

**CONSTRUCCION DE POZOS
EN CONDICIONES
MINERO-GEOLOGICAS
DIFICILES**

Ing. Roberto Blanco Torrens

CONSTRUCCION DE POZOS EN CONDICIONES MINERO-GEOLOGICAS DIFICILES

Ing. Roberto Blanco Torrens



La Habana, 1993

Redacción: Lic. Lilliana Sánchez Colás
Composición: Arlene Casas Mariño
Edición Corel-Ventura: Yohanka Morejón Rivero
Corrección: Lic. Mildred Balladares Rodríguez
Realización y emplane: Frank Herrera García

© Roberto Blanco Torrens, 1995
© Sobre la presente edición:
Editorial Félix Varela, 1995

EDITORIAL FELIX VARELA
San Miguel No. 1111
e/ Mazón y Basarrate
El Vedado. Ciudad de La Habana. Cuba
ISBN 959-07-0075-6

INDICE

PROLOGO	V
CAPITULO I. ESTUDIO DE ALGUNAS CARACTERISTICAS INGENIERO-GEOLÓGICAS DEL MACIZO	1
I.1. Rocas fuertes.....	2
I.2. Rocas ligadas.....	5
I.3. Rocas desligadas.....	7
I.4. Rocas movedizas.....	9
I.5. Investigaciones ingeniero-geológicas e hidrogeológicas imprescindibles cuando se va emplear un método especial de laboreo.....	10
CAPITULO II. LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE LA FORTIFICACION DE HINCADO	12
II.1. Hincado de madera.....	12
II.2. Hincado metálico.....	19
CAPITULO III. LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE CONSTRUCCIONES DE DESCENSO	25
III.1. Laboreo de pozos con el empleo de la fortificación de descenso.....	28
III.2. Laboreo de pozos con el empleo de escudos verticales.....	40
III.3. Principios básicos a considerar a la hora de proyectar y organizar el laboreo de pozos con el empleo de cons- trucciones de descenso.....	43
CAPITULO IV. LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE AIRE COMPRIMIDO	45
IV.1. Laboreo de pozos con el techo móvil de la cámara de trabajo..	48

IV.2. Laboreo de pozos con el techo fijo.....	56	CAPITULO IX. PERFORACION DE POZOS	152
IV.3. Método combinado de laboreo.....	58	IX.1. Algunos aspectos de la perforación rotatoria.....	156
IV.4. Aspectos de la protección e higiene del trabajo a observar durante el laboreo bajo la protección del aire comprimido.....	58	IX.2. Perforación rotatoria con perforadora de rotor.....	160
CAPITULO V. DESCENSO ARTIFICIAL DEL NIVEL DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS	61	IX.3. Perforación rotatoria reactiva de turbina.....	168
		IX.4. Perforación rotatoria de columna.....	170
		BIBLIOGRAFIA	172
CAPITULO VI. FORTALECIMIENTO DEL MACIZO ROCOSO	66		
VI.1. Fortalecimiento químico de las rocas.....	66		
VI.2. Fortalecimiento electroquímico.....	67		
VI.3. Fortalecimiento térmico de las rocas.....	68		
VI.4. Fortalecimiento por medio de la fusión eléctrica.....	68		
CAPITULO VII. TAPONAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO	70		
VII.1. Materiales usados para el taponamiento.....	73		
VII.2. Esquemas tecnológicos del taponamiento.....	81		
VII.3. Taponamiento posterior del macizo rocoso.....	95		
VII.4. Proyección de los trabajos de taponamiento.....	98		
CAPITULO VIII. LABOREO DE POZOS CON EL CONGELAMIENTO PRELIMINAR DEL MACIZO ROCOSO	111		
VIII.1. Determinación de los parámetros fundamentales del proceso de congelación.....	112		
VIII.2. Red de congelación.....	121		
VIII.3. Estación frigorífica. Cálculo de su productividad.....	125		
VIII.4. Perforación de los taladros de congelación.....	127		
VIII.5. Proceso de congelación de la roca y su control.....	129		
VIII.6. Variantes especiales del proceso de congelación.....	135		
VIII.7. Laboreo del pozo en la zona congelada.....	140		
VIII.8. Fortificación del pozo en la zona congelada.....	141		
VIII.9. Descongelación del macizo.....	148		
VIII.10. Tiempo de construcción y costo de los pozos construidos con el congelamiento de la roca.....	149		

PROLOGO

El presente título trata en forma detallada los principales aspectos de los diferentes métodos especiales usados para el laboreo de los pozos en condiciones ingeniero-geológicas difíciles.

En el primer capítulo se hace un análisis de los diferentes tipos de rocas y sus características y de las causas que en cada caso puede motivar la necesidad de emplear un método especial de laboreo, dándose elementos para su elección. Del segundo capítulo hasta el noveno y último se tratan con mayor o menor profundidad, según su grado de utilización, los diferentes métodos de laboreo.

Este título tiene como misión esencial servir de texto básico para la asignatura Construcción Subterránea de la carrera de Ingeniería de Minas, aunque dados sus contenidos y grado de detalle puede ser utilizado para actividades de posgrado, incluyendo la especialidad de Construcción Subterránea. El título puede ser usado por técnicos y profesionales de la producción que laboren en este campo.

El autor expresa su más sincera gratitud a todos los que de una u otra forma han cooperado en la confección de este trabajo.

Agradecemos por anticipado cualquier señalamiento u observación crítica que tienda a mejorar nuestro trabajo.

CAPITULO I

ESTUDIO DE ALGUNAS CARACTERISTICAS INGENIERO-GEOLOGICAS DEL MACIZO

La necesidad del empleo de métodos especiales para el laboreo de excavaciones subterráneas, según una forma amplia de enfocar el problema, puede deberse a dos causas fundamentales: la inestabilidad del macizo rocoso y la presencia de gran cantidad de agua; una gran complejidad adquiere la situación en caso de rocas acuíferas e inestables.

Para el laboreo de pozos en rocas movedizas y muy inestables, con o sin presencia de agua y en rocas fuertes, pero agrietadas con flujos de agua superiores a los $8 \text{ m}^3/\text{h}$, se recomienda el empleo de métodos especiales.

Otras causas que también pueden motivar la necesidad de emplear métodos especiales durante el laboreo de pozos son las siguientes: cuando se atraviesan rocas que ofrecen peligro por el posible desprendimiento súbito de gases; cuando se atraviesan zonas de rocas de congelación perpetua; cuando se atraviesan minados antiguos, y otras.

Algunos métodos especiales se destinan para el laboreo a través de rocas acuíferas inestables, otras para el laboreo en rocas fuertes y acuíferas, en tanto que otros métodos pueden emplearse en una u otra situación.

Los métodos especiales de laboreo convencionalmente se pueden clasificar en tres grupos: los que crean una protección en el frente de la excavación mediante el empleo de una fortificación especial; los que producen el aislamiento temporal o permanente de la excavación con respecto al macizo circundante y el método de perforación de pozos.

Los métodos del primer grupo (fortificación de hincado y de descenso), son empleados en caso de rocas muy inestables.

Dentro del segundo grupo se ubican: el método de congelación, el de taponamiento, el de fortalecimiento del macizo rocoso, el de descenso artificial de las aguas subterráneas y el método de laboreo bajo la protec-

ción del aire comprimido, aunque este último puede ser ubicado también en el primer grupo.

Los métodos de este segundo grupo se emplean en rocas con gran contenido de agua.

Como ya se señaló, el tercer grupo lo constituye por sí solo y debido a sus peculiaridades, el método de perforación de pozos.

Los métodos especiales más difundidos para el laboreo de pozos en condiciones ingeniero-geológicas difíciles son: el de congelación en rocas acuíferas inestables y el de taponamiento en rocas fuertes agrietadas y con gran contenido de agua.

Para una correcta elección del método especial de laboreo que se debe emplear es necesario conocer con detalle las características ingeniero-geológicas del macizo donde se va a laborear la excavación.

Como se conoce de ingeniería geológica, los macizos rocosos, en dependencia de las características de su enlace se clasifican en: macizos de rocas fuertes, macizos de rocas ligadas, macizos de rocas desligadas y movedizos. Esta clasificación de los macizos rocosos es empleada también en el campo de la construcción subterránea.

Cada uno de los tipos de rocas antes señalados poseen sus particularidades específicas, por lo que a continuación se procede a hacer un breve análisis de cada uno de ellos, debido a la importancia que tiene a la hora de elegir el método de laboreo y con vista a evaluar las causas que pueden motivar la necesidad de empleo de un método especial.

1.1. ROCAS FUERTES

Dentro de este tipo de rocas están las ígneas, metamórficas y sedimentarias más resistentes, las cuales poseen un enlace estructural entre sus partículas componentes.

La deformación en este tipo de rocas puede ir acompañada por la pérdida del enlace entre las partículas componentes, el cual posteriormente no se vuelve a restablecer.

