaleza</i>	<i>Tipo de roca</i>	<i>Coefficiente de fortaleza</i>
1	2	3	4
I	Rocas fuertes en grado superlativo	Cuarcitas y basaltos más duros, compactos y viscosos	20
II	Rocas muy fuertes	Rocas graníticas muy duras, pórfidos cuarcíticos, esquistos silíceos, cuarcitas menos duras que las señaladas anteriormente, areniscas y calizas más duras	15
III	Rocas fuertes	Granitos (denso), areniscas y calizas duras, vetas de minerales cuarcíferos, conglomerados duros, minas de hierro muy duras	10
III a	Rocas fuertes	Calizas (duras), granitos no duros, areniscas duras, mármol duro, dolomita	8
IV	Rocas bastante fuertes	Areniscas duras, minerales de hierro	6
IV a	Rocas bastante fuertes	Esquistos arenosos, areniscas esquistosas	5
V	Rocas de fortaleza media	Esquistos arcillosos duros, areniscas y calizas no duras, conglomerados suaves	4

**TABLA 1. (Continuación)**

1	2	3	4
V a	Rocas de fortaleza media	Distintos esquistos, (no duros), marga compacta	3
VI	Rocas algo débiles	Esquistos blandos, calizas muy blandas, tiza, sal, yeso, marga común, areniscas destruidas, cantos rodados cementados en suelos pedrizos	2
VI a	Rocas algo débiles	Suelos de cascajos, esquistos destruidos, arcillas endurecidas.	1,5
VII	Rocas débiles	Arcilla compacta, aluvión duro, hulla blanda, suelo arcilloso	1,0
VII a	Rocas débiles	Arcilla arenosa ligera, grava	0,8
VIII	Rocas terrosas	Tierra vegetal, turba, suelos ligeros, arena seca	0,6
IX	Rocas sueltas	Arena, grava fina, hulla extraída	0,5
X	Rocas movedizas	Terrenos movedizos, suelos cenagosos, maderas podridas y otros suelos diluidos	0,3

**Estabilidad:** Se entiende por estabilidad un estado tal de una superficie denudada, en el que no ocurren derrumbes ni desplazamientos inadmisibles de las rocas durante todo el período que se necesita.

La estabilidad de las rocas está determinada por su resistencia, plasticidad, escurrimiento elástico, y también por las particularidades mecánico-estructurales del macizo.

Existen tres formas fundamentales de pérdida de estabilidad de las rocas y de las excavaciones no fortificadas: formación de desprendimientos, destrucción *in situ* y desplazamiento desmesurado de las rocas.

Según su estabilidad las rocas se dividen en: estables, de estabilidad media e inestables.

Las rocas estables ( $f > 6$ ) no son propensas al derrumbe y a la extrusión hacia la excavación.

Las rocas medianamente estables ( $f = 3$  a  $6$ ) no son propensas a un derrumbe considerable ni a un desplazamiento o extrusión (de las paredes y el piso) hacia la excavación.

Las rocas inestables ( $f < 3$ ) son propensas a un derrumbe considerable y al flujo (de los hastiales y el piso) hacia la excavación.

*Desarrollo de ejemplos:*

**Ejemplo 1.** Determinar la masa específica, la masa volumétrica, la densidad y la porosidad de una caliza, si la masa de la muestra  $G = 80 \text{ g}$ , el volumen total  $V = 34,6 \text{ cm}^3$ , el volumen en estado denso  $V_s = 32 \text{ cm}^3$ .

**Resolución:** El volumen de los poros y oquedades es igual a:

$$V_p = V - V_s = 34,6 - 32 = 2,6 \text{ cm}^3$$

La masa específica de la caliza

$$\gamma_e = \frac{G}{V_s} = \frac{80}{32} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

La masa volumétrica

$$\gamma_v = \frac{G}{V} = \frac{80}{34,6} = 2,31 \text{ g/cm}^3$$

La densidad

$$D = \frac{V_s}{V} \cdot 100 = \frac{32}{34,6} \cdot 100 = 92,5 \%$$

La porosidad

$$N = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{32}{34,6} = 0,075$$

expresado en por ciento sería 7,5 %

**Ejemplo 2.** Una excavación minera horizontal con una sección de laboreo  $S_L = 11,6 \text{ m}^2$ , se laborea por areniscas ordinarias. El avance del frente de la excavación por ciclo  $l = 2,0 \text{ m}$ . Para la transportación de la roca se utiliza una vagoneta tipo UVG-3,3. El coeficiente de llenado de las vagonetas es  $K_{ll} = 0,9$ . Determinar la cantidad de vagonetas para la entrega del estéril desde el frente de la excavación en un ciclo.

**Resolución:** Tomamos de la Tabla 2 el valor del coeficiente de esponjamiento de la arenisca ordinaria,  $K_e = 1,8$ .

En la Tabla 3 encontramos la capacidad de la vagoneta UVG-3,3 ( $V_v = 3,3 \text{ m}^3$ ). Determinamos el volumen de la roca en estado mullido, que se suministra desde el frente de la excavación en ciclo.

$$V_n = S_L \cdot l \cdot K_e = 11,6 \cdot 2 \cdot 1,8 = 41,76 \text{ m}^3$$

Determinamos la cantidad de vagonetas necesarias para la entrega del estéril:

$$P_v = \frac{V_n}{K_{ll} \cdot V_v} = \frac{41,76}{0,9 \cdot 3,3} = 14 \text{ vagonetas}$$

**Ejemplo 3.** Un espacio laboreado de dimensiones por el rumbo  $L = 100 \text{ m}$ , y por el buzamiento  $h = 60 \text{ m}$  y una potencia de la capa de  $m = 2,5 \text{ m}$  se debe rellenar con esquistos arenosos obtenidos del recorte. Es necesario determinar el volumen de la roca de relleno en el macizo si el volumen de la fortificación que se deja en el espacio a rellenar es de  $V_f = 600 \text{ m}^3$ .

**TABLA 2. Características de las rocas**

<i>Categoría</i>	<i>Grado de fortaleza de la roca</i>	<i>Tipos de rocas</i>	<i>Coefficiente de fortaleza</i>	<i>Masa volumétrica de la roca kglm<sup>3</sup></i>	<i>Coefficiente de esponjamiento</i>	<i>Angulo de fricción interna, grados</i>
1	2	3	4	5	6	7
I	Las más fuertes	Las cuarcitas y basaltos más densos y fuertes. Otras rocas que se pueden incluir por su fortaleza	20	de 2,8 a 3,0	2,2	87°
II	Muy fuertes	Las rocas graníticas muy fuertes, granito muy fuerte, porfirita, cuarcita. Las calizas más fuertes	15	de 2,6 a 2,7	2,2	86°
III	Fuertes	Granito, rocas graníticas, caliza muy fuerte, conglomerados fuertes, mineral de hierro fuerte, mármol fuerte, dolomita	de 8 a 10	de 2,5 a 2,6	de 2,0 a 2,1	de 82° a 84°
IV	Suficientemente fuertes	Mineral de hierro, esquistos arenosos, areniscas	de 5 a 6	de 2,4 a 2,5	2,0	de 78° a 80°
V	De mediana fortaleza	Esquistos arcillosos fuertes, calizas y areniscas no fuertes, conglomerados débiles, distintos esquistos no fuertes, margas	de 3 a 4	de 2,5 a 2,8	de 1,8 a 2,0	de 71° a 75°

**TABLA 2. (Continuación)**

1	2	3	4	5	6	7
VI	Suficientemente débiles	Esquistos débiles, calizas muy débiles, tiza, sal de piedra, yeso, terrenos congelados, antracita, margas, cantos rodados, grava cementada, carbón de piedra, pizarras	de 1,5 a 2,0	de 1,8 a 2,4	de 1,4 a 1,7	de 59° a 63°
VII	Débiles	Arcilla, carbón de piedra débil, terreno arcilloso, grava, loes	de 0,8 a 1,0	de 1,6 a 1,8	de 1,25 a 1,4	de 38° a 45°
VIII	Terrosos	Tierra vegetal, turba tierra arcillosa, arena húmeda	0,6	de 1,5 a 1,7	de 1,2 a 1,3	30°
IX	Movedizas	Arenas, gravas débiles, tierra amontonada, carbón extraído	0,5	1,7	de 1,1 a 1,2	26°
X	Fluidas	Terreno pantanoso y otros terrenos diluidos	0,3	de 1,5 a 1,8	1,05	16°

**TABLA 3. Características técnicas de las vagonetas de minas**

Tipo de vagonetas	Capacidad de carga, m <sup>3</sup>	Dimensiones, mm			Ancho de la vía mm
		Longitud	Ancho	Altura	
<i>Vagonetas con la caja cerrada no volteable</i>					
Uvg-0,7	0,7	1 300	800	1 200	600
Uvg-0,8	0,8	1 400	800	1 300	600, 575, 500
Uvg-1,0	1,0	1 500	850	1 300	600, 575, 500
Uvg-1,2	1,2	1 800	850	1 300	600, 575, 500
Uvg-1,3	1,3	2 000	880	1 300	600
Uvg-1,4	1,4	2 400	850	1 300	600, 575, 500
Uvg-1,6	1,6	2 700	850	1 200	600, 575, 500
Uvg-2,2	2,2	2 775	1 200	1 300	600 y 575
Uvg-2,2	2,5	2 800	1 240	1 300	900
Uvg-3,3	3,3	3 450	1 320	1 300	900
Uvg-4,0	4,0	3 850	1 320	1 550	900 y 750
<i>Vagonetas de auto descarga con lados plegables</i>					
UVB-1,6	1,6	2 550	1 300	1 300	750
UVB-2,5	2,5	3 150	1 340	1 400	750
UVB-4,0	4,0	4 520	1 330	1 560	750
<i>Vagonetas de auto descarga con fondo plegable</i>					
UVD-2,5	2,5	2 880	1 240	1 150	900
UVD-3,3	3,3	3 575	1 350	1 400	900
UVD-4,0	4,0	3 575	1 350	1 550	900
UVD-5,6	5,6	4 900	1 350	1 550	900
UVD-8,0	8,0	6 300	1 500	1 550	900
UVO-0,5	0,4	1 300	870	1 200	600 y 750
UVO-0,8	0,8	1 950	1 000	1 250	
UVO-1,0	1,0	2 200	1 190	1 250	600 y 750

**Resolución:** Según la Tabla 2 encontramos el coeficiente de esponjamiento de los esquistos arenosos,  $K_e = 2,0$

El volumen total del espacio laboreado es:

$$V_t = L \cdot h \cdot m = 100 \cdot 60 \cdot 2,5 = 15\,000 \text{ m}^3$$

Encontramos el volumen del espacio minado, que es necesario rellenar con roca

$$V_r = V_t - V_f = 15\,000 - 600 = 14\,400 \text{ m}^3$$

Determinamos el volumen de roca buscado en el macizo

$$V_B = \frac{V_r}{K_e} = \frac{14\,400}{2} = 7\,200 \text{ m}^3$$

**Problemas a desarrollar:**

**Problema 1**

Determinar la masa específica y la masa volumétrica, la porosidad y la densidad relativa de la roca si la masa de una muestra de ella  $G = 208 \text{ g}$ , el volumen total  $V = 86 \text{ cm}^3$  y el volumen de las partículas sólidas  $V_s = 81 \text{ cm}^3$ . ¿Qué roca puede ser ésta?

**Problema 2**

La masa de una muestra de roca  $G = 70 \text{ g}$ , el coeficiente de porosidad  $N = 0,123$ , la masa específica  $\gamma_e = 2,6 \text{ g/cm}^3$ . Determinar el volumen total de la muestra de roca.

**Problema 3**

Para la entrega de roca desde el frente de un pozo inclinado con un área de la sección transversal de laboreo  $S_L = 11,8 \text{ m}^2$  se necesitaron 22 vagonetas tipo UVG-2,2. Determinar el avance del frente del pozo inclinado en un ciclo, si el coeficiente de llenado de la vagoneta  $K_{ll} = 0,9$ , y el coeficiente de esponjamiento de la roca  $K_e = 1,9$ .

**Problema 4**

Determinar la cantidad de tinas de roca, que es necesario entregar desde el frente de un pozo vertical en un ciclo, si el diámetro de proyecto del pozo  $D_p = 6,1 \text{ m}$ . El avance del frente en un ciclo  $l = 1,8 \text{ m}$ , la capacidad de la tina  $V_T = 1,1 \text{ m}^3$ , las rocas atravesadas son rocas calizas. El coeficiente de llenado de la tina es  $\phi_t = 0,95$ .

**Problema 5**

En el laboreo de una excavación con frente ancho desde el frente de estéril se suministran  $25 \text{ m}^3$  de esquistos areníticos. Determinar, si cabe o no esta roca en la galería de depósito si su longitud es  $8 \text{ m}$ , y la potencia de la capa del componente útil  $m = 1,45 \text{ m}$ .

### Problema 6

Se extrae de un pozo 8 t de masa de serpentina en una tina de volteo automático BPS-3,0 con una capacidad de  $V_t = 3,0 m^3$ . El coeficiente de llenado de la tina  $\varphi_t = 0,95$ . Determinar el volumen, que ocupa la roca en la tina y la densidad mullida  $-D_m-$  de la serpentina en la tina.

### PRESION MINERA

Las rocas en un macizo virgen se encuentran en un estado tensional de equilibrio, que está condicionado por la presión de las rocas suprayacentes. Durante el laboreo de las excavaciones en las rocas circundantes se produce la destrucción de este equilibrio y como resultado de esto alrededor de la excavación las tensiones se redistribuyen, y surgen las fuerzas que en geomecánica se denomina presión minera. Por presión minera se entiende el conjunto de campos de fuerzas tensionales que surgen en el macizo de rocas a consecuencia de la gravitación, los posibles procesos geotectónicos y la actividad productiva del hombre (construcción de las obras subterráneas y superficiales, extracción del mineral).

La magnitud de la presión minera depende de muchos factores, los principales son:

- Las propiedades físico-mecánicas de las rocas
- La forma y las dimensiones de la sección transversal de la excavación
- La profundidad de ubicación de la excavación
- La existencia de otras excavaciones, situadas cerca de la excavación analizada, incluyendo también las labores de arranque
- El tipo y la construcción de la fortificación empleada
- El plazo de servicio de la excavación
- Los posibles procesos geotectónicos
- La existencia de construcciones y edificaciones superficiales.

### PRESION EN LAS EXCAVACIONES HORIZONTALES

La cuestión de la determinación de la presión de las rocas sobre la fortificación de las excavaciones es uno de los problemas más complejos de la minería y aún en la actualidad no ha sido definitivamente resuelto.

Se van a analizar diferentes vías e hipótesis de cálculo de la presión las que según las condiciones del macizo rocoso se dividen en tres grupos:

– Presión en excavaciones laboreadas en rocas monolíticas

– Presión en excavaciones laboreadas en condiciones minero-geológicas diferentes

– Presión en excavaciones laboreadas en la zona de influencia de excavaciones aledañas o de los frentes ya explotados.

### Presión de las rocas sobre la fortificación en excavaciones laboreadas en rocas monolíticas

En este caso se va a analizar en forma independiente la presión por el techo, los lados y por el piso de la excavación.

### Presión por el techo

Según la hipótesis del profesor M.M. Protodiakonov, la presión de las rocas sobre la fortificación por el techo se explica por la formación sobre la excavación de la bóveda de equilibrio natural (bóveda de derrumbe) que va a tener aproximadamente una forma parabólica.

Protodiakonov propuso calcular la magnitud de la presión minera partiendo del hecho de que el macizo de roca no es continuo, ni elástico y está compuesto de bloques y pedazos sueltos. Esta suposición permite utilizar en los cálculos, las leyes de los medios dispersos considerando las fuerzas de cohesión que existen entre las rocas.

La magnitud de la presión minera se considera igual al peso de la roca que va a estar dentro de la bóveda de derrumbe, para el caso considerado se supone que la carga actúa uniforme y simétricamente dándose para el cálculo de la presión por el techo las siguientes expresiones:

$$P = \frac{4}{3} \frac{a^2}{f} \gamma_v ; \text{kgf/m} \quad (7)$$

y

$$P = \frac{8}{3} \frac{a^2}{f} \gamma_v ; \text{kgf/m} \quad (8)$$

donde:

- semiancho de la excavación
- fortaleza de la roca
- masa volumétrica de la roca,  $kg/m^3$

La presión actuante sobre un cuadro de fortificación será:

$$P = \frac{4}{3} \frac{a^2}{f} \gamma_v \cdot L \text{ kgf} \quad (9)$$

$$P = \frac{8}{3} \frac{a^2}{f} \gamma_v \cdot L \text{ kgf} \quad (10)$$

donde:

L- es la distancia entre los cuadros de fortificación, *m*

Según la hipótesis del profesor P.M. Tsimbarievich durante el laboreo de una excavación minera por rocas inestables ( $f < 4$ ), sobre la excavación se forma la bóveda de equilibrio natural, cuya altura y ancho es mayor que en las rocas fuertes. Esto se aplica por el hecho de que las rocas laterales también se deforman en toda la altura de la excavación, a consecuencia de lo cual se forma un prisma de altura *h*, que se desliza bajo un ángulo ( $\theta$ ).

El valor de  $\theta$  con respecto al plano horizontal será:

$$\theta = \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

El semiancho de la bóveda de equilibrio natural para una sección rectangular de la excavación (Figura 1) será:

$$a_1 = a + h \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}, \text{ m} \quad (11)$$

donde:

$\varphi$ - ángulo de fricción natural de las rocas (vea la Tabla 1), grados

La presión de las rocas por el techo correspondiente a 1 *m* de excavación, es igual al peso de la roca contenida en la zona deformada (ver Figura 1) y se determina aproximadamente por la fórmula:

$$P = 2a \cdot b \cdot \gamma_v, \text{ kgf/m} \quad (12)$$

y sobre un cuadro de fortificación

$$P = 2a \cdot b \cdot \gamma_v \cdot L, \text{ kgf} \quad (13)$$

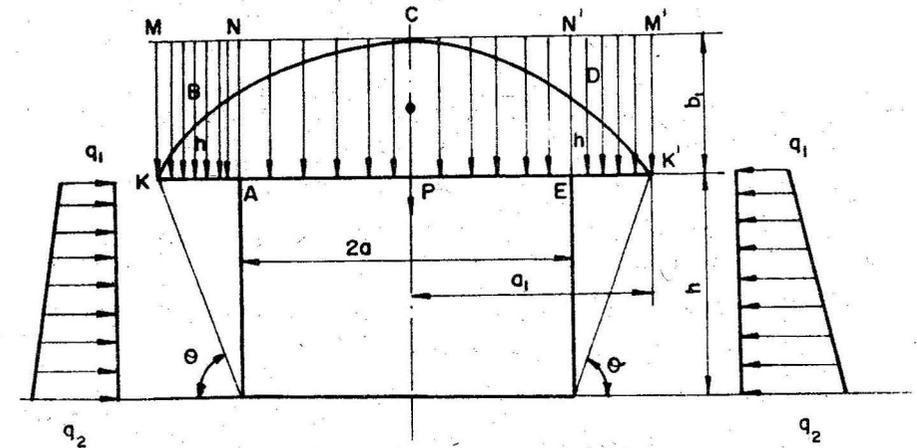


FIGURA 1. Esquema de cálculo de la presión minera según Tsimbarievich.

Desarrollo de ejemplos:

**Ejemplo 4.** Una galería longitudinal de acarreo (transporte) se laborea por porfiritas y está fortificada con fortificación metálica arqueada. El ancho de laboreo de la excavación será  $2a = 3,56 \text{ m}$ . La distancia entre cuadros (paso de la fortificación)  $L = 1,0 \text{ m}$ . Determinar la magnitud de la presión minera para 1 *m* de galería longitudinal y para un cuadro de fortificación.

**Resolución:** Según la Tabla 2 encontramos para la porfirita  $f = 12$ ;  $\gamma_v = 2700 \text{ kg/m}^3$ . Debido a que el coeficiente de fortaleza de las rocas es mayor que 5, el cálculo de la presión lo vamos a realizar según la hipótesis del profesor M. M. Protodiakonov. En este caso vamos a tener en cuenta que el plazo de servicio de la excavación de transporte sobrepasa un año. Considerando la presión de las rocas señaladas por el techo para 1 *m* de la excavación, tenemos:

$$P = \frac{8}{3} \cdot \frac{a^2}{f} \cdot \gamma_v = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1,78)^2}{12} \cdot 2700$$

$$P = 1900 \text{ kgf/m}$$

y para un cuadro

$$P = \frac{8}{3} - \frac{a^2}{f} \cdot \gamma_v \cdot L = \frac{8}{3} \cdot \frac{(1,78)^2}{12} \cdot 2\,700 \cdot 1$$

$$P = 1\,900 \text{ kgf}$$

*Ejemplo 5.* Determinar la magnitud de la presión minera que actúa por el techo de una excavación a partir de las condiciones siguientes:

- La fortificación es de cuadro de sección trapezoidal
- Se laboreó a través de rocas con fortaleza  $f = 4$  y masa volumétrica  $\gamma_v = 2\,400 \text{ kg/m}^3$
- El ancho de la excavación por el techo es de  $2,8 \text{ m}$  y su altura de  $2,6 \text{ m}$
- La distancia entre cuadros es de  $0,6 \text{ m}$
- La excavación va a tener una larga vida de servicio.

*Resolución:* Se recomienda por numerosos autores que en los casos de excavaciones con una vida de servicio prolongada la altura de la bóveda de destrucción se halle por la siguiente expresión:

$$b = \frac{2a}{f}$$

por lo que:

$$b = \frac{2,8}{4} = 0,7 \text{ m}$$

Una vez conocido el valor de la altura de la bóveda de destrucción podemos pasar a calcular la presión minera por la conocida expresión:

$$P = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b \cdot \gamma_v \cdot L$$

$$P = \frac{4}{3} \cdot 1,4 \cdot 0,70 \cdot 2\,400 \cdot 0,6$$

$$P = 1\,880 \text{ kgf}$$

*Ejemplo 6.* Un socavón que está destinado a la exploración de un yacimiento de minerales cromíticos, se laborea por rocas de fortaleza ( $f = 3$ ) y  $\gamma_v = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ . La forma de la sección transversal del socavón es trapezoidal, su ancho de laboreo por el techo  $2a = 2,42 \text{ m}$ , la altura es de  $2,6 \text{ m}$ . El socavón está entibado con fortificación de madera, el paso de la fortificación  $L = 0,5 \text{ m}$ . Determinar la altura de la bóveda de equilibrio natural y la presión por el techo sobre un cuadro de fortificación.

*Resolución:* Para la determinación de la magnitud de la presión minera por el techo se utiliza la hipótesis de P. M. Tsimbarievich ( $f < 4$ ).

El semiancho (o semiluz) de la bóveda de equilibrio natural para una forma trapezoidal de la sección se determina por la fórmula:

$$a_1 = a + h \left( \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg } \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right)$$

$$a_1 = 1,21 + 2,6 \left( \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg } \frac{90^\circ + 71^\circ}{2} \right)$$

$$a_1 = 2,09 \text{ m}$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural se determina por la fórmula:

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{2,09}{3}$$

$$b_1 = 0,7 \text{ m}$$

La presión de las rocas por el techo sobre un cuadro de fortificación se determina por la fórmula (13)

$$P = 2a \cdot b \cdot \gamma_v \cdot L = 2,42 \cdot 0,7 \cdot 1\,800 \cdot 0,5 = 1\,520 \text{ kgf}$$

*Ejemplo 7.* Una excavación minera horizontal se laborea por esquistos arcillosos débiles ( $f = 1,5$ ;  $\gamma_v = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 56^\circ 19'$ ). La forma de la sección transversal de la excavación es rectangular.

El ancho de laboreo de la excavación  $2a = 3,2 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,46 \text{ m}$ . La excavación está fortificada con cuadros de madera. Determinar la distancia entre cuadros, si la presión sobre un cuadro de fortificación por el techo  $P = 5\,000 \text{ kgf}$ .

*Resolución:* Para resolver este problema se utiliza la hipótesis del profesor P. M. Tsimbarievich (porque  $f < 4$ ).

La altura de la bóveda de equilibrio natural se determina por la fórmula:

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{a + h \cdot \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}{f}$$

$$b_1 = \frac{1,6 + 2,46 \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + 56^\circ 19'}{2}}{1,5} = 1,56 \text{ m}$$

La distancia entre los cuadros de la fortificación se determina según la fórmula:

$$P = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v \cdot L, \text{ kgf}$$

por lo que:

$$L = \frac{P}{2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v} = \frac{3\,500}{3,2 \cdot 1,56 \cdot 2\,000} = 0,5 \text{ m}$$

*Problemas a resolver:*

#### Problema 7

Para la apertura del componente útil se laborea un socavón horizontal por rocas de fortaleza  $f = 6$  y  $\gamma_v = 2,8 \text{ kg/m}^3$  de forma trapezoidal. El ancho de laboreo del socavón por el techo  $2a = 2,82 \text{ m}$ . En calidad de fortificación permanente se toma una fortificación de cuadro metálica de un perfil doble T. Determinar el paso de la fortificación, si la presión por el techo sobre un cuadro de fortificación  $P = 1\,240 \text{ kgf}$ .

#### Problema 8

Una galería transversal maestra corta las rocas señaladas en la Tabla 4. La forma de la sección transversal de la galería longitudinal es abovedada (de

tres centros) con paredes verticales. Las dimensiones de laboreo de la excavación son: ancho por el techo  $2a = 3,46 \text{ m}$ , altura  $h = 2,88 \text{ m}$ . Construir el diagrama de distribución de la presión minera por el techo a lo largo de la excavación a escala.

**TABLA 4**

Rocas atravesadas	Potencia de la capa, m	Coefficiente de fortaleza de las rocas	Masa volumétrica $\text{kg/m}^3$
Areniscas	8,0	6	2 600
Esquistos arenísticos	12,0	5	2 500
Esquistos arcillosos	20,0	3	2 500
Caliza	4,0	8	2 800
Carbón	2,0	2	1 300
Areniscas arcillosas	15,0	3	2 200

#### Problema 9

Una excavación horizontal se laborea por rocas de fortaleza  $f = 7$  y  $\gamma_v = 2\,800 \text{ kg/m}^3$ . La forma de la sección transversal es circular. La excavación está fortificada con una fortificación anular metálica de perfil SVP-17 con un paso de fortificación  $L = 0,75 \text{ m}$ . Determinar el radio de la excavación si la presión sobre un anillo por el techo  $P = 1\,800 \text{ kgf}$ .

#### Problema 10

Determinar, si está colocado bien o no un cuadro de fortificación en una excavación horizontal de forma rectangular, si el ancho de laboreo de la excavación  $2a = 3,04 \text{ m}$ ; la arenisca fragmentada ( $\gamma_v = 1\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $f = 2$ ). La distancia entre los cuadros de fortificación  $L = 1,0 \text{ m}$ . La presión por el lado del techo sobre un cuadro  $P = 9\,500 \text{ kgf}$ .

#### Problema 11

Una galería longitudinal maestra se laborea por rocas fuertes ( $f = 8$ ;  $\gamma_v = 2\,800 \text{ kg/m}^3$ ). En calidad de fortificación permanente se toman peones ahuecados de hormigón armado y sombreros metálicos de perfiles doble T, el paso de la fortificación  $L = 0,7 \text{ m}$ . Determinar la altura de la bóveda de

equilibrio natural y la presión por el lado del techo sobre un cuadro de fortificación, si el ancho de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 3,1 \text{ m}$ , al igual que por el piso.

### Problema 12

Una excavación minera horizontal se laboreo por rocas homogéneas blandas ( $f = 3$ ;  $\gamma_v = 2500 \text{ kg/m}^3$ ). En calidad de fortificación permanente se prevé en el proyecto una fortificación metálica arqueada de un perfil doble T con un paso de fortificación  $L = 0,5 \text{ m}$ . Determinar la altura de la bóveda de equilibrio natural y la presión de las rocas por la parte del techo sobre un arco, si el ancho de laboreo de la excavación por el piso  $2a = 3,76 \text{ m}$  y  $h = 2,5 \text{ m}$ .

### Presión lateral

Cuando se laboreo excavaciones en rocas inestables surge la presión sobre la fortificación por los lados (o hastiales) de la excavación. Según la proposición de P. M. Tsimbarievich la magnitud de la presión lateral se determina como la presión activa de los prismas triangulares de altura  $h$  que se deslizan bajo un ángulo  $\theta$  (Figura 1) y están cargados con el peso de la roca contenida en el volumen de los elementos  $n$ . Para los cálculos, la carga sobre los prismas de deslizamiento se toma uniformemente distribuida e igual al peso de la roca.

El diagrama de presión lateral de las rocas sobre la fortificación por toda la altura de la excavación representa un trapecio, cuya base, en el caso de rocas homogéneas en el techo y en los lados de la excavación, se determina por las fórmulas: base superior del trapecio

$$q_1 = \gamma_v \cdot b_1 \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (14)$$

la base inferior del trapecio

$$q_2 = \gamma_v (b_1 + h) \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} = q_1 + \gamma_v h \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (15)$$

Si en los lados (hastiales) y en el techo de la excavación yacen rocas heterogéneas, entonces en las fórmulas (14 y 15) en lugar de  $b_1$  es necesario colocar la altura de la bóveda de equilibrio natural referida a la masa volumétrica de las rocas laterales ( $b_0$ )

siendo:

$$b_0 = b_1 \frac{\gamma_v^t}{\gamma_v}, \text{ m} \quad (16)$$

donde:

$\gamma_v^t$  - masa volumétrica de las rocas, que yacen en el techo de la excavación,  $\text{kg/m}^3$

$\gamma_v^l$  - masa volumétrica de las rocas que yacen en los lados de la excavación,  $\text{kg/m}^3$

Introduciendo el valor de  $b_0$  en las fórmulas (14 y 15) se obtienen las expresiones:

$$q_1 = \gamma_v \cdot b_0 \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (17)$$

$$q_2 = \gamma_v (b_0 + h) \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (18)$$

La magnitud de la presión lateral numéricamente es igual al área del diagrama (trapecio).

Para el laboreo de una excavación por rocas homogéneas

$$R_L = \frac{q_1 + q_2}{2} h = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2b_1 + h) \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (19)$$

y para el laboreo de una excavación en rocas heterogéneas

$$R_L = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2b_0 + h) \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (20)$$

El punto de aplicación de la fuerza resultante de la presión minera se encontrará en el centro de gravedad del diagrama, a una distancia  $Y$  del piso de la excavación, en el caso de rocas homogéneas:

$$Y = \frac{h}{3} \frac{3b_1 + h}{2b_1 + h}, \text{ m} \quad (21)$$

y para rocas heterogéneas:

$$Y = \frac{h}{3} \cdot \frac{3b_0 + h}{2b_0 + h}, m \quad (22)$$

*Desarrollo de ejemplos:*

**Ejemplo 8.** Una excavación minera horizontal se laborea por esquistos arcillosos ( $f = 3$ ;  $\gamma_v = 2\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 71^\circ 34'$ ) y está fortificada con cuadros de madera trapezoidales, con una distancia entre ellos  $L = 0,8 \text{ m}$ . Determinar la magnitud de la presión minera que actúa sobre el sombrero y los peones de la fortificación, si el ancho de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 2,82 \text{ m}$  y la altura  $h = 2,56 \text{ m}$ .