Las rocas de este tipo son incomprensibles y sólo permiten el paso del agua cuando en ellas existen poros, grietas u otras cavidades.

Desde el punto de vista de la construcción subterránea, las propiedades de estas rocas que deben ser estudiadas en detalles son: su resistencia, su estoicidad o tesura y la presencia en las rocas de grietas, poros y vacíos.

Por resistencia de las rocas se entiende la propiedad que ellas poseen de poder asimilar sin destruirse, dentro de determinados límites y para condiciones específicas, la acción de fuerzas externas.

La resistencia de las rocas firmes y semifirmes se caracteriza por los límites de resistencia a la compresión, tracción, corte y flexión, expresada en kgf/cm^2 o MPa .

La mayor resistencia la poseen las rocas cristalinas formadas por granos finos y uniformes con poca porosidad (basaltos, cuarzo, etc.) en estado poco erosionado.

En las rocas multiminerales eruptivas y algunas metamórficas, los diferentes minerales que constituyen las rocas están directamente ligados entre sí por la fuerza de cohesión, siendo la fuerza de estos enlaces habitualmente mayor que la resistencia de los propios minerales.

El macizo de rocas fuertes posee superficies interiores de debilitamiento (estratificación, esquistocidad, etc.), además de grietas; por esta razón la resistencia de la roca en el macizo es menor que la de las muestras.

Si las superficies de debilitamiento se orientan en una determinada dirección, entonces las rocas en el macizo van a poseer propiedades mecánicas anisotrópicas, en tanto que si la superficie de debilitamiento no se orienta, o sea, se dispone en cualquier orden, las rocas van a poseer iguales características mecánicas en todas las direcciones, y se acercan a las características de los cuerpos isotrópicos.

Una característica de las rocas de ese tipo es el no poseer un valor constante del módulo de elasticidad, que va a variar según la magnitud de la presión a la cual se realiza la investigación.

Estas rocas pueden encontrarse en estado elástico, en estado plástico y en estado elástico-plástico; se considera en la actualidad este último como el más representativo.

En dependencia del carácter de aplicación de las cargas, las rocas pueden romperse como un cuerpo frágil o como uno plástico.

La resolución de una serie de tareas ligadas con la aparición de la presión minera, exige el conocimiento de las propiedades reológicas de las rocas, o sea, las propiedades que caracterizan su capacidad de deformación con el transcurso del tiempo.

Por estoicidad o tesura habitualmente se entiende la disminución con el transcurso del tiempo de la resistencia de la roca desnuda a causa de la acción sobre ella de la atmósfera subterránea, el agua, la erosión, etcétera.

Este aspecto habitualmente se caracteriza por el denominado coeficiente de tesura o estoicidad (K_t), el cual nos indica la disminución de la resistencia y se puede calcular por la expresión:

$$K = \frac{\sigma_c^f}{\sigma_c^o} \quad (1.1)$$

donde:

σ_c^f : resistencia lineal a compresión en un momento dado, MPa

σ_c^o : resistencia lineal a compresión en el momento inicial, o sea inmediatamente después de denudada la roca, MPa

En los trabajos subterráneos este parámetro es particularmente importante cuando la excavación se vaya a dejar sin fortificar o en los casos en que se fortifique, pero no se garantiza el aislamiento de la roca del ambiente subterráneo.

Las rocas fuertes y acuíferas, cuando poseen una alta porosidad, permiten el paso de gran cantidad de agua a la excavación.

El cierre de estos poros por medio de la inyección en el macizo rocoso de mezclas de cemento o de otros materiales, generalmente no se garantiza debido a sus pequeños diámetros. En tales situaciones es típico el empleo del método especial de laboreo con el congelamiento preliminar de las rocas.

Las rocas fuertes que más frecuentemente exigen el empleo de métodos especiales para el laboreo de excavaciones a través de ellas, son las areniscas, calizas y margas agrietadas que contengan un significativo contenido de agua.

En estos casos el método especial de laboreo que da mejores resultados, y por ende el que más se emplea para luchar contra la afluencia de agua a la excavación, es el método de taponamiento, el cual consiste en el llenado de los vacíos existentes en el macizo rocoso mediante el inyectado a presión, por taladros perforados para ese fin, de diferentes mezclas (cemento, arcilla, betumen y otros).

Como es conocido, la porosidad de las rocas fuertes depende de su estructura y también del grado de ligazón que exista entre sus granos componentes. La porosidad de las rocas fuertes varía en límites no muy amplios.

Por su parte el agrietamiento en las rocas fuertes cambia en amplios rangos, entre otras causas por afectaciones tectónicas de diferentes índoles y también por otras afectaciones (acción de la temperatura, del campo gravitacional, de la atmósfera, etc.)

Habitualmente las grandes grietas (de origen tectónico), son acompañadas por redes de grietas muy finas, lo cual en muchas ocasiones es la causa de la llegada de agua a la excavación.

Los factores que técnicamente caracterizan el agrietamiento del macizo son: densidad de la red de grietas, cantidad de sistemas principales de grieta y su orientación respectiva, grado de llenado de las grietas y características del material de relleno, así como las dimensiones de las grietas.

El grado de agrietamiento de un macizo rocoso acuífero se puede caracterizar por el coeficiente de filtración y el plano de hidroisótopos construido según las mediciones realizadas en los diferentes sectores.

Además del agrietamiento natural, durante el laboreo de las excavaciones puede tener un gran significado el agrietamiento producido por la deformación de la roca durante la realización de los diferentes trabajos.

Como un grupo especial se colocan las rocas cársticas. Los carsos se forman por la acción de las aguas subterráneas sobre las rocas propensas a diluirse, debido a lo cual en el macizo se forman vacíos que pueden alcanzar grandes dimensiones.

Las rocas más afectadas por esta acción son: la caliza, el yeso, la dolomita y la sal, entre otras.

El laboreo de excavaciones en rocas cársticas por el método habitual, como norma, es imposible debido a la gran cantidad de agua que afluye hacia la excavación. La elección del método especial a emplear en tales condiciones se debe hacer sobre la base de la comparación técnico-económica de las diferentes variantes que pueden ser empleadas.

1.2. ROCAS LIGADAS

Representantes de este tipo de roca son las arcillas, margas, carbón de piedra, turba, esquistos y otros. Estas rocas están compuestas por partículas cuyos diámetros oscilan desde 0,0001 a 0,05 mm. En las rocas arcillosas las dimensiones de las partículas son menores que 0,005.

Las rocas ligadas (arcillosas), en dependencia de su contenido de agua (agua libre) pueden encontrarse en los siguientes estados: sólido, plástico y fluido.

La ligazón en las rocas arcillosas se determina por las propiedades del agua y las propiedades coloidales del medio finamente disperso, lo que condiciona la interacción de las fuerzas eléctricas y moleculares entre las fases sólidas y líquidas. Debido a la tensión superficial, las moléculas de agua que rodea las partículas minerales de las rocas arcillosas húmedas se encuentran firmemente ligadas a dicha superficie. Estas moléculas forman el agua absorbida, cuyas distintas capas a su vez unen las moléculas de agua que forman el agua absorbida por afinidad.

Tanto el agua fuertemente ligada como el agua débilmente ligada, forman el agua de constitución. Generalmente, durante el estudio de las propiedades de las rocas arcillosas, por agua de constitución se entiende esencialmente el agua débilmente ligada.

El agua de constitución privada de movilidad recubre los poros pequeños y reduce los poros más amplios.

Esta última circunstancia conduce a la disminución de la permeabilidad de estas rocas. La disminución de la permeabilidad en las rocas arcillosas se produce también debido a la presencia en los poros de burbujas de gases.

En caso de poseer las rocas ligadas solamente el agua de constitución fuertemente ligada, ésta adquiere las propiedades de las rocas fuertes. Para las rocas ligadas es correcta la expresión:

$$\tau = C + \sigma_n \cdot \tan \rho = C + \sigma_n \cdot f_0 \quad (1.2)$$

donde:

- C: fuerza de cohesión entre las partículas de roca
- ρ : ángulo de fricción interna
- f_0 : coeficiente de fricción interna

Los ensayos realizados demuestran que la dependencia entre τ y σ_n para las rocas ligadas puede ser expresada por la siguiente curva.

Por plasticidad de las rocas se entiende la capacidad que ellas tienen de cambiar su forma por la acción de efectos exteriores, sin la pérdida del enlace entre las partículas componentes y sin la variación de su volumen, pero conservando la nueva forma adquirida aun después que cesa la causa que la deformó. La plasticidad de la roca depende de una serie de factores, siendo los principales:

- Forma y características de las partes sólidas componentes de la roca.
- Dimensiones de las partículas componentes.
- Composición mineralógica de la roca.
- Cantidad de agua que ella contiene.

Las propiedades plásticas de las rocas habitualmente se caracterizan por los límites superiores e inferiores de plasticidad y el número de plasticidad. Estas características plásticas de las rocas habitualmente se determinan en trabajos de laboratorio.