*Resolución:* La excavación se laborea por rocas homogéneas blandas con una fortaleza ( $f < 4$ ). Para determinar la magnitud de la presión minera sobre la fortificación se aplica la hipótesis de P. M. Tsimbarievich.

La altura de la bóveda de equilibrio natural

$$b_1 = \frac{a + h \left( \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg } \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right)}{f}$$

$$b_1 = 1,41 + 2,56 \left( \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg } \frac{90^\circ + 71^\circ 34'}{2} \right) = 0,75 \text{ m}$$

La presión de las rocas sobre el sombrero del cuadro de fortificación

$$P = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v \cdot L = 2,82 \cdot 0,75 \cdot 2\,500 \cdot 0,8 = 4\,250 \text{ kgf}$$

La presión lateral al nivel del techo de la excavación

$$q_1 = \gamma_v \cdot b_1 \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} = 2\,500 \cdot 0,75 \cdot 0,0262$$

$$q_1 = 49 \text{ kgf/m}^2$$

La presión lateral al nivel del piso de la excavación

$$q_2 = \gamma_v \cdot (b_1 + h) \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

$$q_2 = 2\,500 \cdot (0,75 + 2,56) \cdot 0,0262 = 215 \text{ kgf/m}^2$$

La fuerza resultante de presión lateral sobre un peón:

$$R_L = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot h \cdot L = \frac{49 + 215}{2} \cdot 2,56 \cdot 0,8$$

$$R_L = 270 \text{ kgf}$$

El punto de aplicación  $-Y-$  de la resultante desde el piso de la excavación

$$Y = \frac{h}{3} \cdot \frac{3b_1 + h}{2b_1 + h} = \frac{2,56}{3} \cdot \frac{3 \cdot 0,75 + 2,56}{2 \cdot 0,75 + 2,56} = 1,0 \text{ m}$$

**Ejemplo 9.** Determinar la altura de la bóveda de equilibrio, y la magnitud de la presión minera que actúa sobre una excavación que tiene una vida de servicio de 5 años.

Esta excavación es laboreada por una roca que tiene una fortaleza  $f = 3$ , una masa volumétrica de  $2\,000 \text{ kg/m}^3$  y un ángulo de fricción interna de  $71^\circ 34'$ .

La excavación tiene una sección transversal trapezoidal con un ancho por el techo de  $2,85 \text{ m}$  y una altura de  $2,56 \text{ m}$  siendo la distancia entre los cuadros de  $0,6 \text{ m}$ .

*Resolución:* Basado en la experiencia de la práctica planteamos que en rocas con fortaleza inferior a 4 es necesario tener en cuenta la formación en los lados de la excavación de los prismas de deslizamiento.

Por tal causa la altura  $b_1$  de la bóveda de equilibrio la calculamos en este caso por la expresión:

$$b_1 = \frac{a_1}{f}$$

siendo

$a_1$  - semiancho de la bóveda de destrucción,  $m$

$$a_1 = a + h \operatorname{ctg} 80^\circ + \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

$$a_1 = \frac{2,85}{2} + 2,56 (0,176 + 0,162)$$

$$a_1 = 1,42 + 2,56 (0,338)$$

$$a_1 = 2,29 \text{ m}$$

$$b_1 = \frac{2,29}{3} = 0,763 \text{ m}$$

La presión por el techo ( $P_t$ ) será:

$$P_t = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v \cdot L = 2,85 \cdot 0,763 \cdot 2\,000 \cdot 0,6$$

$$P_t = 2\,590 \text{ kgf}$$

La presión lateral ( $P_l$ ) por metro de fortificación será:

En la parte superior de la excavación

$$q_1 = b_1 \cdot \gamma_v \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

$$q_1 = 0,763 \cdot 2\,000 \cdot 0,6 \cdot 0,026 = 23,8 \text{ kgf/m}$$

En la parte inferior de la excavación

$$q_2 = (b_1 + h) \cdot \gamma_v \cdot L \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

$$q_2 = (0,763 + 2,56) \cdot 2\,000 \cdot 0,6 \cdot 0,0262$$

$$q_2 = 104 \text{ kgf/m}$$

El valor resultante de la presión lateral ( $R_L$ ) uniformemente distribuida será:

$$R_L = \frac{23,8 + 104}{2} \cdot 2,56$$

$$R_L = 161 \text{ kgf}$$

El punto de aplicación de esta fuerza lateral se encuentra en el centro de gravedad del trapecio de fuerzas a una distancia del piso de la excavación dada por la expresión:

$$Y = \frac{h}{3} \frac{3b_1 + h}{2b_1 + h}$$

por lo que sustituyendo obtenemos:

$$Y = \frac{2,56}{3} \frac{3 \cdot 0,763 + 2,56}{2 \cdot 0,763 + 2,56}$$

$$Y = 1,02 \text{ m}$$

**Ejemplo 10.** Determinar la magnitud de la presión minera que actúa por el techo y los lados de una excavación que va a tener una vida de servicio de 10 años.

La excavación es de sección trapezoidal y tiene un ancho por el techo de 2,2 m; una altura de 2,4 m, sus peones se colocan formando un ángulo de 10° con la vertical y la distancia entre cuadros es de 0,5 m.

Las características de las rocas por las que se laborea esta excavación son: fortaleza 4, masa volumétrica 2 300 kg/m<sup>3</sup> y ángulo de fricción interna 62°20'.

**Resolución:** Lo primero que hacemos como en el caso anterior es hallar la altura de la zona de derrumbe  $b_1$

$$b_1 = \frac{a_1}{f}$$

$$a_1 = a + h \left[ \operatorname{ctg} 80^\circ + \operatorname{ctg} \frac{(90^\circ + \varphi)}{2} \right]$$

$$a_1 = 1,1 + 1,2 \left[ 0,176 + \operatorname{ctg} 76^\circ 10' \right]$$

$$a_1 = 1,61 \text{ m}$$

por lo que

$$b_1 = \frac{1,61}{4} = 0,4 \text{ m}$$

Una vez conocido  $b_1$  podemos pasar a calcular la magnitud de la presión.

La presión por el techo  $P_T$  será:

$$P_T = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v \cdot L$$

$$P_T = 2,2 \cdot 0,4 \cdot 2\,300 \cdot 0,5$$

$$P_T = 1\,010 \text{ kgf}$$

En tanto la presión lateral ( $P_L$ ) por metro de fortificación será:

En la parte superior

$$q_1 = b_1 \cdot \gamma_v \cdot L \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

$$q_1 = 0,4 \cdot 2\,300 \cdot 0,5 \cdot 0,6$$

$$q_1 = 28 \text{ kgf/m}$$

En la parte inferior

$$q_2 = (b_1 + h) \cdot \gamma_v \cdot L \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$$

$$q_2 = (0,4 + 2,4) \cdot 2\,300 \cdot 0,5 \cdot 0,6$$

$$q_2 = 193 \text{ kgf/m}$$

El valor resultante ( $R_L$ ) de la presión lateral uniformemente distribuida será:

$$R_L = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot h$$

$$R_L = \frac{28 + 193}{2} \cdot 2,4$$

$$R_L = 265 \text{ kgf}$$

**Ejemplo 11.** Determinar la presión de las rocas sobre una fortificación metálica arqueada de una excavación horizontal que se laborea por calizas débiles ( $\gamma_v = 2\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_1 = 3$ ;  $\varphi = 71^\circ 34'$ ), en el techo yacen esquistos arcillosos ( $f_2 = 1,5$ ;  $\gamma_v = 1\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 56^\circ 19'$ ), si el ancho de laboreo de la excavación por el techo es de  $4,1 \text{ m}$  ( $2a = 4,1 \text{ m}$ ); la altura de laboreo de la excavación es de  $3,56 \text{ m}$  ( $h = 3,56 \text{ m}$ ) y el paso de la fortificación —L— igual a  $0,7 \text{ m}$ .

**Resolución:** La excavación se laborea por rocas que no son fuertes ( $f < 4$ ), por tal razón el cálculo de la magnitud de la presión minera por la parte del techo y de los lados de la excavación lo vamos a realizar según la hipótesis de Tsimbarievich.

La altura de la bóveda de equilibrio — $b_1$ — será:

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{a + h \left[ \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg} \left( \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right) \right]}{f}$$

$$b_1 = \frac{2,05 + 3,56 \left[ \text{ctg } 80^\circ + \text{ctg} \left( \frac{90^\circ + 56^\circ 19'}{2} \right) \right]}{1,5}$$

$$b_1 = 3,75 \text{ m}$$

La presión de la roca por el techo sobre un arco de fortificación será:

$$P = 2a \cdot b \cdot \gamma_v \cdot L$$

$$P = 4,1 \cdot 3,75 \cdot 1\,500 \cdot 0,7 = 16\,410 \text{ kgf}$$

La presión lateral es menester calcularla considerando la heterogeneidad de las rocas del techo y de los lados; para ello se emplea la altura referida de la bóveda de equilibrio natural — $b_0$ — la cual determinamos por la expresión:

$$b_0 = b_1 \frac{\gamma_v^T}{\gamma_v^L}$$

$$b_0 = 3,75 \frac{1\,500}{2\,500} = 2,25 \text{ m}$$

La presión lateral al nivel del techo de la excavación  $-q_1-$  se halla por la fórmula:

$$q_1 = \gamma_v \cdot bo + \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right)$$

$$q_1 = 1\,500 \cdot 2,25 \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - 56^\circ 19'}{2} \right) = 90 \text{ kgf/m}^2$$

La presión lateral al nivel del piso de la excavación:

$$q_2 = \gamma_v^L \cdot (bo + h) \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right) = 2\,500 (2,25 + 3,56) \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - 71^\circ 34'}{2} \right)$$

$$q_2 = 380 \text{ kgf/m}^2$$

La resultante de la presión lateral para 1 arco

$$R_L = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot h \cdot L = \frac{90 + 380}{2} \cdot 3,56 \cdot 0,7 = 590 \text{ kgf}$$

El punto de aplicación de la resultante partiendo desde el piso de la excavación

$$Y = \frac{h}{3} \cdot \frac{3bo + h}{2bo + h} = \frac{3,56}{3} \cdot \frac{3 \cdot 2,25 + 3,56}{2 \cdot 2,25 + 3,56} = 1,52 \text{ m}$$

*Problemas a resolver:*

#### Problema 13

Para la apertura del componente útil se laborea una galería maestra por esquistos blandos ( $f = 2$ ;  $\gamma_v = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 60^\circ 26'$ ) y está entibada con una fortificación metálica de cuadro trapezoidal. Las dimensiones de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 3,7 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,88 \text{ m}$ . Determinar la altura de la bóveda de equilibrio natural y la presión de las rocas sobre  $1 \text{ m}$  de excavación por la parte del techo y de los lados. Encontrar la altura de la recta de aplicación de la resultante de la presión lateral desde el piso de la excavación.

#### Problema 14

Un crucero se laborea por mineral cuya fortaleza es  $f = 4$ ;  $\gamma_v = 2\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 75^\circ 58'$ . La forma de la sección transversal del crucero es trapezoidal, las dimensiones de laboreo: el ancho por el techo  $2a = 2,44 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,88 \text{ m}$ . Determinar la altura de la bóveda de equilibrio natural y la presión de las rocas por la parte del techo y los lados en  $1 \text{ m}$  de excavación. Hallar la altura de la aplicación de la resultante de la presión lateral desde el piso de la excavación.

#### Problema 15

Una excavación de transporte se laborea por rocas, que tienen la siguiente característica:  $f_L = 3$ ;  $\gamma_v^L = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi_L = 71^\circ 34'$ . En el techo yacen rocas con fortaleza  $f_t = 2$ ;  $\gamma_v^T = 1\,500 \text{ kg/m}^3$  y  $\varphi_T = 63^\circ 26'$ . La excavación está fortificada por cuadros metálicos trapezoidales, la distancia entre cuadros  $L = 0,5 \text{ m}$ . El ancho de la excavación (de laboreo) por el techo  $2a = 4,10 \text{ m}$ , la altura de laboreo  $h = 3,56 \text{ m}$ . Determinar la magnitud de la presión minera sobre un cuadro de fortificación por la parte del techo y de los lados de la excavación. Encontrar la altura desde el piso, de la recta de aplicación de la resultante de la presión lateral.

#### Problema 16

Una excavación minera horizontal se laborea por rocas heterogéneas: en el techo yacen rocas con fortaleza  $f_t = 2$ ;  $\gamma_v^T = 1\,400 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi_T = 63^\circ 26'$ , y en los lados  $f_l = 4$ ;  $\gamma_v^L = 2\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi_L = 75^\circ 38'$ . La excavación es de forma rectangular, el ancho de laboreo de la excavación  $2a = 1,98 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,24 \text{ m}$ . La excavación está fortificada con entibación de cuadros de madera, la distancia entre cuadros  $L = 0,33 \text{ m}$ . Determinar la magnitud de la presión minera por la parte del techo y de los lados de la excavación para un cuadro de fortificación.

#### Presión por el piso de la excavación

La presión minera sobre la fortificación de la excavación por el lado del piso surge a consecuencia del hinchamiento de las rocas. Sobre la magnitud del hinchamiento influyen los siguientes factores:

- Propiedades físico-mecánicas de las rocas del piso
- La forma y las dimensiones de la sección transversal de la excavación
- La existencia de otras excavaciones cerca
- La profundidad de ubicación de la excavación desde la superficie de la tierra

e) El método de sostenimiento (conservación) de la excavación y otros.

La principal causa de la hinchazón es el surgimiento de tensiones por el peso de las rocas suprayacentes, que han sobrepasado el límite de resistencia de las rocas del piso de la excavación.

Según la hipótesis de P. M. Tsimbarievich, en la roca del piso se forma bajo la acción del peso de las rocas suprayacentes un prisma de deslizamiento  $n$  (Figura 2), que crea la presión sobre la pared convencional AB y CD. Como resultado de esto en el piso de la excavación se forman prismas de extrusión que crean una resistencia pasiva.

La carga sobre los prismas de deslizamiento  $n$  se determina partiendo de la altura  $H$ ,

$$H = b_1 + h_1, \quad m \quad (23)$$

La profundidad a la cual se extiende el movimiento de las partículas de roca del piso se determina por la fórmula:

$$X_0 = \frac{H \cdot \operatorname{tg}^4 \frac{90^\circ - \varphi_p}{2}}{1 - \operatorname{tg}^4 \frac{90^\circ - \varphi_p}{2}}, \quad m \quad (24)$$

donde:

$\varphi_p$  - ángulo de fricción interna de las rocas del piso, grado

En dependencia de las propiedades físico-mecánicas de las rocas que rodean a la excavación y del ancho de ellas al deslizamiento de partes del terreno se van a oponer fuerzas de diferentes valores.

Se analizan los siguientes casos:

$$I \quad X_0 \cdot \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - \varphi_p}{2} < a \quad (25)$$

donde:

a - semiancho de la excavación,  $m$

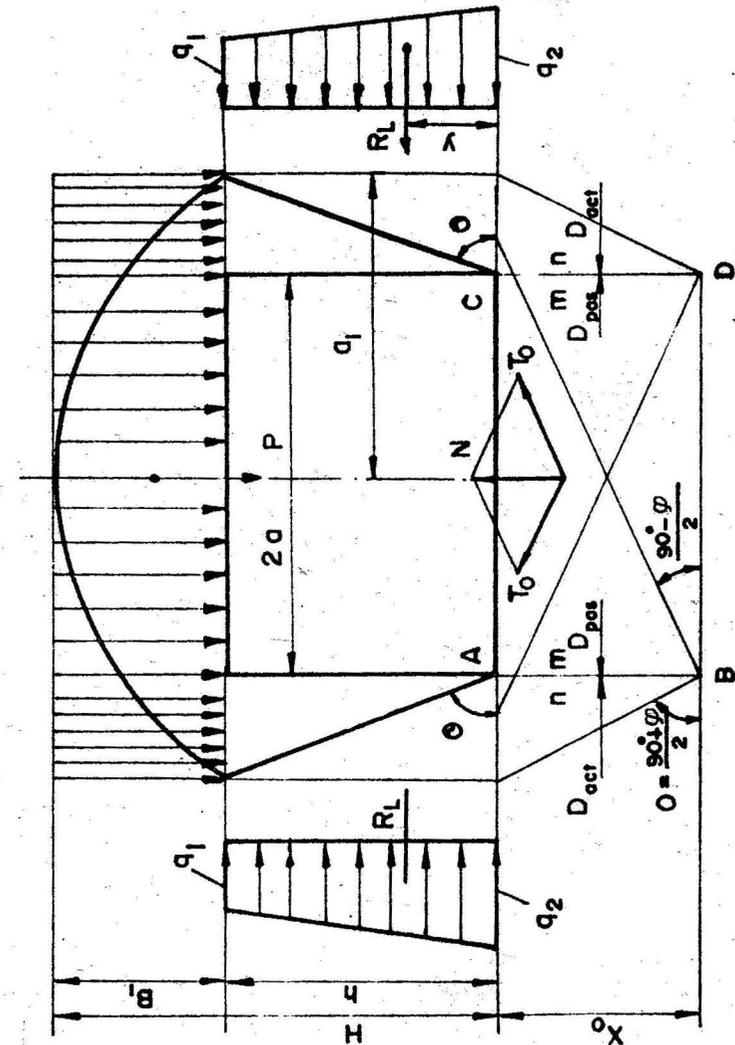


FIGURA 2. Presión por el piso de la excavación.

La magnitud de la presión activa por el piso de la excavación  $D_{act}$  se puede calcular por la expresión:

$$D_{act} = \frac{\gamma_v^p \cdot X_o}{2} (2H + X_o) \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_p}{2} \quad (26)$$

donde:

$\gamma_v^p$ : masa volumétrica de la roca del piso,  $kg/m^3$

A la acción de la presión activa como es conocido se le opone la presión pasiva que ofrecen las rocas del piso de la excavación, ésta se puede determinar por la expresión:

$$D_{pas} = \gamma_v^p \cdot X_o^2 \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ + \varphi_p}{2} \right) \quad (27)$$

la diferencia entre la presión activa y la pasiva se obtiene de la expresión:

$$D_o = D_{act} - D_{pas} \quad (28)$$

En este primer caso la presión aparece fundamentalmente en las esquinas de la excavación.

La magnitud de la presión actuante será:

$$P_a D_o = \frac{\text{sen} \frac{90^\circ - \varphi_p}{2}}{\cos \varphi_p} \quad (29)$$

La fuerza  $P_a$  tiene una dirección según un ángulo  $\frac{90^\circ - \varphi_p}{2}$  con respecto al piso de la excavación

$$\text{II} \quad a < X_o \cdot \text{ctg} \frac{90^\circ - \varphi_p}{2} < 2a \quad (30)$$

En este caso la presión se manifiesta fundamentalmente por la zona central de la excavación.

La magnitud de la presión actuante ( $P_a$ ) en este caso se puede hallar por la expresión:

$$P_a = D_o \cdot \text{tg} \frac{90^\circ - \varphi_p}{2} \quad (31)$$

$$\text{III} \quad X_o \cdot \text{ctg} \frac{90^\circ - \varphi_p}{2} > 2a \quad (32)$$

En este caso la presión se manifiesta por todo el ancho de la excavación y su magnitud se determina a partir de la profundidad a que llega el movimiento de las partículas de rocas del piso  $X_o$ .

En este caso  $X_o - X_o'$

y se calcula por la expresión:

$$X_o' = \frac{2a}{\cot \frac{90^\circ - \varphi_p}{2}} \quad (33)$$

*Desarrollo de ejemplos:*

*Ejemplo 12.* Una excavación horizontal se laboreo por rocas, que tienen la siguiente característica:  $f=0,6$ ;  $\gamma_v = 2000 \text{ kg/m}^3$ ,  $\varphi = 30^\circ 58'$ . La excavación se fortifica con cuadros rectangulares cerrados de madera, la distancia entre los mismos  $L = 0,25 \text{ m}$ . Determinar la presión de las rocas por la parte del piso sobre un cuadro, si el ancho de la excavación (de laboreo)  $2a = 4,04 \text{ m}$ , y la altura  $h = 2,87 \text{ m}$ .

*Resolución:* Encontramos la altura de la bóveda de equilibrio natural según la hipótesis de P. M. Tsimbarievich:

$$b_1 = \frac{a + h \cdot \text{ctg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}{f} = \frac{2,02 + 2,87 \cdot \text{ctg} \frac{90^\circ + 30^\circ 58'}{2}}{0,6}$$

$$b_1 = 6 \text{ m}$$

La altura (H) se calcula:

$$H = b_1 + h = 6 + 2,87 = 8,87 \text{ m}$$

La profundidad a la que se extiende el movimiento de las partículas

$$X_o = \frac{H \cdot \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right)} = \frac{8,87 \cdot \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2} \right)}$$

$$X_o = 0,98 \text{ m}$$

La parte del ancho de la excavación que se opone a la presión activa se calcula por el producto de:

$$X_o \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - \varphi}{2} = 0,98 \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2} = 1,74 \text{ m}$$

es decir:

$$X_o \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - \varphi}{2} < a, \text{ ya que } 1,74 < 2,02$$

Por consiguiente, la presión aparecerá fundamentalmente en las esquinas de la excavación.

La magnitud de la presión activa

$$D_{\text{act}} = \frac{2 \cdot 000 \cdot X_o}{2} \cdot (2H + X_o) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right)$$

$$D_{\text{act}} = 200 \cdot 0,98 \frac{2,87 + 0,98}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2} \right)$$

$$D_{\text{act}} = 10 \cdot 820 \text{ kgf/m}$$

La magnitud de la presión pasiva

$$D_{\text{pas}} = \frac{\gamma_v^p \cdot X_o^2}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right)$$

$$D_{\text{pas}} = \frac{2 \cdot 000 \cdot (0,98)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 (90^\circ + 30^\circ 58')}{2}$$

$$D_{\text{pas}} = 2 \cdot 970 \text{ kgf/m}$$

La diferencia entre las presiones activa y pasiva será:

$$D_o = D_{\text{act}} - D_{\text{pas}} = 10 \cdot 820 - 2 \cdot 970 = 7 \cdot 850 \text{ kgf/m}$$

La magnitud de la presión minera, por la parte del piso, que corresponde a un cuadro se calcula por la expresión:

$$T_o = \frac{D_o \cdot \operatorname{sen} \frac{90^\circ - \varphi}{2}}{\cos \varphi} \cdot L = \frac{7 \cdot 850 \operatorname{sen} \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2}}{\cos 30^\circ 58'} \cdot 0,25$$

$$T_o = 1 \cdot 273 \text{ kgf}$$

La fuerza  $T_o$  estará dirigida con un ángulo  $\beta$  respecto al piso de la excavación, el que se calcula por la fórmula siguiente:

$$\beta = \frac{90^\circ - \varphi}{2} = \frac{90^\circ - 30^\circ 58'}{2} = 29^\circ 31'$$

*Problemas a desarrollar:*

*Problema 17*

Una excavación minera horizontal se laboreo por areniscas débiles. En calidad de fortificación permanente el proyecto prevé una fortificación por cuadros metálicos trapezoidales, el paso de la fortificación  $L = 0,75 \text{ m}$ . Determinar la presión por el techo, lados y piso de la excavación sobre un cuadro de fortificación, si el ancho de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 3,32 \text{ m}$ , por el piso  $B = 3,76 \text{ m}$ , la altura de la excavación es  $h = 2,86 \text{ m}$ .

*Problema 18*

Un socavón de explotación de sección rectangular se laboreo por areniscas quebrantadas ( $f = 2$ ;  $\gamma_v = 2 \cdot 000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 60^\circ 26'$ ). En el techo yacen esquistos arenísticos ( $f_t = 3$ ;  $\gamma_v^t = 2 \cdot 200 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi^t = 71^\circ 34'$ ). Determinar la magnitud de la presión minera por el techo, los lados y el piso, si el ancho del socavón (de laboreo)  $2a = 3,16 \text{ m}$ , y la altura  $h = 2,86 \text{ m}$ .

### Presión de las rocas sobre la fortificación en excavaciones labreadas en condiciones minero-geológicas difíciles

Por condiciones minero-geológicas difíciles se entienden aquellas en que la excavación se laborea por rocas propensas al hinchamiento, que tienen grandes dislocaciones minero-geológicas y grietas, rellenas de agua o partículas arcillosas y que se laborean también cerca de excavaciones vecinas o en la zona de las labores de arranque.

Según la hipótesis de A. Labass bajo la acción de las tensiones se forman en las rocas, alrededor de las excavaciones, tres zonas: la zona de aplastamiento, en los límites de la cual la roca parcial o completamente está fragmentada o destruida (la zona de deformaciones inelásticas), la zona de influencia (la zona elástica) y la zona de tensiones elevadas.

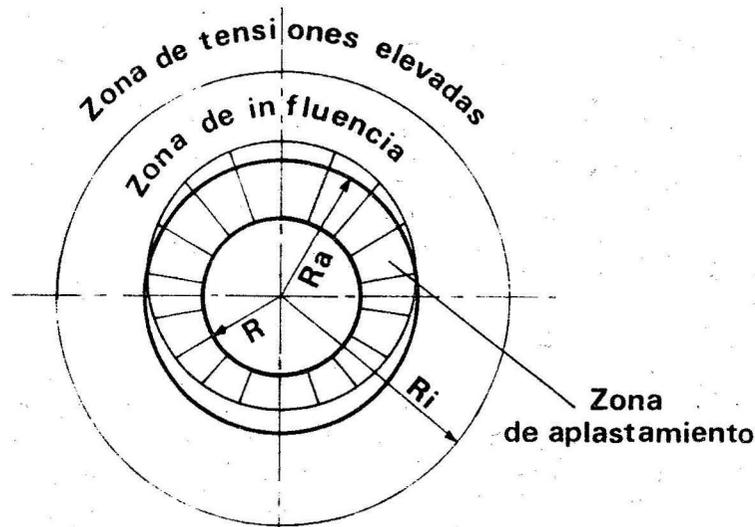


FIGURA 3. Esquema de distribución de las tensiones alrededor de una excavación según Labass.

En la zona de aplastamiento las rocas tenderán a expandirse y desplazarse al interior de la excavación. En este caso la deformación de las rocas laterales y del piso externamente se verán como un hinchamiento de las rocas. El quebrantamiento o fragmentación de las rocas se extiende hacia la profundidad del macizo por capas, como resultado de lo cual en las rocas circundantes que resultan trituradas surge la presión sobre la fortificación.

La zona de aplastamiento alrededor de la excavación horizontal de sección circular no tiene la forma de un cilindro regular, por encima de la excavación ella es mayor que en los lados, y en los lados es mayor, que por abajo. Esto se explica por la acción diferente del peso de la roca quebrantada, que no es posible obviar.

Más allá de la zona de aplastamiento se presupone la zona de influencia elástica. Teóricamente en esta zona las rocas están sometidas a tensiones, iguales a las tensiones que existían antes del laboreo de la excavación. En la práctica la zona de influencia está limitada por una superficie cilíndrica con un radio  $R_i$ , en esta zona todos los puntos están sometidos a tensiones que se diferencian de las tensiones que existían antes del laboreo de la excavación en una magnitud pequeña (2-5) %.

La zona de influencia y la zona de tensiones elevadas no ejercen ninguna acción sobre la fortificación de las excavaciones mineras.

A medida que aumenta la zona de aplastamiento de las rocas, su presión sobre la fortificación variará hasta un límite determinado. De esta forma habrá un estado de equilibrio de las rocas en el que la zona de aplastamiento alcanza su límite. La presión de las rocas sobre la fortificación, sin considerar el peso de la roca fragmentada (quebrantada) para el caso de rocas homogéneas (hasta la superficie de la tierra), referida a 1 m de excavación, se determina por la fórmula:

$$P = (1 - \text{sen } \varphi) \gamma_v H \left( \frac{R}{R_a} \right) \frac{2 \text{ sen } \varphi}{2 - \text{sen } \varphi}, \text{ kgf/m} \quad (34)$$

donde:

- H- profundidad de ubicación de la excavación con respecto a la superficie
- R- radio de la sección transversal de la excavación, m
- $R_a$ - radio del contorno de la zona de aplastamiento, m

Las constantes elásticas (módulo de elasticidad E y coeficiente de Poisson  $\mu$ ) no entran en la fórmula (34), ya que ellas no pueden caracterizar las propiedades mecánicas de las rocas, que se encuentran en la zona de aplastamiento (estado tensional más allá del límite de elasticidad). En este caso las propiedades mecánicas más allá de la zona de elasticidad se caracterizan sólo por el ángulo de fricción interna.

La máxima presión será para el valor de  $R_a$ , que se aproxime a R, y después a medida que se forma la zona de aplastamiento de las rocas, cuando  $R_a > R$  la presión sobre la fortificación disminuye. En este principio está basada la utilización de la fortificación flexible.

El estado de las rocas analizado explica también el hecho, de que la fortificación de algunas excavaciones al principio no soporta la presión de las rocas, y después de una o varias refortificaciones se vuelve completamente estable.

Para la determinación de la presión de las rocas en condiciones reales en la fórmula (34) es necesario sustituir  $\gamma_v H$  por la magnitud  $\sum_{i=1}^n \gamma_{vi} \cdot h_i$

donde:

$\gamma_{vi}$ - masa volumétrica de la roca en la capa  $i$ ,  $kg/m^3$

$h_i$ - potencia (espesor) de la capa  $i$ ,  $m$

El ángulo de fricción interna  $\varphi$  a consecuencia de la variación del estado de las rocas en la zona de aplastamiento y a la acción de los factores de disgregación también varía. Esto puede ser considerado con la introducción en la fórmula (34) del coeficiente correspondiente. Considerando la proposición de V. M. Gorodnichev la fórmula (34) toma la siguiente forma:

$$P = (1 - \text{sen } K\varphi) \sum_{i=1}^n \gamma_{vi} \cdot H_i \cdot \left(\frac{R}{R_a}\right) \frac{2 \text{ sen } K\varphi}{1 - \text{sen } K\varphi} \quad (35)$$

donde:

$K$ - coeficiente que tiene en cuenta la variación del ángulo  $\varphi$

Si la fortificación se coloca a medida que avanza el frente y se conserva la resistencia natural de las rocas en todo el plazo de servicio de la excavación, entonces el coeficiente de variación del ángulo de fricción interna de la roca  $-K-$  se puede considerar igual a 1. En los casos en que las rocas estén sometidas a la disgregación y su resistencia disminuya  $K = 0,8$  a  $0,9$ . En el caso de tomar medidas que contribuyan a la estabilización de las rocas,  $K = 1,1$ . El radio del contorno de la zona de aplastamiento es muy difícil determinarlo prácticamente, por eso es mejor cambiarlo por parámetros que puedan ser dados (por ejemplo la magnitud de la flexibilidad vertical u horizontal, la disminución del área de la sección transversal) o los obtenidos en las condiciones de la producción (variación del área de la sección transversal, el coeficiente de ensanchamiento no elástico de las rocas  $K_p$ , el cual se toma generalmente  $K_p = 1,1$ ).