Cuando este tipo de roca se encuentra saturada puede perder el enlace entre partículas y se hace inestable, pudiendo incluso llegar a hacerse fluida.

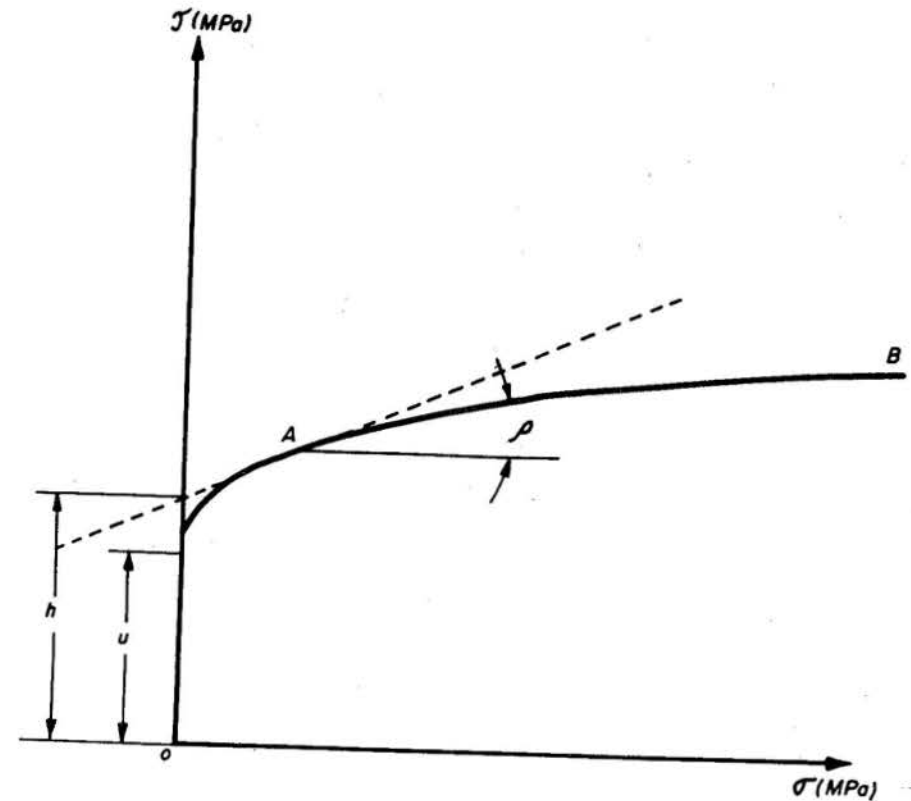


FIGURA I.1. Diagrama de dependencia σ, τ para las rocas ligadas.

I.3. ROCAS DESLIGADAS

A diferencia de las rocas ligadas, en las cuales existía una gran cohesión entre las partículas, en las rocas desligadas esto no se observa, sino que este tipo de roca se caracteriza por la acumulación de partículas minerales entre las cuales la fuerza de cohesión es muy pequeña. Este tipo de roca conserva su forma debido al peso de las partículas componentes y a la fuerza de fricción entre dichas partículas.

En el estado de reposo natural, el material no ligado, por ejemplo, la arena, toma forma de cono. Este cono forma con el plano horizontal un ángulo α_0 , el cual no excede del valor de α (ángulo de reposo natural). La magnitud del ángulo de reposo natural α determina el equilibrio límite de

las partículas del material no ligado en su superficie. En el estado límite de equilibrio, la componente tangencial del peso del material no ligado será:

$$\tau = G \operatorname{sen} \alpha \quad (1.3)$$

la cual se iguala a la fuerza de fricción:

$$F = f_1 G \cos \alpha \quad (1.4)$$

Por lo que podemos escribir que:

$$G \operatorname{sen} \alpha = f_1 G \cos \alpha \quad (1.5)$$

Se conoce que:

$$f_1 = \tan \alpha \quad (1.6)$$

donde:

f_1 : coeficiente de fricción al deslizamiento

Para el momento de equilibrio límite, el coeficiente de fricción al deslizamiento f_1 se identifica con el coeficiente de fricción interna f_0 , y el ángulo de reposo natural se puede equiparar con el ángulo de fricción interna ρ . Es necesario señalar que lo anteriormente expuesto no es exacto, ya que el ángulo α para un estado dado del material no ligado es constante, en tanto que el ángulo ρ va a depender de la magnitud de presión normal.

La magnitud de la tensión crítica al corte se determina por la siguiente fórmula:

$$\tau = \tau_1 + f_0 \cdot \sigma_n \quad (1.7)$$

donde:

τ_1 : resistencia al corte debida a la cohesión

f_0 : resistencia al corte debida a la fricción

Como ya se dijo anteriormente, en este tipo de roca la cohesión es muy pequeña y en muchos casos se puede considerar nula; entonces tendremos:

$$\tau = f_0 \sigma_n \quad (1.8)$$

Para este caso el diagrama de dependencia τ -tau es lineal (ver Fig. 1.2).

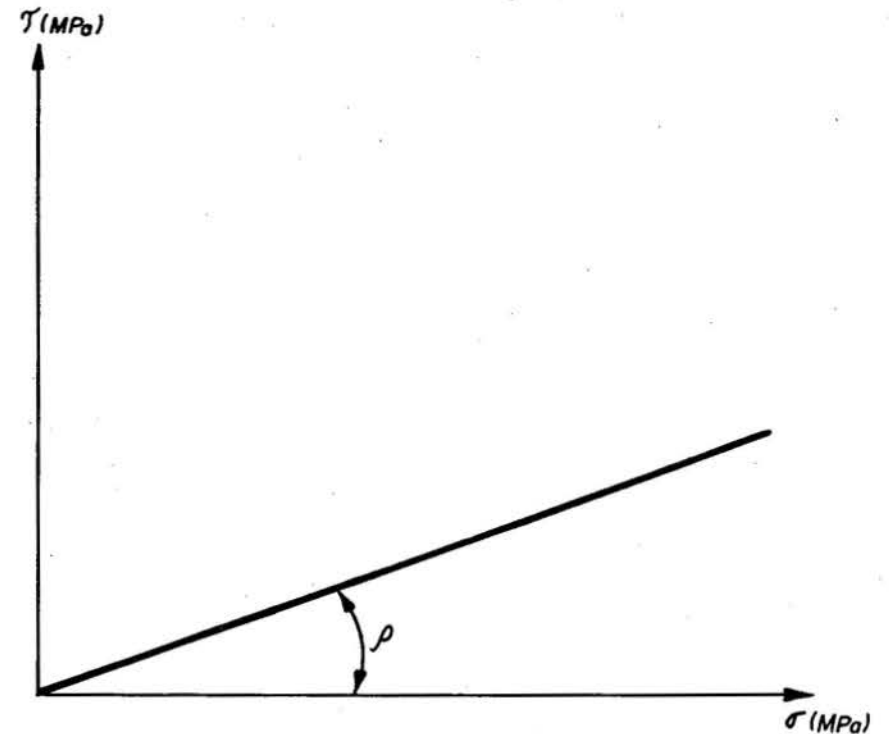


FIGURA 1.2. Diagrama de dependencia σ, τ para las rocas totalmente desligadas.

1.4. ROCAS MOVEDIZAS

Durante los trabajos de construcción subterránea, habitualmente se diferencia este tipo de rocas por las características que ella posee, las cuales dificultan en gran medida el laboreo de las excavaciones.

Las rocas movedizas son aquellas formadas por una fase sólida y otra líquida y poseen la propiedad de movimiento.

La fase sólida de las rocas movedizas la integran pedazos muy finos de arena (partículas de 0,2-0,1 mm) y partículas arcillosas (dimensiones de 0,01-0,001), mientras que la fase líquida la forma el agua, la cual contiene partículas pequeñísimas, menores que 0,005 mm, las cuales no pueden precipitar debido a su poco peso. Las partículas en suspensión que rodean a las partículas de agua de combinación aumentan la densidad y el peso de la fase líquida.

La movilidad de las rocas movedizas produce el empuje del agua, lo cual hace posible el movimiento de la fase líquida. Con la correspondiente magnitud del empuje del agua, producida por las causas ya vistas y las presiones dinámicas, que surgen como resultado de la acción de la fase líquida sobre la sólida, la estabilidad general del sistema se rompe.

Los terrenos movedizos se pueden dividir en dos grupos: no desecables (terrenos movedizos típicos) y desecables (seudomovedizos). Los primeros contienen partículas arcillosas y coloidales además de agua combinada, en tanto que los segundos se forman por la mezcla de arena homogénea sin partículas arcillosas, y es por esto que fácilmente se pueden secar, aumentando su estabilidad.

Según los experimentos realizados se ha establecido que los terrenos movedizos típicos, o sea, los no secables, poseen las llamadas propiedades tixotrópicas, es decir, tienen la capacidad de diluirse bajo la acción de acciones mecánicas y pasan de un estado gelatinoso a sales y suspensiones. Es por esto que los terrenos movedizos bajo la acción súbita de las acciones dinámicas que aparecen con la transformación tixotrópica, se transforman rápidamente en estados fluidos.