La magnitud de la deformación inelástica de las rocas alrededor de la excavación de sección circular se puede determinar por la fórmula:

$$\Delta s = \pi (R_a^2 - R^2) (K_p - 1), m^2 \quad (36)$$

de donde:

$$\frac{R}{R_a} = \frac{1}{\left(1 + \frac{S}{R^2 \cdot (K_p - 1) \cdot \pi}\right)} Y_2 \quad (37)$$

Colocando el valor de  $R/R_a$  obtenido en la fórmula (35), obtenemos:

$$P = (1 - \text{sen } K\varphi) \sum_{i=1}^n \gamma_{vi} \cdot h_i \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{R^2 (K_p - 1) \pi}}\right) \frac{2 \text{ sen } K\varphi}{1 - \text{sen } K\varphi} \quad (38)$$

Considerando el peso de las rocas fragmentadas (quebrantadas) la presión de las rocas por el techo será:

$$P_T = P + P_1 \quad (39)$$

donde:

$P_1$ - peso de las rocas fragmentadas, que se encuentren en la zona de destrucción (fragmentación).

La presión por los lados será:

$$R_L = P \quad (40)$$

La presión por el piso

$$P_p = P - R_1 \quad (41)$$

Las fórmulas vistas muestran que la presión de las rocas se puede gobernar por la vía de la utilización de fortificaciones geométricamente variables (fortificaciones con una flexibilidad dada de antemano).

La fórmula de cálculo se deduce para excavaciones de sección circular, sin embargo ella puede ser utilizada con errores no muy grandes para excavaciones de otra forma. En este caso el contorno real de la excavación es necesario cambiarlo por uno circular convencional con el radio de la circunferencia circunscrita  $R$ . Por ejemplo, para una excavación de sección rectangular

el radio de la excavación convencional (de la circunferencia circunscrita)

será  $R = \sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}$ , y para excavaciones de sección trapezoidal:

$$R = \left( \frac{3a \cdot h + h \cot 80^\circ}{6a + 3h \cot 80^\circ} \right)^2 + (a + h \cot 80^\circ)^2 \quad (42)$$

*Desarrollo de ejemplos:*

*Ejemplo 13.* Una excavación horizontal se laboreo por margas ( $f = 2$ ;  $\varphi = 60^\circ 26'$ ;  $\gamma_v = 2\,000 \text{ kg/m}^3$ ) a una profundidad  $H = 120 \text{ m}$ . La excavación está entibada con una fortificación metálica anular SVP-17 tetracharneloflexible del perfil especial CB-17. El área de la sección transversal de la excavación (útil) antes del asentamiento de las rocas era de  $S_u = 6,15 \text{ m}^2$ . Como resultado de un reforzamiento de la presión minera el área de la sección transversal de la excavación disminuyó en  $S_u = 0,8 \text{ m}^2$ . Determinar la presión de las rocas por el techo, los lados y el piso de la excavación sobre un anillo, si el paso de la fortificación  $L = 0,5 \text{ m}$ .

*Resolución:* Determinamos el radio de la excavación (útil) antes del asentamiento

$$R_u = \sqrt{\frac{S_u}{\pi}} = \sqrt{\frac{6,15}{3,14}} = 1,4 \text{ m}$$

Encontramos el radio de la zona de aplastamiento:

$$R_a = R_u \sqrt{1 + \frac{S}{\pi R_u^2 (K_p - 1)}} = 1,4 \sqrt{1 + \frac{0,8}{3,14(1,4)^2(1,1 - 1)}}$$

$$R_a = 2,12 \text{ m}$$

Determinamos la presión sobre la fortificación a causa del peso de las rocas en la zona de aplastamiento

$$P_1 = \gamma_v (R_a - R) = 2\,000 (2,12 - 1,4) = 1\,440 \text{ kgf/m}$$

La presión sobre la fortificación la determinamos por la fórmula (35):

$$P = (1 - \text{sen } K^\varphi) \sum_{i=1}^n \gamma_{vi} h_i \left( \frac{R_u}{R_a} \right) \frac{2 \text{ sen } K^\varphi}{1 \text{ sen } K^\varphi}$$

$$P = (1 - \text{sen } 0,8 \cdot 63^\circ 26') 2\,000 \cdot 120 \left( \frac{1,4}{2,12} \right) \frac{2 \text{ sen } 0,8 \cdot 63^\circ 26'}{1 - \text{sen } 0,8 \cdot 63^\circ 26'}$$

$$P = 3\,050 \text{ kgf/m}$$

La magnitud de cálculo de la presión de las rocas para un anillo por el techo será:

$$P_T = (P + P_1) L = (3\,050 + 1\,440) 0,5 = 2\,245 \text{ kgf}$$

La presión por los lados de la excavación:

$$R_z = P \cdot L = 3\,050 \cdot 0,5 = 1\,525 \text{ kgf}$$

La presión por el piso:

$$P_p = (P - P_1) L = (3\,050 - 1\,440) 0,5 = 805 \text{ kgf}$$

*Ejemplo 14.* Una excavación horizontal de sección rectangular se laboreo por rocas de una fortaleza  $f = 2$ ;  $\gamma_v = 1\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 63^\circ 26'$  a una profundidad  $H = 200 \text{ m}$ . El proyecto prevé utilizar en calidad de fortificación permanente una fortificación de madera (de cuadro) con una distancia entre cuadros  $L = 0,33 \text{ m}$ . Las dimensiones de la excavación (de laboreo) son: ancho  $2a = 3,16 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,86 \text{ m}$ . Determinar la presión minera por parte del techo, lados y piso de la excavación, si después del asentamiento la altura de la excavación fue de  $h_1 = 2,66 \text{ m}$ .

*Resolución:* Se determina el radio convencional de la excavación

$$R = \sqrt{a^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3,16}{2}\right)^2 + \left(\frac{2,86}{2}\right)^2} = 2,15 \text{ m}$$

Se determina en cuanto disminuyó el área de la sección transversal de la excavación después del asentamiento:

$$\Delta S = 2a(h - h_1) = 3,16(2,86 - 2,66) = 0,632 \text{ m}^2$$

Entonces se procede a calcular el radio de la zona de aplastamiento ( $R_a$ ):

$$R_a = R \sqrt{1 + \frac{S}{\pi R^2 (K_p - 1)}} = 2,15 = \sqrt{1 + \frac{0,632}{3,14 (2,15)^2 (1,1 - 1)}}$$

$$R_a = 2,58 \text{ m}$$

Determinamos la presión sobre la fortificación por el peso de las rocas en la zona de aplastamiento:

$$P_1 = \gamma_v(R_a - R) = 1\,500 (2,58 - 2,15) = 645 \text{ kgf/m}$$

La presión sobre la fortificación de la excavación por parte de las rocas del techo sin considerar su peso es:

$$P = (1 - \operatorname{sen} K^\varphi) \cdot \gamma_v \cdot H \cdot \left(\frac{R}{R_a}\right) \frac{2 \operatorname{sen} K^\varphi}{1 - \operatorname{sen} K^\varphi}$$

$$P = (1 - \operatorname{sen} 0,8 \cdot 63^\circ 26') \cdot (1\,500) \cdot (200) \cdot \left(\frac{2,15}{2,58}\right) \frac{2 \operatorname{sen} 0,8 \cdot 63^\circ 26'}{1 - \operatorname{sen} 0,8 \cdot 63^\circ 26'}$$

$$P = 3\,420 \text{ kgf}$$

La magnitud de cálculo de la presión minera de las rocas sobre un cuadro de fortificación por parte del techo:

$$P_t = (P + P_1) L = (3\,420 + 645) 0,33 = 1\,340 \text{ kgf}$$

La presión por parte de los lados de la excavación sobre un cuadro de fortificación:

$$R_L = P \cdot L = 3\,420 \cdot 0,33 = 1\,129 \text{ kgf}$$

La presión por parte del piso de la excavación

$$P_p = (P - P_1) L = (3\,420 - 645) 0,33 = 915,7 \text{ kgf}$$

*Problemas a resolver:*

#### Problema 19

Una excavación minera horizontal se laboreo por rocas de fortaleza  $f = 1$ ;  $\gamma_v = 1\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 45^\circ$  a una profundidad  $H = 150 \text{ m}$ . La excavación está entibada con una fortificación metálica anular flexible de perfil especial SVP-22 con un paso de fortificación  $L = 0,5 \text{ m}$ . El radio de la excavación (útil) antes del asentamiento (la reducción)  $R = 1,5 \text{ m}$ . Determinar en cuánto disminuyó el área de la sección transversal de la excavación, si la presión de cálculo sobre un cuadro de fortificación por parte del techo  $P_t = 5\,000 \text{ kgf}$ .

#### Problema 20

Determinar la presión de las rocas por parte del techo, lados y piso de la excavación de sección transversal circular laboreada en rocas de fortaleza  $f = 1,5$ ;  $\gamma_v = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 56^\circ 19'$  a una profundidad  $H = 100 \text{ m}$ . El radio de la excavación (útil)  $R = 2,05 \text{ m}$ . A causa de la gran presión de las rocas el área de la sección transversal de la excavación disminuyó en  $S = 0,75 \text{ m}^2$ .

#### Problema 21

Un socavón de exploración de sección transversal rectangular se laboreo por rocas con fortaleza  $f = 0,8$ ;  $\gamma_v = 1\,600 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 38^\circ 40'$  a una profundidad  $H = 80 \text{ m}$  de la superficie de la tierra. La excavación está fortificada con una entibación de cuadros de madera, el paso de fortificación  $L = 0,25 \text{ m}$ . Determinar en cuánto disminuye el alto de la excavación, si sus dimensiones iniciales eran  $h = 2,1 \text{ m}$ ;  $2a = 2,38 \text{ m}$ , y la presión lateral sobre un cuadro de fortificación  $R_L = 11\,000 \text{ kgf}$ .

#### Problema 22

Determinar la presión de las rocas por parte del techo, lados y piso de la excavación de sección trapezoidal, fortificada con una fortificación metálica y laboreada en rocas de fortaleza  $f = 2$ ;  $\gamma_v = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 63^\circ 26'$  a una profundidad  $H = 60 \text{ m}$  desde la superficie de la tierra. Las dimensiones útiles de la excavación son: ancho por el techo  $2a = 1,8 \text{ m}$ , por el piso  $2,62 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,35 \text{ m}$ .

A consecuencia de una gran presión el área de la sección transversal de la excavación disminuyó en  $\Delta S = 0,8 \text{ m}^2$ .

En los cálculos de presión minera en excavaciones laboreadas por rocas quebradas, comprimidas y agrietadas, es posible utilizar la hipótesis de M. M. Protodiakonov, corregida por V. V. Orlov.

Según este criterio el ancho de la bóveda de equilibrio natural  $b_b$  para una forma rectangular de la sección transversal de la excavación se determina por la fórmula:

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}, \text{ m} \quad (43)$$

donde:

$h$ - altura de laboreo de la excavación,  $m$

y para una forma trapezoidal de la sección transversal de la excavación.

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}, m \quad (44)$$

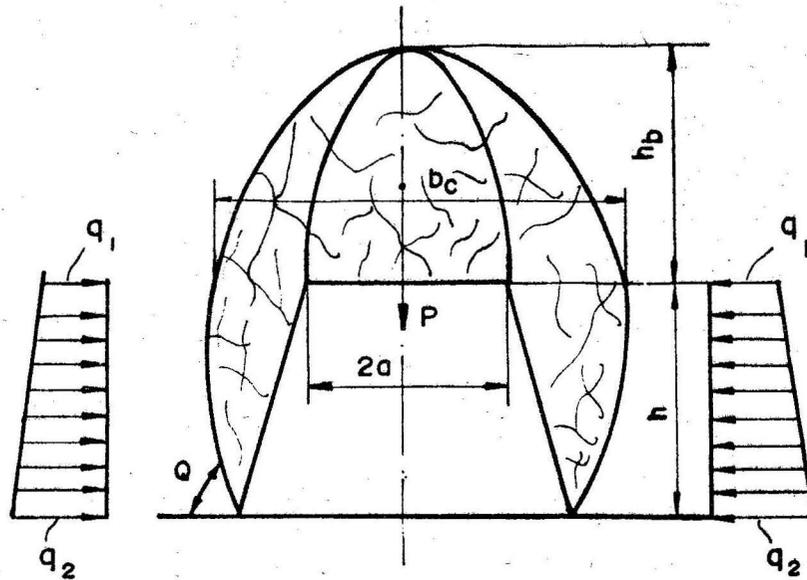


FIGURA 4. Esquema de cálculo de Orlov.

La altura de la bóveda de equilibrio natural

$$h_b = 0,8 \sqrt[3]{H \cdot \frac{b_b}{f}}, m \quad (45)$$

donde:

H- profundidad a que está situada la excavación, m

La presión de las rocas por el techo sobre 1 m de fortificación

$$P = \frac{4}{3} a \cdot h_b \cdot \gamma_v, \text{ kgf/m} \quad (46)$$

donde:

$h_b$ - altura de la bóveda

y sobre un cuadro de fortificación

$$P = \frac{4}{3} a \cdot \gamma_v \cdot L, \text{ kgf} \quad (47)$$

En aquellos casos, en que la excavación se laboree por rocas detríticas y la altura de la bóveda de equilibrio natural  $h_b$  sea mayor que la profundidad de ubicación H de la excavación, entonces la presión de las rocas se determina por las fórmulas:

Sobre 1 m de fortificación:

$$P = 2a \cdot \gamma_v \cdot H \text{ kg/m} \quad (48)$$

Aquí se considera que actúa sobre la fortificación todo el peso de la columna de roca que yace sobre ella.

Sobre un cuadro de fortificación

$$P = 2a \cdot \gamma_v \cdot H \cdot L, \text{ kgf} \quad (49)$$

La presión lateral sobre 1 m de fortificación en la parte superior de la excavación

$$q_1 = h_b \cdot \gamma_v \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (50)$$

en la parte inferior de la excavación

$$q_2 = (h_b + h) \cdot \gamma_v \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \quad (51)$$

La resultante de la presión lateral sobre 1 m de fortificación

$$R_L = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2 h_b + h) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right) \quad (52)$$

y sobre un cuadro de fortificación

$$R_L = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2 h_b + h) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right) \cdot L \quad (53)$$

El punto de aplicación de la fuerza resultante de la presión lateral se encontrará a una distancia del piso de la excavación

$$y = \frac{h}{3} \cdot \frac{3h_b + h}{2h_b + h}, m \quad (54)$$

*Desarrollo de ejemplos:*

*Ejemplo 15.* Una excavación minera horizontal de forma trapezoidal se laborea en rocas de fortaleza  $f = 2$ ;  $\gamma_v = 2\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 63^\circ 26'$  y coeficiente de esponjamiento 1,8 a una profundidad  $H = 300 \text{ m}$ . Las rocas detrás de la fortificación están parcialmente fragmentadas. Durante la reparación de la excavación parte de las rocas se liberan. Determinar la presión máxima de las rocas por el techo y los lados de la excavación sobre 1 m de fortificación después de la reparación, si las dimensiones de la excavación (de laboreo) son: ancho por el techo  $2a = 2,52 \text{ m}$ , altura  $h = 2,56 \text{ m}$ .