Durante la ejecución de los trabajos mineros, y la extracción de minerales, la presencia de este tipo de roca produce grandes dificultades y generalmente, por no decir siempre, es necesario emplear métodos especiales de laboreo.

1.5. INVESTIGACIONES INGENIERO-GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS IMPRESCINDIBLES CUANDO SE VA A EMPLEAR UN MÉTODO ESPECIAL DE LABOREO

El laboreo de pozos en condiciones ingeniero-geológicas difíciles debe ser antecedido por investigaciones ingeniero-geológicas especiales complementarias, las cuales habitualmente se pueden realizar en paralelo con los trabajos de proyecto.

Estas investigaciones complementarias se deben realizar debido fundamentalmente a que cada método especial de laboreo exige datos muy concretos que muchas veces no son determinados, o lo son en forma insuficiente, en los estudios hidrogeológicos e ingeniero-geológicos habituales.

Esto ocurre porque no es posible desde un inicio determinar qué método especial se debe emplear (en ocasiones incluso no está claro la necesidad de su empleo) y por ende no se pueden establecer en forma concreta las necesidades de datos ingeniero-geológicos.

Por otra parte, realizar una investigación que satisfaga las particularidades de un grupo de métodos especiales (los más probables) no es conveniente (en particular por el aspecto económico).

Estos estudios complementarios, además de precisar el corte geológico, contenido de agua y otros parámetros, pueden provocar la detección o la verificación de la ubicación tanto de los lugares más desfavorables, como los más favorables para la ubicación del pozo. Esto, dentro de la complejidad de la situación, da la posibilidad de elegir el sitio menos desfavorable.

Las cuestiones generales para cualquier método especial de laboreo que deben ser precisadas o determinadas por las investigaciones ingeniero-geólogo-hidrogeológicas son:

- La potencia de cada capa de roca con la elaboración del corte geológico detallado.
- Cantidad y potencia de los horizontes acuíferos.
- Temperatura y composición química de las aguas subterráneas.
- Nivel de las aguas subterráneas y su empuje.
- Velocidad y dirección en que se mueven las aguas subterráneas.
- Coeficiente de filtración de las rocas.
- Características y condiciones de yacencia de las capas impermeables de roca (potencia, grado de agrietamiento, ángulo de buzamiento, etc.)

Las específicas para cada método en forma muy general se ven a continuación:

Cuando se emplean los métodos de la fortificación de hincado, de la fortificación de descenso y el de perforación, la investigación ingeniero-geológica debe precisar si se presentan o no en las zonas de rocas débiles acuíferas inclusiones de roca dura o intercalaciones de rocas fuertes.

Cuando se emplea el método de fortalecimiento químico es necesario determinar en detalle la composición mineralógica y granulométrica de la roca que va a ser fortalecida.

Para el caso que se emplee el método de congelación del macizo mediante las investigaciones ingeniero-geológicas complementarias deben ser precisados los siguientes aspectos: masa volumétrica y densidad de la roca, su composición granulométrica, así como datos sobre las características plásticas de las rocas.

Con los trabajos ingeniero-geológicos especiales deben determinarse el grado de agrietamiento del macizo, el carácter y dimensiones de las grietas y también el grado y material de relleno de estas grietas, si el método a emplear es el de taponamiento.

CAPITULO II

LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE LA FORTIFICACION DE HINCADO

Este método se emplea durante el laboreo de pozos que deban atravesar capas de rocas débiles, acuíferas e inestables y de terrenos movedizos.

La esencia de este método consiste en que el avance de la excavación en tales sectores se realiza bajo la protección de una fortificación, que se hincan en la roca inestable a toda su profundidad y por todo el contorno de la sección de la excavación.

La fortificación de hincado puede hacerse de madera o de metal.

II.1. HINCADO DE MADERA

La fortificación de hincado de madera es uno de los métodos especiales más antiguamente utilizado para el laboreo de excavaciones subterráneas en rocas débiles, acuíferas e inestables y en terrenos movedizos. La existencia hoy en día de otros métodos especiales mucho más ventajosos y progresivos ha reducido en gran medida el empleo de este método, limitándolo al laboreo de excavaciones de exploración y de otras excavaciones auxiliares.

Para la construcción de esta fortificación de hincado, se deben emplear tablas lisas y húmedas, ya que si se utilizan tablas secas, al mojarse éstas, por la acción de las aguas subterráneas, se afecta la impermeabilidad y resistencia de la fortificación de hincado.

Durante el hincado, los elementos (tablas) que conforman la fortificación de hincado se colocan por el contorno del pozo, se unen sólidamente entre sí y se van hincando uniformemente. Para facilitar el proceso de hincado, a la parte inferior de estos elementos se le hace un corte y se coloca en ella una especie de zapato metálico, lo cual además lo protege en caso de encontrarse con una roca fuerte (ver

Fig. II.1). En ocasiones en la parte superior del elemento de hincado se coloca un cabezal metálico.

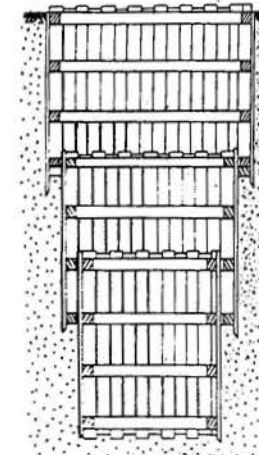


FIGURA II.1. Vista de un elemento de la fortificación de hincado.

Los elementos de esta fortificación se pueden hincar en forma vertical o formando un ángulo con respecto a la horizontal de 70 a 75° , recibiendo en tales casos los nombres de hincado vertical e hincado oblicuo, respectivamente.

Hincado vertical

Los elementos de esta fortificación se hacen de tablas con un espesor de 50 a 100 mm y un ancho de 150 a 200 mm. En dependencia de la forma en que se va a realizar el hincado y de la potencia de la zona de terreno inestable, el largo de ellos se toma de $2,0$ a $6,0$ m.

Cuando se emplea este método, el pozo se comienza a laborear por los métodos habituales hasta llegar a una distancia de $0,5$ a $0,8$ m de la zona de terreno que requiere el empleo del método especial; en este momento se detienen los trabajos de avance y se construye un cuadro de fortificación. En la capa de roca que se dejó sin arrancar (de $0,5$ a $0,8$ m de potencia) se sitúan 2 anillos guías concéntricos hechos de perfiles metálicos. El anillo interior debe tener un diámetro interior igual al diámetro de laboreo que se le quiere dar al pozo, en tanto que el diámetro interior del anillo guía externo debe ser igual al diámetro exterior del anillo interno, más dos veces el espesor de los elementos de hincado.

Los anillos guías se centran con ayuda de una plomada que se coloca por el centro del pozo y su horizontabilidad se comprueba con niveles.

En el espacio comprendido entre los anillos se colocan los elementos de la fortificación de hincado los cuales se hincan hasta una profundidad de 0,5 a 0,7 m, después de lo cual del frente del pozo se extrae la roca, volviéndose a colocar anillos guías cuya función es prevenir el desvío de los elementos del hincado. Se recomienda que el arranque de la roca del frente del pozo se detenga un poco antes de llegar al extremo inferior de la fortificación de hincado.

Cuando la potencia de terreno débil acuífero o movedizo sea grande puede ser necesario el empleo de dos o más secciones de hincado; en estos casos se procede de la siguiente forma: un poco por arriba del extremo inferior del primer sector de hincado se coloca un anillo guía, tratándose de comprimir las partes inferiores de los elementos de hincado ya colocados hacia las cuñas de madera (ubicadas entre el anillo exterior y los elementos de hincado). En el espacio obtenido de este proceso se colocan los elementos de hincado del segundo sector, y la operación de hincado se repite (ver Fig. II.3).

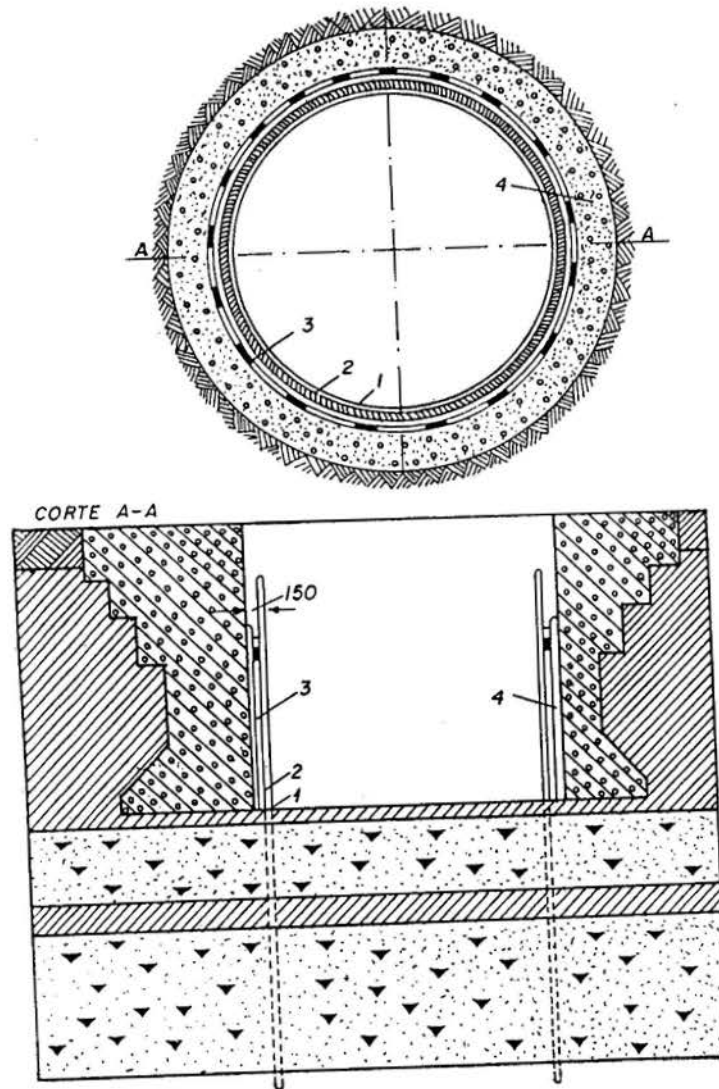


FIGURA II.2. Esquema de instalación del hincado vertical. 1 - anillo guía interior. 2 - anillo guía exterior. 3 - elementos del hincado. 4 - fortificación de la boca del pozo.

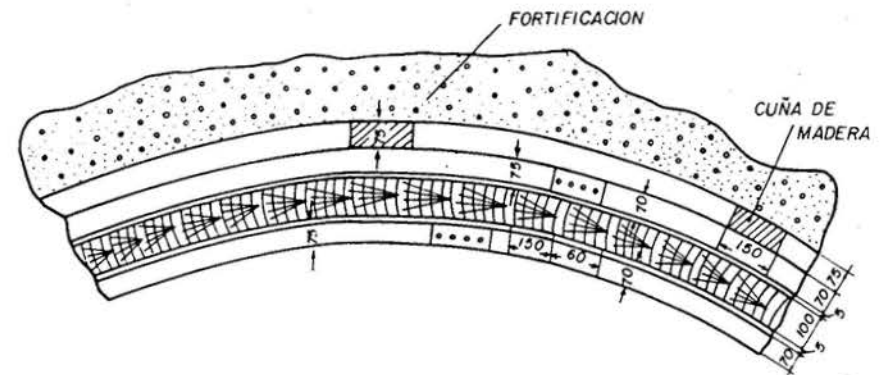


FIGURA II.3. Detalles de la instalación del hincado vertical de madera.

Durante el laboreo de pozos de sección rectangular con el empleo de la fortificación de hincado, en lugar de los anillos de dirección metálicos se emplean cuadros guías de madera.

El método estudiado posee una gran desventaja consistente en la disminución que va a ir experimentando la sección del pozo cada vez que sea necesario colocar un nuevo sector de hincado (de 0,4 a 0,6 m por cada sector) (ver Fig. II.4).

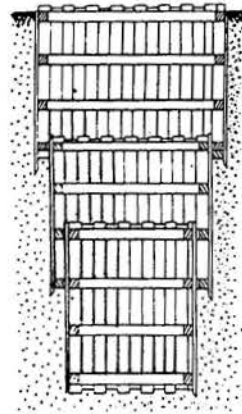


FIGURA II.4. Disminución de la sección transversal del pozo cuando se emplea el hincado vertical.

Cuando se emplea este método, el diámetro inicial que se le da al pozo debe calcularse teniendo en cuenta este factor, lo cual conduce a la necesidad de darle al pozo unas dimensiones iniciales mayores que las que realmente necesita y que obligan al empleo de un mayor arranque de roca y un aumento de los costos del trabajo.

La fortificación de hincado vertical se emplea preferentemente cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Para el caso en que la potencia de la capa de terreno débil acuífero o movedizo no sea significativa (de 3 a 4,0 m), ya que con esto es posible el empleo de un solo sector de hincado.
- Cuando la capa de terreno débil-acuífero esté ubicada a una profundidad que no exceda de 12 a 15 m .
- Cuando el empuje hidrostático de las aguas subterráneas no exceda de los 2,5 m .

La velocidad de laboreo de los pozos en las zonas en que se emplea el hincado vertical no llega a los 4 m/mes .

Hincado oblicuo

La diferencia entre esta forma de hincado y la vertical es que los elementos de hincado en este caso no se sitúan verticalmente, sino inclinados con un ángulo de 70 a 75° con respecto a la horizontal, y por

esta razón no se produce la disminución de la sección del pozo en caso de usarse varios sectores de hincado (ver Fig. II.5).

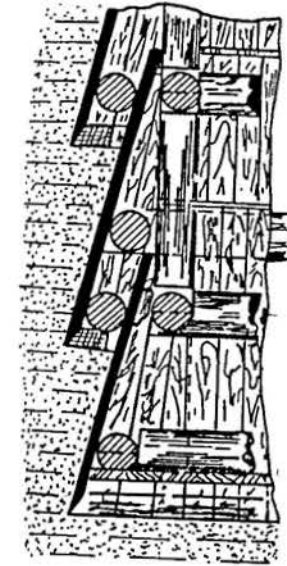


FIGURA II.5. Vista de una fortificación de hincado oblicua.

El orden de realización de los trabajos en este caso es el mismo, sólo que aquí se requiere un largo mayor de las vigas intermedias debido a la inclinación de los elementos que se hincan.

Las exigencias a la madera usada son idénticas al caso anterior. En este tipo de hincado se emplean tablas de 1,2 a 1,6 m de longitud, de 50 a 75 cm de espesor y con un ancho se rompen más fácilmente.

A la parte inferior de los elementos de hincado se le hace un corte con el objetivo de facilitar su penetración en el terreno.

En ocasiones se les coloca una especie de zapato metálico con su extremo afilado para facilitar aún más este proceso de penetración en el terreno.

Durante el laboreo con el hincado oblicuo lo más difícil es cerrar el paso al terreno débil-acuífero o movedizo en los ángulos del pozo, ya que debido a la inclinación de los elementos de hincado en la parte inferior de ellos se producen aberturas (ver Fig. II.6).

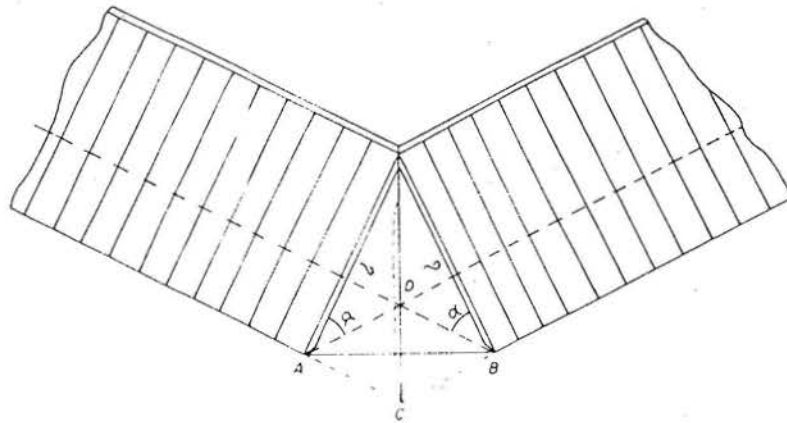


FIGURA II.6. Desviación de los elementos de hincado oblicuo.

Si designamos por l la longitud del elemento de hincado y por α al ángulo de inclinación de éste respecto a la horizontal, entonces la magnitud de la desviación de la parte inferior de los elementos de hincado o la abertura que se forma en cada lado será igual a: (ver Fig. II.6)

$$AC = DB = l \cos \alpha \quad (II.1)$$

$$CB = AD = l \cos \alpha \quad (II.2)$$

o sea,

$$AC = CB \quad (II.3)$$

La magnitud total de la abertura al unirse 2 anillos de elementos de hincado será igual a AB . Su valor se puede calcular por la relación:

$$AB = \sqrt{2} AC = \sqrt{2} \cdot l \cdot \cos \alpha \quad (II.4)$$

Para el caso promedio en que el elemento de hincado tenga 1,5 m de largo y el valor del ángulo α de inclinación sea de 75° , se obtendrá que:

$$AB = \sqrt{2} \cdot 1,5 \cdot 0,36$$

$$AB \approx 0,5 \text{ m}$$

Para eliminar esta deficiencia, a los elementos de hincado que se vayan a ubicar en las uniones de anillos o en los angulares del pozo, se les

da una forma de trapecio con su base mayor en su extremo inferior. Con el objetivo de que la hermeticidad que se alcance sea la mejor, no sólo se le da esta forma al último elemento de cada anillo sino a los 2 o 3 últimos (ver Fig. II.7).