*Resolución:* El ancho de la bóveda de equilibrio natural

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}$$

$$b_b = 2,52 + \frac{2 \cdot 2,56}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2 \cdot 2,56}{\operatorname{tg} 153^\circ 26'}$$

$$b_b = 4,7 \text{ m}$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural

$$h_b = \sqrt[3]{H \cdot \frac{h_b}{f}} = 0,8 \sqrt[3]{300 \cdot \frac{4,7}{2}} = 12,58 \text{ m}$$

La masa volumétrica de las rocas parcialmente fragmentadas, que se encuentran en la bóveda de equilibrio natural después de liberar las rocas y después de la reparación de la excavación disminuye y será igual a:

$$\gamma_v' = \frac{\gamma_v + \frac{\gamma_v}{K_e}}{2} = \frac{2\,200 + \frac{2\,200}{1,8}}{2} = 1\,710 \text{ kgf/m}^3$$

La presión máxima por el techo sobre 1 m de fortificación de la excavación será:

$$P = \frac{4}{3} a h_b \gamma_v' = \frac{4}{3} \cdot 1,26 \cdot 12,58 \cdot 1\,710 = 36\,100 \text{ kgf/m}$$

El valor medio del coeficiente de fortaleza de la roca parcialmente fragmentada, que se encuentra en la bóveda de equilibrio natural será:

$$f_1 = \frac{f + f_e}{2} = \frac{2 + 1,8}{2} = 1,9$$

Ya que  $f_1 = \operatorname{tg} \varphi_1$ , entonces por la tabla de los valores de las funciones trigonométricas naturales encontramos el ángulo  $\varphi = 62^\circ 15'$ . La presión lateral sobre 1 m de fortificación será:

$$R_L = \frac{\gamma_v' \cdot h}{2} (2 h_b + h) \operatorname{tg} \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right)$$

$$R_L = \frac{1\,710 \cdot 2,56}{2} (2 \cdot 12,58 + 2,56) \operatorname{tg} 13^\circ 52'$$

$$R_L = 7\,500 \text{ kgf/m}$$

*Ejemplo 16.* Un paso subterráneo se laborea en arcillas compactas ( $f = 1$ ;  $\gamma_v = 1\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ) a una profundidad  $H = 4 \text{ m}$  desde la superficie de la tierra. La forma de la sección transversal del túnel es rectangular, el ancho de la excavación (de laboreo)  $2a = 4,0 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,8 \text{ m}$ . Determinar la presión sobre 1 m, de fortificación por el techo y los lados de la excavación.

*Resolución:* El ancho de la bóveda de equilibrio natural

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}} = 4,0 \frac{2 \cdot 2,8}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + 45^\circ}{2}} = 6,33 \text{ m}$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural

$$h_b = 0,8 \sqrt[3]{H \frac{b_b}{f}} = 0,8 \sqrt[3]{4 \cdot \frac{6,33}{1}} = 8,04 \text{ m}$$

Ya que en el caso dado  $h_b > H$ , la presión de las rocas sobre 1 m de fortificación por la parte del techo se calculará considerando el peso total de la columna de rocas.

$$P = 2a \cdot H \cdot \gamma_v = 4,0 \cdot 4 \cdot 1500 = 24\,000 \text{ kgf/m}^3$$

La presión por los lados de la excavación sobre 1 m de fortificación

$$R_L = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2H + h) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi}{2} \right) = \frac{1500 \cdot 2,8}{2} (2,4 + 2,8) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - 45^\circ}{2}$$

$$R_L = 3\,890 \text{ kgf/m}$$

*Problemas a resolver:*

#### Problema 23

Una excavación longitudinal de transporte se laborea a una profundidad  $H = 125 \text{ m}$  de la superficie terrestre. En el techo de la excavación yacen esquistos arenísticos parcialmente fragmentados, y en los lados y en el piso de la excavación areniscas. La forma de la sección transversal de la excavación es abovedada (bóveda de caja) con paredes verticales. Las dimensiones de laboreo de la excavación son: ancho  $2a = 4,10 \text{ m}$ ; altura  $h = 2,84 \text{ m}$ . Determinar la presión máxima por el techo, los lados y el piso sobre 1 m de fortificación.

#### Problema 24

Una galería maestra con una forma de la sección transversal trapezoidal se laborea por esquistos arcillosos blandos a una profundidad  $H = 216 \text{ m}$  de la

superficie de la tierra. Determinar la presión por el techo, lados y el piso de la excavación sobre 1 m de fortificación, si el ancho de la excavación (ancho de laboreo) por el techo  $2a = 2,46 \text{ m}$ , por el piso de 3,28 y la altura  $h = 2,34 \text{ m}$ .

#### Problema 25

Un túnel de alcantarillado de forma rectangular en su sección transversal se laborea por tierras arcillosas compactas a una profundidad  $H = 3 \text{ m}$  de la superficie terrestre. Determinar la presión por el techo y los lados de la excavación sobre 1 m de fortificación si el ancho de laboreo del túnel  $2a = 3,8 \text{ m}$ ; la altura  $h = 2,0 \text{ m}$ .

#### Problema 26

Determinar la presión sobre 1 m de fortificación por la parte del techo y de los lados de una excavación horizontal, que se laborea en tierras arcillosas blandas a una profundidad  $H = 8 \text{ m}$  de la superficie terrestre, si el ancho de laboreo de la excavación  $2a = 2,8 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,24 \text{ m}$ . La forma de la sección transversal de la excavación es rectangular.

**Presión sobre la fortificación de excavaciones laboreadas en la zona de influencia de excavaciones aledañas o de espacios ya laboreados**

El ancho de la bóveda de equilibrio natural para una forma rectangular de la sección transversal de la excavación se puede calcular por la expresión:

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} (\varphi - 2^\circ)} \quad (55)$$

y para una forma trapezoidal de la sección transversal de la excavación:

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2h}{\operatorname{tg} (\varphi - 2^\circ)} \quad (56)$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural es:

$$h_b = 0,9 \sqrt[3]{H \cdot \frac{b_b}{f}} \quad (57)$$

La magnitud de la presión de las rocas por la parte del techo y de los lados de la excavación se determina por las fórmulas (46 a la 52).

*Desarrollo de ejemplos:*

*Ejemplo 17.* Una galería de mina de nivel ha sido laboreada por una capa de cromitas. En el techo y el piso de la capa yacen dunitas ( $f = 6$ ;

$\gamma_v = 2\,800\text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 80^\circ 32'$ ). La forma de la sección transversal de la galería de mina es trapezoidal, el ancho de laboreo por el techo  $2a = 2,84\text{ m}$ ; la altura  $h = 2,56\text{ m}$ . La profundidad de ubicación de la galería de mina desde la superficie terrestre  $H = 343\text{ m}$ . La excavación de cuadro metálica, el paso de la fortificación  $L = 0,6\text{ m}$ . Determinar la presión máxima de las rocas sobre un cuadro de fortificación por la parte del techo.

*Resolución:* La galería de mina de nivel se encuentra en la zona de influencia de las labores de arranque, por eso el ancho de la bóveda de equilibrio natural lo determinaremos por la fórmula:

$$b_b = 2a + \frac{2h}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2h}{\operatorname{tg} (\varphi - 2^\circ)} = 2,84 + \frac{2 \cdot 2,56}{\operatorname{tg} 80^\circ} + \frac{2 \cdot 2,56}{\operatorname{tg} (80^\circ 32' - 2^\circ)}$$

$$b_b = 4,78\text{ m}$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural ( $h_b$ )

$$h_b = 0,9 \sqrt[3]{H \cdot \frac{b_b}{f}} = 0,9 \sqrt[3]{343 \cdot \frac{4,78}{6}} = 5,02\text{ m}$$

La masa volumétrica de las rocas, que se encuentran en la bóveda de equilibrio natural es:

$$\gamma'_v = \frac{1}{2} (\gamma_v + \frac{\gamma_v}{K_e}) = \frac{1}{2} (2\,800 + \frac{2\,800}{2}) = 2\,100\text{ kg/m}^3$$

La presión de las rocas sobre un cuadro de fortificación por la parte del techo es:

$$P = \frac{4}{3} \cdot a \cdot h_b \cdot \gamma'_v \cdot L = \frac{4}{3} \cdot 1,42 \cdot 2\,100 \cdot 0,6 = 12\,000\text{ kgf}$$

*Problemas a resolver:*

#### Problema 27

Determinar la magnitud de la presión de las rocas por la parte del techo sobre la fortificación de una excavación minera horizontal, que ha sido labreada a una profundidad  $H = 170\text{ m}$  de la superficie terrestre por areniscas agrietadas, en las condiciones: forma de la sección transversal de la excavación abovedada (con bóveda semicircular) y con paredes verticales, el ancho de laboreo de la excavación  $2a = 4,1\text{ m}$ , la altura  $h = 2,55\text{ m}$ , la

excavación está fortificada con fortificación metálica de perfil especial SVP-17, el paso de fortificación  $L = 0,75\text{ m}$ . Paralela a la excavación vertical se proyecta el laboreo de otra excavación.

#### Problema 28

En un proyecto se prevé el laboreo de dos excavaciones mineras horizontales paralelas a una profundidad  $H = 120\text{ m}$  de la superficie terrestre por calizas margosas ( $f = 5$ ;  $\gamma_v = 2\,500\text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 78^\circ 41'$ ). La forma de la sección transversal de la excavación es rectangular. Determinar la presión de las rocas por la parte del techo y de los lados de la excavación sobre  $1\text{ m}$  de fortificación, si el ancho de la excavación (de laboreo)  $2a = 2,6\text{ m}$ , la altura  $h = 2,4\text{ m}$ .

#### Presión de las rocas en las excavaciones inclinadas

Las excavaciones mineras inclinadas ocupan una posición intermedia entre las excavaciones horizontales y las verticales. Para la determinación de la magnitud de la presión minera sobre la fortificación se parte del ángulo de inclinación de la excavación; la fuerza vertical  $P$  se descompone en dos componentes (Figura 5) la fuerza normal  $N$  dirigida perpendicularmente al piso y al techo y la fuerza tangencial  $T$ , dirigida paralelamente al eje longitudinal de la excavación. La componente normal presiona sobre la fortificación, y la tangencial tiende a volcar la fortificación.

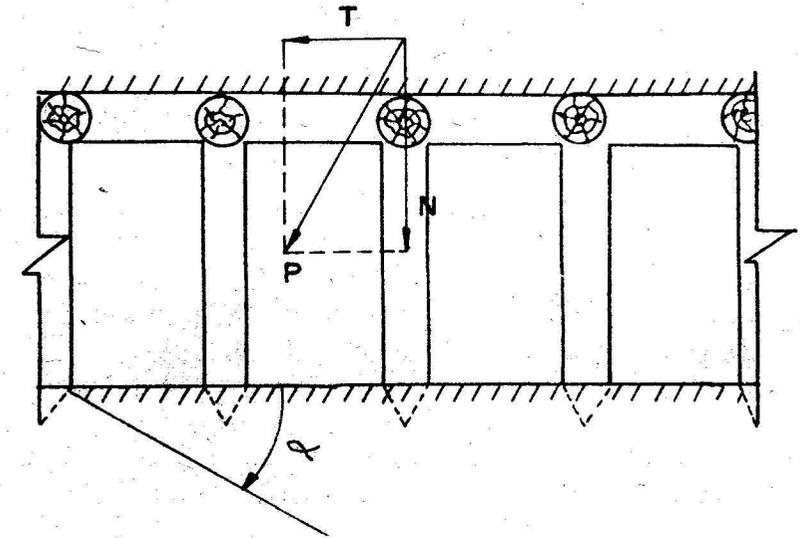


FIGURA 5. Esquema de cálculo de la presión minera en excavaciones inclinadas.

La presión vertical P se determina por las hipótesis anteriormente examinadas, y las fuerzas componentes N y T por las fórmulas:

$$N = P \cos \alpha \quad (58)$$

$$T = P \operatorname{sen} \alpha \quad (59)$$

donde:

$\alpha$  - es el ángulo de inclinación de la excavación en grados.

Con el aumento del ángulo de inclinación de la excavación la proporción entre las componentes normal y tangencial varía. Para un ángulo de inclinación de la excavación mayor de  $30^\circ$  aparece un esfuerzo por la parte del piso de la excavación, y el diagrama de presión de las rocas por su forma se aproxima al diagrama de presiones de una excavación vertical. Si la excavación inclinada se laboreo por rocas inestables, entonces la magnitud de la presión lateral dependerá de la altura vertical de denudamiento de la excavación, por eso en los cálculos se introduce el valor de la altura vertical.

$$h_1 = \frac{h}{\cos \alpha} \quad (60)$$

Entonces el semiancho (o semiluz)  $a_1$  y la altura de la bóveda de equilibrio natural  $b_1$  aumentan respectivamente y serán iguales, por ejemplo para una sección rectangular de la excavación

$$a_1 = a + \frac{h}{\cos \alpha} \cdot \cot \frac{90^\circ + \varphi}{2}, m \quad (61)$$

$$b_1 = \frac{a + \frac{h}{\cos \alpha} \cdot \cot \frac{90^\circ + \varphi}{2}}{f}, m \quad (62)$$

*Desarrollo de ejemplos:*

**Ejemplo 18.** Determinar la magnitud de la presión minera por la parte del techo y de los lados sobre un cuadro de la fortificación de un pozo inclinado, laboreado por arcillas compactas ( $f = 1,5$ ;  $\gamma_v = 1\ 800\ \text{kg/m}^3$ ;  $\varphi = 56^\circ 19'$ ) bajo un ángulo  $\alpha = 15^\circ$ , si la distancia entre cuadros  $L = 0,5\ m$ .

El pozo está fortificado con una fortificación de cuadros metálicos trapezoidales de perfil doble T. El ancho de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 2,46\ m$ ;  $h = 2,39\ m$ .

**Resolución:** Ya que el pozo inclinado se laboreo en rocas blandas homogéneas ( $f < 4$ ), que no se hinchan, sobre él no influyen las excavaciones aledañas, para la determinación de la magnitud de la presión minera se puede utilizar la hipótesis de Tsimbarievich.

El semiancho de la bóveda de equilibrio natural:

$$a_1 = a + h \left( \operatorname{ctg} 80^\circ + \cot \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right)$$

$$a_1 = 1,23 + 2,34 \left( \operatorname{ctg} 80^\circ + \operatorname{ctg} \frac{90^\circ + 56^\circ 19'}{2} \right)$$

$$a_1 = 2,35\ m$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{2,35}{1,5} = 1,57\ m$$

La magnitud de la componente de la presión minera por la parte del techo sobre un cuadro de fortificación

$$N = P \cos \alpha = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v' \cdot L \cdot \cos 15^\circ$$

$$N = 2,46 \cdot 1,57 \cdot 1\ 800 \cdot 0,5 \cdot 0,9659$$

$$N = 3\ 460\ \text{kgf}$$

La presión por la parte de los lados sobre un cuadro:

$$R_L = \frac{\gamma_v \cdot h}{2} (2b_1 + h) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2} \cdot L$$

$$R_L = \frac{1\ 800 \cdot 2,34}{2} (2 \cdot 1,57 + 2,34) \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - 56^\circ 19'}{2} \right) \cdot 0,5$$

$$R_L = 530\ \text{kgf}$$

**Ejemplo 19.** Es necesario laborear una excavación inclinada que va a tener un plazo de explotación de 4 años por una roca que tiene una fortaleza de 3 y una masa volumétrica de  $2\ 400\ \text{kg/m}^3$  y un ángulo de fricción interna  $\varphi = 52^\circ 20'$ .

La forma de la sección de la excavación es trapezoidal y el ancho de laboreo es por el techo de 3,0 m y su altura de 2,3 m. Si el ángulo de inclinación de la excavación es de 15° y la distancia entre cuadros de fortificación de 0,6 m. Determinar la magnitud de la presión por el techo.

**Resolución:** La excavación en cuestión se laboreo por rocas débiles homogéneas y no se tiene en cuenta ningún tipo de afectación por lo que para el cálculo se puede usar la hipótesis de Tsimbarievich.