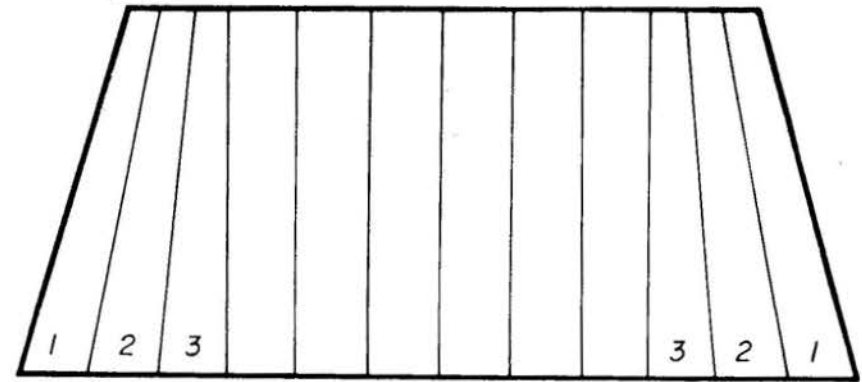


FIGURA II.7. Esquema de la forma de los elementos del hincado oblicuo.

La velocidad de laboreo alcanzada con el empleo del hincado oblicuo oscila de 1,5 a 2,5 m/mes.

(II.1) El hincado de madera no se recomienda emplear en caso de existir inclusiones de roca dura en las zonas de terreno inestable o movedizo.

(II.2) Este método tampoco se recomienda en caso de que el laboreo de excavación se realice a través de rocas que presenten dificultad para liberar el agua que contienen.

(II.3) Como desventajas esenciales del método tenemos:

- Su baja velocidad de laboreo.
- Lo dificultoso de su realización.
- Dificultad en el mantenimiento de la verticalidad del pozo.

II.2. HINCADO METALICO

El hincado metálico posee una serie de ventajas en comparación con el de madera, las que se enumeran:

- Posee una mayor resistencia mecánica y una mayor estabilidad durante el hincado, lo cual hace la construcción más confiable y posibilita que ella puede poseer una mayor longitud, y por ende, atravesar una capa de roca inestable de mayor potencia (hasta de 10,0-12,0 m).

- Los elementos de la fortificación poseen una mejor unión entre ellos, lo que conlleva a una mayor impermeabilidad de la construcción.
- Son capaces de vencer una mayor resistencia de la roca durante el hincado sin sufrir daño.

El hincado metálico se recomienda usar en pozos de sección circular, porque en estas condiciones los elementos del hincado resisten mejor la presión lateral que cuando la sección del pozo es rectangular, ya que en dicho caso todos los elementos trabajan en iguales condiciones. Esto no sucede cuando la sección es rectangular, pues entonces se hace necesario usar elementos diferentes en los extremos de cada lado (de forma trapezoidal).

Como elementos de hincado se pueden emplear diferentes tipos de perfiles metálicos, debiéndose tener en cuenta los siguientes factores a la hora de su elección:

- El momento de resistencia y el momento de inercia de los elementos de hincado. El primero determina la resistencia del hincado, en tanto que el segundo factor, su rigidez. A medida que el momento de inercia sea mayor, menor será la probabilidad de flexión en los elementos del hincado a causa de las acciones que sobre él actúen. La flexión de los elementos del hincado puede conducir a las siguientes afectaciones: disminución de la sección del pozo, acúñamiento de los elementos de hincado y en ocasiones la ruptura de estos elementos.
- Las dimensiones de los elementos de hincado, en particular su espesor, determinan las dimensiones iniciales del pozo y por ende, a medida que dichos elementos sean más gruesos, mayor será la sección inicial del pozo y en consecuencia mayor será el volumen superficial de roca a arrancar.
- La construcción de las uniones entre los elementos de hincado debe ser impermeable, resistente y permitir un cierto giro de dichos elementos en el plano vertical, con el objetivo de que se puedan conformar la fortificación de hincado de la forma requerida (circular, elíptica, etc.).
- El peso de los elementos de hincado debe ser lo menor posible debido a que su costo aumenta con su peso.

Como un indicador económico en el uso de los diferentes perfiles en los elementos de hincado metálico, sirve la relación existente entre el momento de resistencia W y el peso G de un metro de dichos elementos. A medida que esta relación W/G sea mayor se obtiene una mejor utilización del metal. Por el contrario, cuando esta relación disminuye indica que la forma de perfil utilizado no es la idónea.

Para los perfiles metálicos de forma plana (ver Fig.II.8) este indicador económico se comporta de la siguiente forma. Ellos se caracterizan por tener relativamente un alto peso, de 20 a 60 kg por metro y un bajo momento de resistencia, de 20 a 300 cm^3 , lo que conduce a que la relación W/G de ellos oscile de 1 a 5.

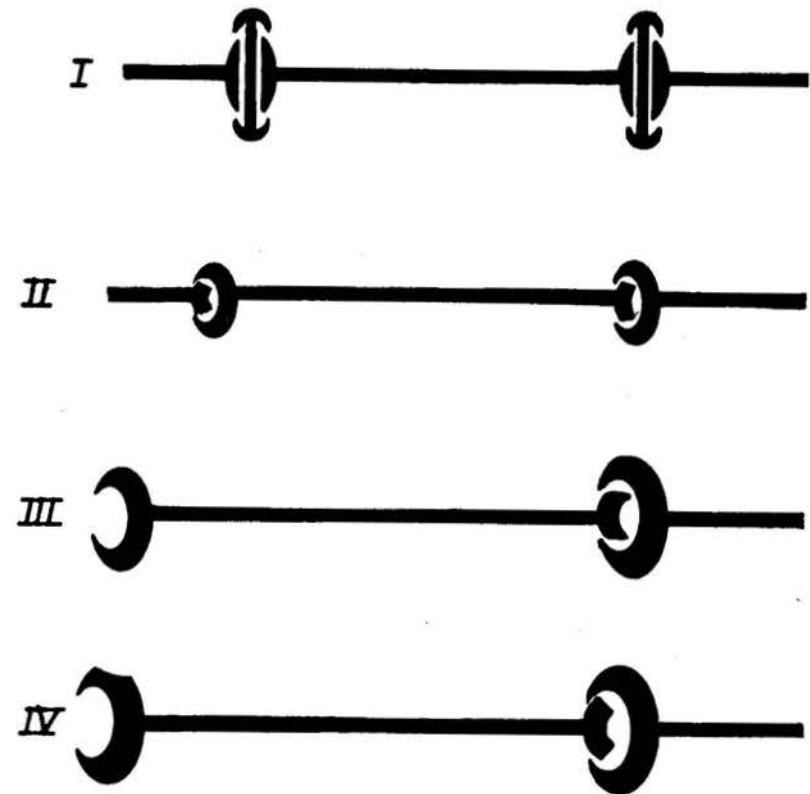


FIGURA II.8. Elementos de hincado de forma plana.

Los perfiles metálicos en forma de caja (ver Fig. II.9) poseen un alto valor del momento de resistencia de 300 - 1 500 cm^3 y un alto peso de 40 a 107 kg por metro o sea se obtiene una relación W/G de 7 a 15.

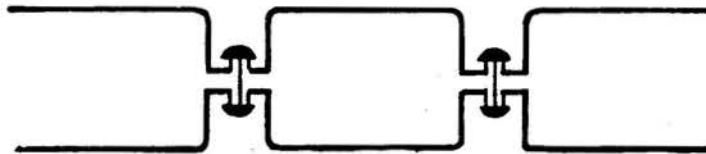
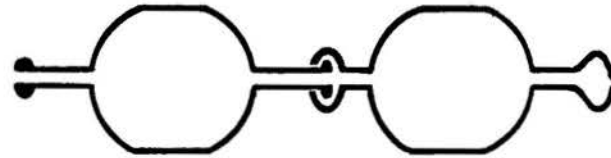
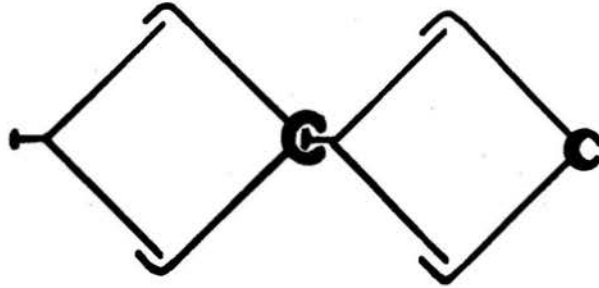


FIGURA II.9. Perfiles metálicos en forma de caja usadas en el hincado.

Los perfiles tubulares poseen también un bajo valor de la relación $W/G \approx 1,5$ a 2.