El valor del semiancho de la bóveda de equilibrio natural será:

$$a_1 = a + h \left[ \cot 80^\circ + \cot \left( \frac{90^\circ + \varphi}{2} \right) \right]$$

$$a_1 = 1,5 + 2,3 \left[ \cot 80^\circ + \cot \left( \frac{90^\circ + 52^\circ 20'}{2} \right) \right]$$

$$a_1 = 2,7 \text{ m}$$

La altura de la bóveda de equilibrio natural será:

$$b_1 = \frac{a_1}{f} = \frac{2,7}{3} = 0,9 \text{ m}$$

La presión por el techo será:

$$N = P \cos \alpha = 2a \cdot b_1 \cdot \gamma_v \cdot L \cdot \cos \alpha$$

$$N = 3,0 \cdot 0,9 \cdot 2\,400 \cdot 0,6 \cdot 0,966$$

$$N = 3\,756 \text{ kgf}$$

**Problemas a resolver:**

**Problema 29**

Una rampa capital se laboreo por rocas de fortaleza  $f = 4$ ;  $\gamma_v = 2\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varphi = 75^\circ 58'$ . La forma de la sección transversal de la excavación es trapezoidal, el ángulo de inclinación  $\alpha = 18^\circ$ . El ancho de laboreo de la excavación por el techo  $2a = 2,46 \text{ m}$ , la altura  $h = 2,35 \text{ m}$ . La excavación está fortificada con cuadros metálicos de perfil doble T. Determinar la presión de las rocas sobre un cuadro de fortificación por la parte del techo según la hipótesis de M. M. Protodiakonov y P. M. Tsimbarievich. Compare los resultados obtenidos.

**Problema 30**

Una pendiente se laboreo por una roca de fortaleza  $f = 6$ ;  $\gamma_v = 2\,800 \text{ kg/m}^3$ . La forma de la sección transversal de la excavación es trapezoidal, el ángulo de inclinación de la excavación  $\alpha = 15^\circ$ . La excavación está fortificada con una fortificación mixta (peones huecos y sombreros metálicos de perfil doble T). Determinar el paso de la fortificación, si la presión por la parte del techo  $P = 10\,000 \text{ kg}$ . Las dimensiones de laboreo de la excavación son: ancho por el techo  $2a = 3,56 \text{ m}$ , altura  $h = 2,42 \text{ m}$ .

**Presión de las rocas en las excavaciones verticales**

Existen una serie de hipótesis acerca de la magnitud de la presión de las rocas sobre la fortificación de las excavaciones mineras verticales.

La hipótesis de M. M. Protodiakonov está basada en la utilización de los métodos de la estática del medio suelto. Se propone que la fortificación del pozo experimente la presión por la parte de las rocas laterales considerando sueltos o débilmente ligados (cohesionados) los materiales, similar a una pared de apoyo.

La carga sobre la fortificación del pozo se determina por la teoría de Coulomb, que analiza la presión de un macizo suelto, que se desliza bajo la acción de su propio peso por una pared plana vertical (Figura 6).

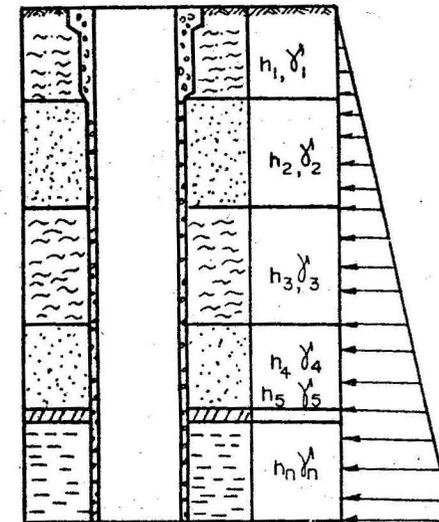


FIGURA 6. Esquema de cálculo de la presión sobre las paredes de un pozo según Protodiakonov.

El plano de deslizamiento está inclinado respecto a la horizontal bajo un ángulo  $\theta = \frac{90^\circ + \varphi}{2}$ . La presión sobre la unidad de área de fortificación para rocas homogéneas

$$P = \gamma_v \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}, \text{ kgf/m}^2 \quad (63)$$

donde:

- $\gamma_v$ - masa volumétrica de la roca,  $\text{kg/m}^3$
- H- profundidad de la excavación, m
- $\varphi$ - ángulo de fricción interna de las rocas, grados.

Al intersectar el pozo varias capas de roca, que por sus propiedades sean parecidas pero que se diferencien por su potencia, la presión sobre la unidad de área de fortificación será:

$$P = \sum_{i=1}^n \gamma_{vi} \cdot h_i \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_{\text{med}}}{2} \quad (64)$$

donde:

$$\varphi_{\text{med}} = \operatorname{arctg} f_{\text{med}} = \operatorname{arctg} \frac{\sum f_i \cdot h_i}{h_i} \quad (65)$$

$\varphi_{\text{med}}$  valor medio ponderado del ángulo de fricción interna, grado.

Para rocas fuertes en lugar del ángulo de fricción interna en la fórmula (67) se coloca el ángulo de fricción interna aparente  $\varphi_a$  cuya magnitud considera la cohesión del material.

$$\varphi_a = \operatorname{arctg} \frac{\tau \operatorname{tg} \varphi + C}{\tau} \quad (66)$$

donde:

- $\tau$ - tensión normal en el contacto entre las partículas de roca
- C- coeficiente de cohesión

Los resultados más satisfactorios en esta hipótesis se pueden obtener en la determinación de la presión en rocas homogéneas sueltas, que yacen a poca profundidad, y son características del laboreo de la boca de los pozos de mina.

### Desarrollo de ejemplos

**Ejemplo 20.** La boca de un pozo de mina corta las rocas que se señalan en la Tabla 5. Construir el diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación de la boca del pozo, hasta una profundidad de 15 m.

TABLA 5

Número de la capa	Rocas	Potencia vertical de la capa h, m	Coefficiente de fortaleza f	Masa volumétrica $\text{kg/m}^3$	Coefficiente de empuje $\operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi}{2}$
1	Aluviones	6	1	1 200	0,1714
2	Esquistos arcillosos blandos	2	2	1 400	0,0563
3	Esquistos arenísticos	5	4	2 500	0,0151
4	Areniscas	2	7	2 800	0,0050

**Resolución:** El valor medio ponderado de la masa volumétrica es:

$$\gamma_{v \text{ med}} = \frac{\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3 + \gamma_v^4 \cdot h_4}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}$$

$$\gamma_{v \text{ med}} = \frac{1\ 200 \cdot 6 + 1\ 400 \cdot 2 + 2\ 500 \cdot 5 + 2\ 800 \cdot 2}{6 + 2 + 5 + 2} = 1\ 873 \text{ kg/m}^3$$

El valor medio ponderado del coeficiente de fortaleza

$$f_{\text{med}} = \frac{f_1 \cdot h_1 + f_2 \cdot h_2 + f_3 \cdot h_3 + f_4 \cdot h_4}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}$$

$$f_{\text{med}} = \frac{1 \cdot 6 + 2 \cdot 2 + 4 \cdot 5 + 7 \cdot 2}{6 + 2 + 5 + 2} = 2,933$$

El valor medio ponderado del ángulo de fricción interna

$$\varphi_{\text{med}} = \operatorname{arctg} f_{\text{med}} = \operatorname{arctg} 2,933 = 71^\circ 10'$$

La presión sobre la fortificación en la parte del pozo que toca a la superficie será igual a cero.

Y a una profundidad de 15 m .

$$P_H = \gamma_{v \text{ med}} \cdot H \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi_{\text{med}}}{2} \right) = 1 \ 873 \cdot 15 \cdot 0,275$$

$$P_H = 773 \text{ kgf/m}^2$$

El diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación de la boca del pozo tiene la forma de un triángulo, en cuya base inferior  $P = 773 \text{ kgf/m}^2$ .

*Problemas a resolver:*

*Problema 31*

Un pozo de exploración se laborea por las rocas, que se plantean en la Tabla 6. Determinar la presión de las rocas sobre la fortificación del pozo

**TABLA 6**

Rocas	Potencia de la capa, m	Rocas	Potencia de la capa, m
Aluviones	6	Arcillas blandas	2
Arcillas densas	4	Esquistos arenísticos	2
Esquistos arcillosos	2,5	Areniscas	3
Arena de grano fino	3,5	Calizas	2

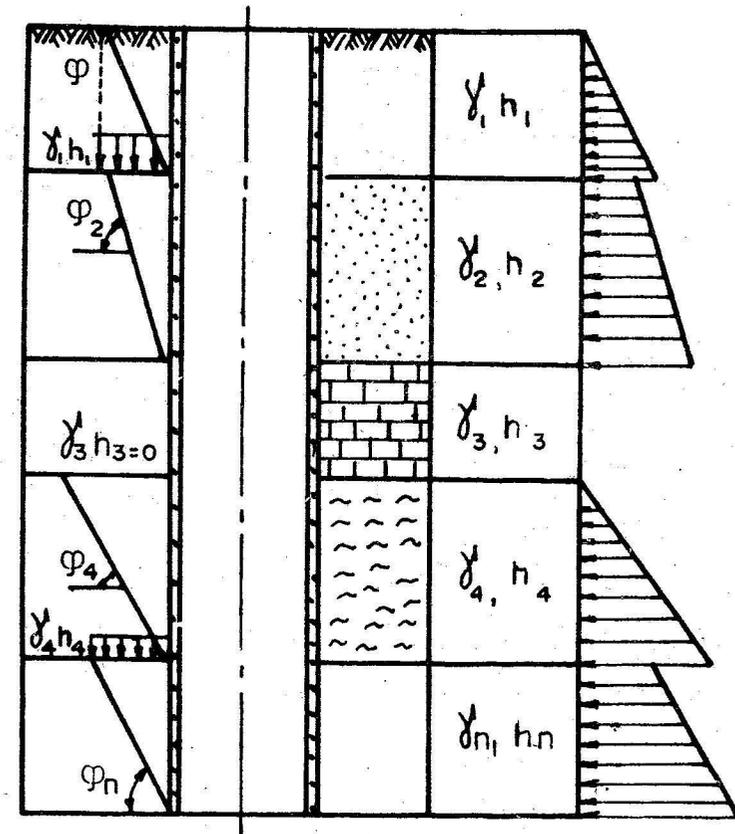
*Problema 32*

Un pozo vertical corta las siguientes rocas: calizas de una potencia de 6 m, arcillas de 3 m, esquistos arenísticos 5 m, areniscas 8 m, dolomitas 8 m y arenas de grano grueso 5 m. Determinar la presión de las rocas sobre la fortificación del pozo a una profundidad de 32 m de la superficie.

### Hipótesis del profesor P. M. Tsimbarievich

Según esta hipótesis la presión sobre la fortificación del pozo se determina en cada capa por separado en el techo y en el piso, es decir, los volúmenes de rocas deslizantes se forman en cada capa por separado y experimentan la presión de las capas suprayacentes.

Si el pozo intersecta capas de rocas fuertes y poco deformables, entonces la carga sobre las capas infrayacentes de las rocas débilmente deformables y de todas las capas sobre ellas pueden no considerarse (Figura 7).



**FIGURA 7.** Esquema de cálculo según Tsimbarievich.

Los diagramas de presiones representan en sí trapecios, con la excepción de la capa superior y de las capas que descansan por debajo de las rocas débilmente deformables para las cuales el diagrama estará representado por un triángulo.

La presión sobre el techo de la capa n será:

$$P_n^k = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \cdot h_i - 1 \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi_m}{2} \right) \quad (67)$$

La presión por el piso de esta misma capa

$$P_n^H = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \cdot \text{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi_i}{2} \right) \quad (68)$$

Según las fórmulas (67) y (68) la presión se determina en las rocas que yacen horizontalmente. En un buzamiento inclinado de las capas de presión de las rocas por el perímetro del pozo se distribuye de modo no uniforme. Esta circunstancia se considera mediante el coeficiente de carga no uniforme ( $\omega$ ), siendo

$$\omega = \frac{P_{\max}}{P} = 1,1 \text{ a } 1,5 \quad (69)$$

#### Desarrollo de ejemplos

**Ejemplo 21.** Un pozo vertical atraviesa las siguientes rocas: aluviones con una potencia de 10 m ( $\gamma_v^1 = 1\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_1 = 1$ ;  $A_1 = 0,1714$ ), esquistos arcillosos blandos de una potencia de 25 m ( $\gamma_v^2 = 1\,400 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_2 = 2$ ;  $A_2 = 0,0563$ ), arena -5 m ( $\gamma_v^3 = 1\,500 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_3 = 0,5$ ;  $A_3 = 0,38 - 26$ ), tierra arcillosa compacta -3 m ( $\gamma_v^4 = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_4 = 1$ ;  $A_4 = 0,1714$ ), esquisto arcilloso -7 m ( $\gamma_v^5 = 2\,200 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_5 = 3$ ;  $A_5 = 0,02624$ ), arenisca -8 m ( $\gamma_v^6 = 2\,800 \text{ kg/m}^3$ ;  $f_6 = 7$ ;  $A_6 = 0,00505$ ). Construir el diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación del pozo vertical obtenido según la hipótesis de P.M. Tsimbarievich.

**Resolución:** La presión sobre la fortificación del pozo en los aluviones desde la superficie

$$P_1^S = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_v^i \cdot h_i - 1 \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_1}{2} = 0 \text{ ya que}$$

$$h_1 = 0$$

En la parte inferior de los aluviones:

$$P_1^i = \sum_{i=1}^n \gamma_v^i \cdot h_i \cdot \text{tg}^2 \frac{90^\circ - \varphi_1}{2} = 1\,200 \cdot 10 \cdot 0,1714$$

$$P_1^i = 2\,060 \text{ kgf/m}^2$$

En la zona de esquistos arcillosos blandos:

– en la parte superior de la capa

$$P_2^S = h_1 \cdot \gamma_v^1 \cdot A_2 = 1\,200 \cdot 10 \cdot 0,0563 = 680 \text{ kgf/m}^2$$

– en la parte inferior de la capa

$$P_2^i = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2) A_2 = (1\,200 \cdot 10 + 1\,400 \cdot 25) \cdot 0,0563$$

$$P_2^i = 2\,650 \text{ kgf/m}^2$$

En la zona de arena:

– en la parte superior de la capa

$$P_3^S = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2) A_3 = (1\,200 \cdot 10 + 1\,400 \cdot 25) \cdot 0,3826$$

$$P_3^S = 17\,980 \text{ kgf/m}^2$$

– en la parte inferior de la capa

$$P_3^i = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3) A_3$$

$$P_3^i = (1\,200 \cdot 10 + 1\,400 \cdot 25 + 1\,500 \cdot 5) \cdot 0,3826$$

$$P_3^i = 20,850 \text{ kgf/m}^2$$

En la zona de tierra arcillosa compacta:

– en la parte superior de la capa

$$P_4^S = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3) + A_4$$

$$P_4^S = (1\,200 \cdot 10 + 1\,400 \cdot 25 + 1\,500 \cdot 5) \cdot 0,1714$$

$$P_4^S = 9,340 \text{ kgf/m}^2$$

– en la parte inferior de la capa

$$P_4^i = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3 + \gamma_v^4 \cdot h_4) A_4$$

$$P_4^i = (1\ 200 \cdot 10 + 1\ 400 \cdot 25 + 1\ 500 \cdot 5 + 1\ 800 \cdot 3) 0,1714 = 10,270$$

$$P_4^i = 10,270 \text{ kgf/m}^2$$

En la zona de esquistos arcillosos

– en la parte superior de la capa

$$P_5^S = (1\ 200 \cdot 10 + 1\ 400 \cdot 25 + 1\ 500 \cdot 5 + 1\ 800 \cdot 3) 0,0264 = 1\ 580 \text{ kgf/m}^2$$

– en la parte inferior de la capa

$$P_5^i = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3 + \gamma_v^4 \cdot h_4 + \gamma_v^5 \cdot h_5) A_5$$

$$P_5^i = (1\ 200 \cdot 10 + 1\ 400 \cdot 25 + 1\ 500 \cdot 5 + 1\ 800 \cdot 3 + 2\ 200 \cdot 7) 0,0264$$

$$P_5^i = 1\ 990 \text{ kgf/m}^2$$

En la zona de arenisca:

– en la parte superior de la capa

$$P_6^S = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3 + \gamma_v^4 \cdot h_4 + \gamma_v^5 \cdot h_5) A_6$$

$$P_6^S = (1\ 200 \cdot 10 + 1\ 400 \cdot 25 + 1\ 500 \cdot 5 + 1\ 800 \cdot 3 + 2 \cdot 2\ 700) 0,00505$$

$$P_6^S = 380 \text{ kgf/m}^2$$

– en la parte inferior de la capa

$$P_6^i = (\gamma_v^1 \cdot h_1 + \gamma_v^2 \cdot h_2 + \gamma_v^3 \cdot h_3 + \gamma_v^4 \cdot h_4 + \gamma_v^5 \cdot h_5 + \gamma_v^6 \cdot h_6) A_6$$

$$P_6^i = (1\ 200 \cdot 10 + 1\ 400 \cdot 25 + 1\ 500 \cdot 5 + 1\ 800 \cdot 3 + 2\ 200 \cdot 7 + 2\ 800 \cdot 8) 0,00505$$

$$P_6^i = 490 \text{ kgf/m}^2$$

En base a los cálculos realizados se construye el diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación del pozo.