Los perfiles acanalados (Fig.II.10) poseen un peso por metro de elemento de 30 a 100 kg y un momento de resistencia de 90 a 900 cm^3 , lo que da un valor de la relación W/G de 3 a 14.

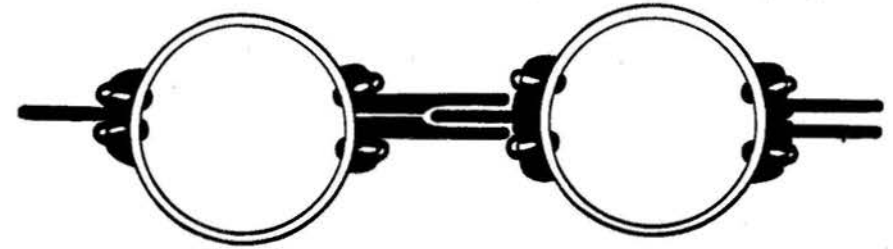


FIGURA II.10. Perfiles metálicos acanalados usados en el hincado.

Estos perfiles, debido a su fácil construcción son muy usados en la industria constructiva.

Cuando la zona de roca inestable o terreno movedizo se encuentra cercana a la superficie del hincado se realiza desde ella, en tanto que cuando la zona de roca inestable se encuentra situada a una determinada profundidad inicialmente se construye la boca del pozo y se inicia el laboreo de éste por los métodos habituales. Después de esto en el frente se hace una almohada de hormigón de 10 a 15 cm de espesor sobre la cual se montan los anillos o cuadros guías (exteriores e inferiores). La distancia entre estas guías debe ser tal que permita la colocación del hincado de mayor espesor (habitualmente oscila entre 250 y 300 mm).

El diámetro de laboreo del pozo en la zona de empleo de la fortificación de hincado se puede determinar por la expresión:

$$D_1 = D_u + 2 (E_f + E_h + E_g + E_v) \quad (II.5)$$

donde:

D_u : diámetro útil del pozo según el proyecto

E_f : espesor de la fortificación del pozo, m

E_h : espesor del hincado

E_g : espesor del anillo o cuadro

E_v : espesor de las vigas que se fijan a la estructura

El hincado de los elementos metálicos en la actualidad se realiza utilizando vibradores o martillos de vibración, ya que con esto se aligera su penetración en la roca.

La velocidad de hincado se puede aumentar cuando unido a lo anterior se inyecta agua, lo cual facilita el proceso.

Se conocen dos esquemas para realizar el hincado de los elementos metálicos; con el contorno cerrado y con el contorno sin cerrar.

En el primer caso se realiza un hincado uniforme y sucesivo de todos los elementos cada vez a una pequeña profundidad (0,5 a 1,0 m) hasta alcanzar la profundidad deseada. Con esto se garantiza una buena hermeticidad de la fortificación de hincado y la penetración de ella hasta la profundidad proyectada. Este esquema tiene como desventaja la baja velocidad en los trabajos.

El segundo esquema (con el contorno sin cerrar) permite una mayor velocidad en los trabajos, pero no se logra una alta hermeticidad y el hincado puede desviarse de la vertical. En este esquema cada elemento del hincado se coloca de una vez a toda su profundidad.

En la práctica frecuentemente se emplea el primer esquema.

CAPITULO III

LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE CONSTRUCCIONES DE DESCENSO

Las construcciones de descenso se pueden clasificar según sus características constructivas y tecnológicas en tres grupos:

1er grupo: Fortificación telescópica de descenso para la que es válida la siguiente expresión: (ver Fig. III.1)

$$D_{FD} = D_B - 2 (\delta_f + \delta_c), m \quad (III.1)$$

donde:

D_{FD} : diámetro exterior de la fortificación de descenso, m

D_B : diámetro exterior de la fortificación de la boca del pozo, m

δ_f : espesor de la fortificación, m

δ_c : holgura constructiva, m

Cuando se emplea una fortificación de este tipo que conste de varios sectores, como es lógico el diámetro de dichos sectores va ir disminuyendo.

El diámetro exterior del sector final de la fortificación de descenso se puede encontrar por la expresión

$$D_{DF} = D_B - 2 [(\delta_{f1} + \delta_{c1}) + (\delta_{f2} + \delta_{c2}) + (\delta_{fn} + \delta_{cn})] \quad (III.2)$$

Siendo n el número de sectores de que consta la fortificación.

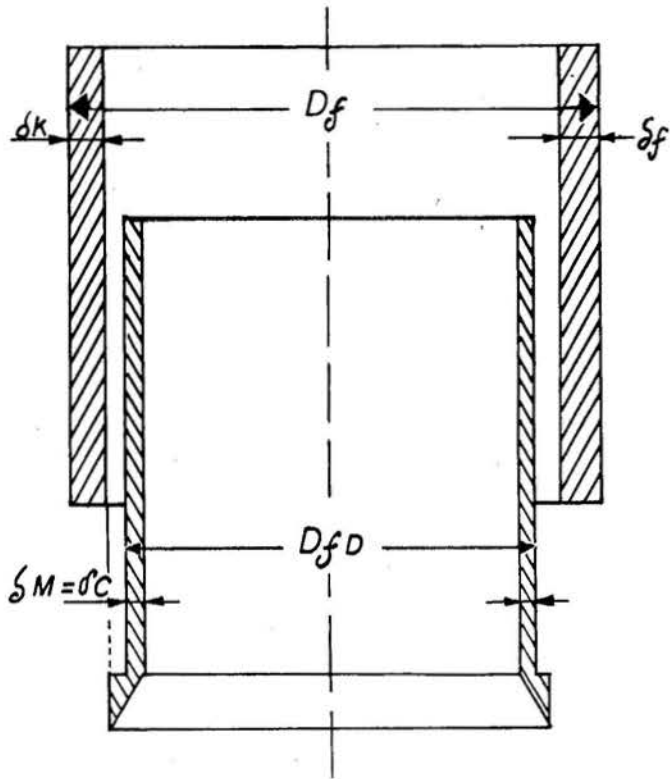


FIGURA III.1. Fortificación telescópica de descenso. $D_f > D_{fD}$, δ_c - holgura constructiva, δ_M - holgura de maniobra.

La condición de empleo de esta fortificación viene dada por la expresión

$$D_{fD} < D_B \quad (III.3)$$

2do grupo: Fortificación de descenso en la que el diámetro exterior de ella D_{fD} sea igual al diámetro exterior de la fortificación del pozo D_p (ver Fig.III.2).

En este caso la boca del pozo habitualmente no se hace como tal.

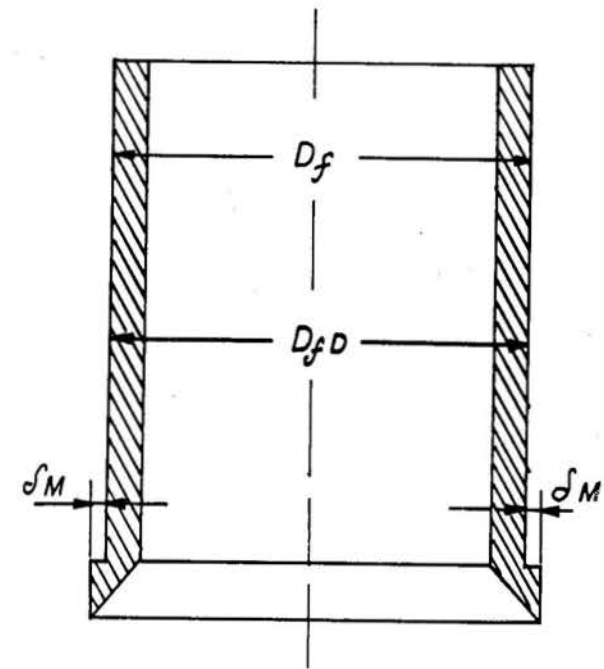


FIGURA III.2. Fortificación de descenso. $D_f = D_{fD}$

Esta variante para el laboreo de pozos no se utiliza, por lo que en lo adelante cuando se hable de fortificación de descenso se hará referencia a la telescópica.

3er grupo: Escudos verticales. El diámetro exterior de estos escudos D_E es mayor que el diámetro exterior de la fortificación del pozo D_p ($D_E > D_p$) (ver Fig.III.3).