*Problemas a resolver:*

*Problema 33*

Un pozo vertical atraviesa las siguientes rocas: tierra arcillosa blanda con una potencia de 5 m, arcilla grasa de 3 m, esquistos arcillosos débiles de 3 m, argilitas de fortaleza media de 12 m, arenisca arcillosa de 8 m y dolomitas de 9 m. Construir el diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación del pozo vertical.

*Problema 34*

Un pozo criollo vertical atraviesa tierra (suelo) suelta de una potencia de 2 m, arcilla arenosa liviana de 5 m, tierra arcillosa de 3 m, margas blandas de 10 m, arena de 15 m, esquistos arenosos de 9 m y arenisca arcillosa de 12 m. Construir el diagrama de presión de las rocas sobre la fortificación del pozo criollo de ventilación.

**Hipótesis Fenner-Labass**

En base a esta hipótesis se ha establecido la interacción de las deformaciones de las rocas circundantes con el pozo. En el régimen de trabajo flexible de la fortificación alrededor del pozo se forma una zona de deformaciones inelásticas. Las rocas que se encuentran dentro de esta zona, (que se comportan similar a un medio suelto), pueden desplazarse conjuntamente con la fortificación hacia el interior del pozo. Después de la zona de deformaciones inelásticas se encuentra la zona de aplastamiento, dentro de la cual las rocas experimentan deformaciones elásticas. La carga sobre la fortificación se forma de la presión de las rocas, que se encuentran en la zona de deformaciones inelásticas y de la recuperación elástica de las rocas, que se encuentran en la zona de influencia (Figura 8).

Según esta hipótesis para determinar la presión que actúa sobre la fortificación del pozo se propone la siguiente expresión

$$P = \frac{\mu}{1 - \mu} \cdot \gamma_v \cdot H (1 - \text{sen } \varphi) \left( \frac{a}{R} \right) \frac{2 \text{ sen } \varphi}{1 - \text{sen } \varphi} \quad (70)$$

donde:

$\mu$ - coeficiente de Poisson

$\varphi$ - ángulo de fricción interna, grados

a - radio del pozo, m

R- radio de la zona de deformaciones inelásticas, se calcula por la expresión (37) vista anteriormente

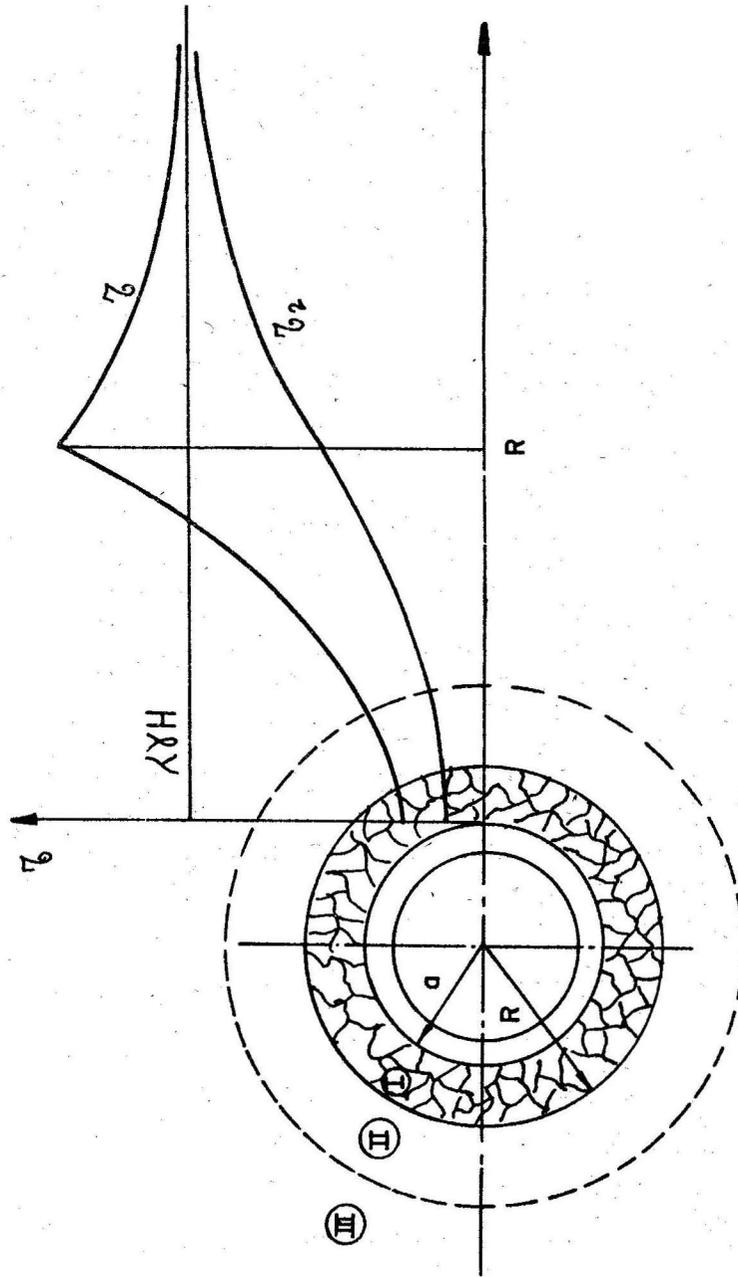


FIGURA 8. Distribución de tensiones alrededor de un pozo según Labass.

Para el caso de roca fragmentada Labass propuso emplear la siguiente expresión para calcular la presión sobre las paredes del pozo

$$P = \left( \frac{\mu}{1 - \mu} \right) \gamma_v \cdot H + C \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) (1 - \operatorname{sen}(\varphi)) \left( \frac{a}{R} \right) \frac{2 \operatorname{sen}(\varphi)}{1 - \operatorname{sen}(\varphi)} - C \operatorname{ctg}(\varphi) \quad (71)$$

donde:

C- fuerza de cohesión

Desarrollo de ejemplos:

**Ejemplo 22.** Se construye un pozo que tiene un área de laboreo de  $16 \text{ m}^2$  sección circular. El se laboreo a través de rocas que poseen como promedio las siguientes características. Masa volumétrica  $2400 \text{ kg/m}^3$ , fortaleza 4, ángulo de fricción interna  $52^\circ 25'$  y coeficiente de Poisson 0,23. La profundidad que se toma para el cálculo de la presión es  $120 \text{ m}$  y a la fortificación se le da una flexibilidad de un 20 %. Determinar la presión actuante.

**Resolución:** Lo primero que debemos buscar es el radio de la zona de deformación -R- para el cual previamente tenemos que calcular el valor de JS.

Según los datos JS = 20 % S lab, o sea, JS =  $3,2 \text{ m}^2$

De tal forma, podemos entrar a calcular R

$$R = \sqrt{\frac{\pi a^2 (K - 1) + JS}{\pi (K - 1)}}$$

El valor de -K- lo tomamos de 1,1

$$R = \sqrt{\frac{3,14 \frac{16}{\pi} (0,1) + 3,2}{0,1 \cdot \pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{1,6 + 3,2}{0,315}}$$

$$R = 3,9 \text{ m}$$

La presión actuante será:

$$P = \frac{0,23}{0,77} 2\ 400 \cdot 120 (1 - \text{sen } 52^{\circ}25') 0,6 \left( \frac{2 \text{ sen } 52^{\circ}25'}{1 - \text{sen } 52^{\circ}25'} \right)$$

$$P = 18\ 144 \cdot 0,6^{7,5} \text{ kgf/m}^2$$

$$P = 390 \text{ kgf/m}^2$$

Problemas a resolver:

**Problema 35**

Un pozo se laboreo a través de roca que posee como promedio las siguientes características. Masa volumétrica  $2\ 200 \text{ kg/m}^3$ , ángulo de fricción interna  $49^{\circ}30'$ , coeficiente de Poisson igual a 0,26, fortaleza 5.

Si la flexibilidad se toma de un 0,15 % con respecto al área de laboreo. Calcular la carga que actúa sobre el pozo para una profundidad de 170 m.

**Proposición del Vnimi para el cálculo de la carga sobre la fortificación de los pozos**

La ausencia de un método teórico lo bastante confiable y preciso para el cálculo de la carga sobre la fortificación trajo consigo la realización, por una serie de institutos de investigación de distintos países, de trabajos experimentales tendientes a obtener un valor más confiable de ese parámetro.

Uno de los centros de investigación que más trabajo ha realizado en esta dirección es el Instituto Topográfico de Investigaciones Científicas de Leníngrado (Vnimi) en la URSS.

Basándose en los resultados de los trabajos experimentales se propone un método empírico de cálculo.

El orden recomendado a seguir en los cálculos es el siguiente: La determinación de la profundidad ( $H_0$ ) a la cual las rocas pasan a un estado inestable

$$H_0 = \frac{K_d \cdot R_c}{2N \gamma_v} , m \quad (72)$$

donde:

$K_d$ - coeficiente de debilitamiento estructural de la roca en el macizo que depende del agrietamiento y estratificación entre otros factores; oscila entre 0,3 a 1,0. Se puede obtener orientativamente de tablas

$R_c$ - resistencia lineal a compresión,  $\text{kgf/m}^2$

$\gamma_v$ - masa volumétrica,  $\text{kg/m}^3$

$N$ - coeficiente adimensional de la concentración de tensiones, se recomienda formar igual a 6 en las intercepciones e igual a 3 en el resto del pozo.

Para profundidades  $H < H_0$ , no existe presión o no es significativa y la fortificación se elige sin su cálculo.

Si  $H > H_0$ , la carga normativa  $P_n$  sobre la fortificación se recomienda tomarla de la Tabla 7. Dicha tabla fue conformada para pozos que tienen un diámetro útil de 6 m.

**TABLA 7**

Profundidad  <i>m</i>	Para fortificación de hormigón monolítico o blandas cuando se usa el esquema sucesivo o paralelo de laboreo		Para fortificación de hormigón monolítico con empleo de hormigón de rápido endurecimiento y el esquema común de laboreo	
	Angulo buzamiento hasta $30^{\circ}$	Angulo buzamiento mayor de $30^{\circ}$	Angulo buzamiento hasta $30^{\circ}$	Angulo buzamiento mayor de $30^{\circ}$
Hasta 400	0,5	0,6	0,7	0,9
De 400 a 700	0,7	0,9	1,1	1,3
Más de 700	0,8	1,0	1,3	1,5

Si el diámetro útil es diferente a 6 m (mayor o menor) entonces el valor de la carga normativa obtenida ( $P_n$ ) se precisa según el diámetro del pozo empleando la expresión:

$$P_n' = [\tau + 0,1(R - 3)] P_n, \text{ kgf/cm}^2 \quad (73)$$

donde:

R- radio útil del pozo

La carga máxima sobre la fortificación para el caso más general (cualquier diámetro del pozo) se calcula por la expresión:

$$P_{\max} = n \cdot n_1 \cdot P_n' (1 + 3V) \quad (74)$$

donde:

- n- coeficiente de sobrecarga, se forma igual a 1,5
- $n_1$ - coeficiente adimensional que se toma en condiciones normales igual a 0,67, en las intercepciones igual a 1,0 y en rocas movedizas igual a 1,34
- V- coeficiente adimensional que nos caracteriza la distribución no uniforme de la carga por la fortificación, su valor depende principalmente del ángulo de buzamiento de las capas de rocas y de la distancia a las interrupciones del pozo con las excavaciones horizontales, su valor oscila entre 0,30 a 0,80.

*Desarrollo de ejemplos:*

*Ejemplo 23.* Calcular según la proposición del Vnini la carga máxima que actúa sobre un pozo para las siguientes condiciones: profundidad 310 m, el pozo se fortifica con hormigón monolítico y se laboreo por el esquema común, el ángulo de buzamiento de las capas de rocas es de 40° a 45°, el radio útil del pozo es de 4 m, el cálculo se realiza en lugares muy cercanos a las intercepciones de las excavaciones horizontales.

*Resolución:* Según lo planteado en el problema podemos pasar a calcular el valor de la presión actuante. De la Tabla 7 elegir la carga normativa  $P_n$  para un pozo de radio útil 3 m la que para el ángulo de buzamiento, profundidad y esquema de laboreo que se usa es de 0,9 kgf/m<sup>2</sup>.

Por lo que usando la expresión (73) obtenemos:

$$P_n' = 1 + 0,1 (1,0) 0,9 \text{ kgf/m}^2$$

$$P_n' = 0,99 \text{ kgf/m}^2$$

La carga máxima que actúa será:

$$P_{\max} = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 0,99 (1 + 3 \cdot 0,8)$$

$$P_{\max} = 5,1 \text{ kgf/m}^2$$

## BIBLIOGRAFIA

- BLANCO TORRENS, ROBERTO: *Mecánica de rocas*. Editorial Oriente, Santiago de Cuba, 1981.
- MAKSIMOV, A. P.: *Mecánica de rocas y fortificación de excavaciones*. Editorial Niedra, Moscú, 1973.
- NASONOV, L. N.: *Mecánica de rocas y fortificación de excavaciones mineras*. Editorial Niedra, Moscú, 1969.
- VNINI: *Presión minera, desplazamiento de las rocas*. URSS, 1970.

---

## INDICE

PROLOGO/3

PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DE LAS ROCAS/5

PRESION MINERA/18

PRESION EN LAS EXCAVACIONES HORIZONTALES/18

– Presión de las rocas sobre la fortificación en excavaciones laboreadas en rocas monolíticas/19

– Presión de las rocas sobre la fortificación en condiciones minero-geológicas dif ciones laboreadas

– Presión sobre la fortificación de excavaciones laboreadas en la zona de influencia de excavaciones aledañas o de espacios ya laboreados/55

PRESION DE LAS ROCAS EN LAS EXCAVACIONES INCLINADAS/57

PRESION DE LAS ROCAS EN LAS EXCAVACIONES VERTICALES/61

BIBLIOGRAFIA/75