El diámetro del escudo se puede hallar por la expresión

$$D_E = D_p + Z (\delta_c + \delta_e), \quad m \quad (III.4)$$

donde:

δ_e : espesor del escudo, m

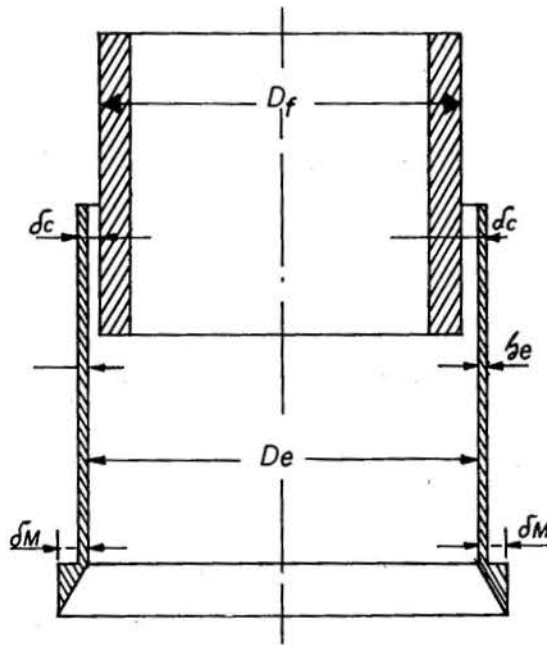


FIGURA III.3. Escudo vertical. $D < D_f, D$

III.1. LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE LA FORTIFICACION DE DESCENSO

La fortificación de descenso no es más que una fortificación (hecha de hormigón, piedra, metal u otros materiales) que desciende a través de una zona de roca inestable acufera o de terreno movedizo (gracias a su propio peso o con la ayuda de una carga exterior) hasta atravesarla completamente y penetrar en una zona de terreno impermeable (ver Fig. III.4).

Este método es recomendable bajo las siguientes condiciones:

- Cuando la potencia de la zona de roca inestable acufera sea inferior a 10 m.
 - Cuando el empuje de las aguas subterráneas en el sector de trabajo sea inferior a 10 m de la columna de agua.
 - Cuando exista por debajo de esta zona de roca acufera inestable una capa de roca impermeable de por lo menos 3 m de espesor en la que puede introducirse la zapata de la fortificación de descenso.
- Para el caso que no existan cantos rodados ni inclusiones duras mayores de 10 cm, en la zona de roca que se requiere fortificar.

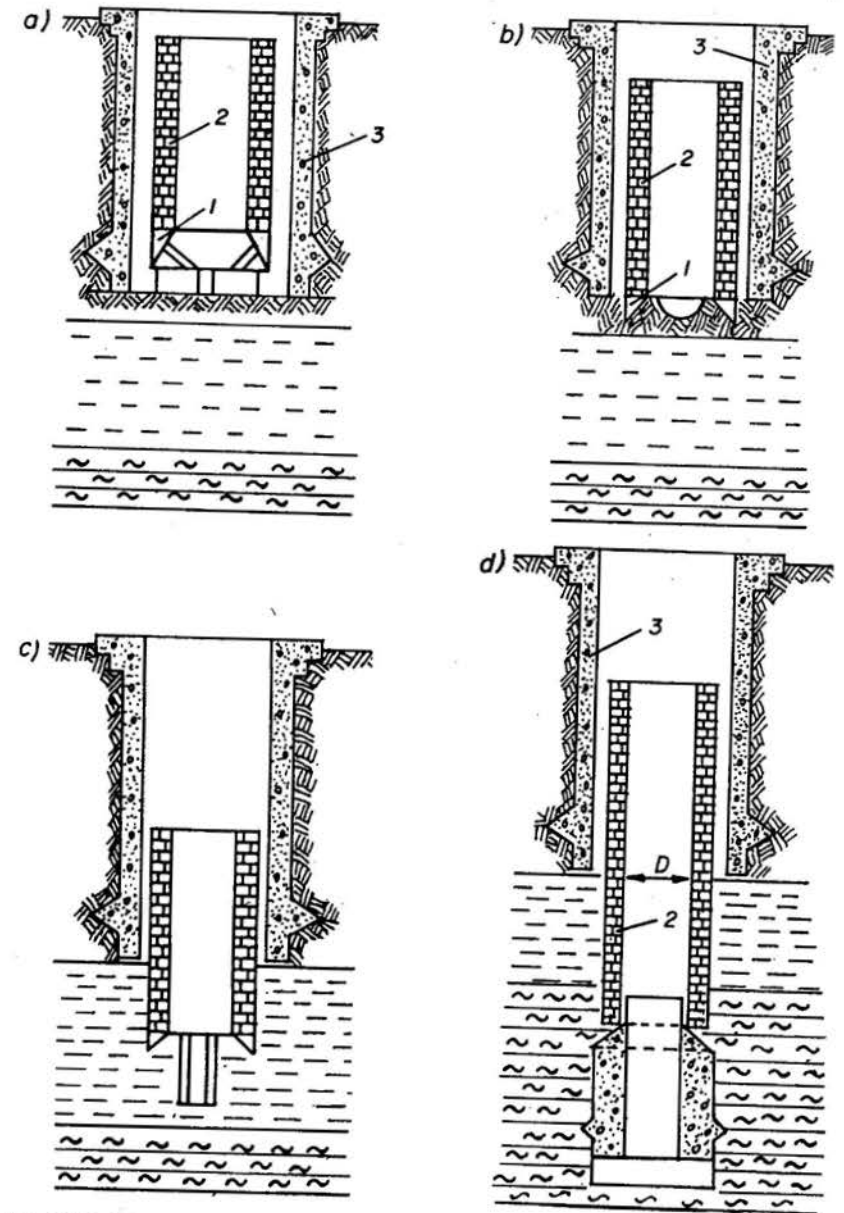


FIGURA III.4. Esquema de construcción de la fortificación de descenso; a, b, c y d - etapas del proceso de colocación de la fortificación de descenso; 1 - zapata, 2 - pared de la fortificación de descenso, 3 - fortificación de la boca del pozo.

- Cuando el ángulo de inclinación con respecto al horizonte de la zona de roca inestable no exceda de 15-18°.
- La fortificación de descenso puede ser circular elíptica y rectangular, siendo la más difundida la de forma circular.

Partes de que consta la fortificación de descenso

Esta fortificación consta de la pared y de la zapata cortante (ver Fig. III.5).

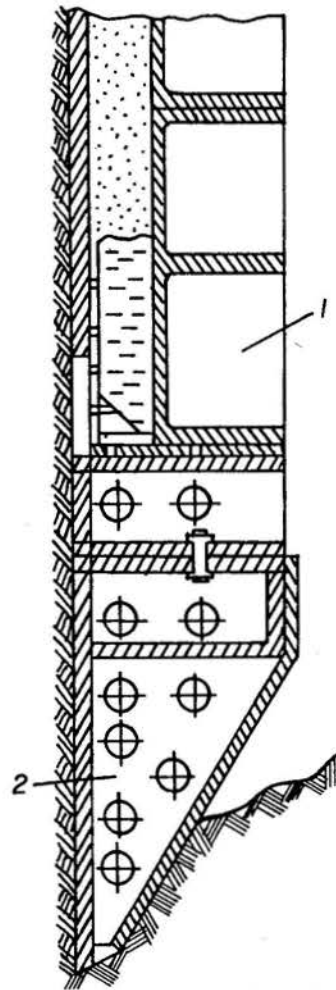


FIGURA III.5. Partes constituyentes de la fortificación de descenso. 1 - pared, 2 - zapata.

La zapata cortante sirve para aligerar el proceso de penetración de la fortificación de descenso a través del terreno. Habitualmente esta zapata se hace de hierro o de hormigón armado.

Con respecto a las paredes ellas pueden ser de hormigón, ladrillo, piedras de hormigón, hormigón armado y de metal.

La elección del material con que se hace la pared de la fortificación de descenso depende fundamentalmente de las condiciones naturales. De tal forma tenemos que cuando la profundidad de hundimiento es pequeña es recomendable usar paredes con un gran peso (de hormigón, piedra o ladrillo) con lo que se puede garantizar su hundimiento sin necesidad de emplear cargas adicionales. En los casos en que la profundidad necesaria de hundimiento sea grande (capas potentes de rocas acuíferas-inestables) y se haga necesario utilizar de todas formas cargas adicionales, se recomienda hacer las paredes de esta fortificación de hormigón armado o metal.

La fortificación metálica de descenso posee las siguientes ventajas:

- Con menor espesor de sus paredes garantiza igual resistencia, lo que posibilita hacer un pozo de menor diámetro con las ventajas que esto conlleva.
- Esta fortificación posee una alta rigidez y estabilidad, por lo que las probabilidades de que ella durante su descenso se desvíe de la vertical son menores que en otros tipos de fortificación.
- Con su empleo se alcanza una buena hermeticidad en el interior del pozo.

Como desventajas de la fortificación de descenso metálica tenemos su alto costo (es dos o tres veces superior a la de hormigón) y el consumo de metal.

Por estas desventajas es que en muchas ocasiones se le da preferencia al uso de la fortificación de descenso hecha de hormigón para el laboreo de zonas de rocas acuíferas-inestables de no más de 20 m de potencia.

Para potencias de estas zonas mayores de 20 m aumenta en forma significativa la fricción de las paredes de la fortificación con la roca durante su descenso, lo cual disminuye la velocidad de este proceso; en tales casos no es recomendable utilizar cargas adicionales muy grandes, ya que esto puede traer consigo la afectación de la fortificación.

Dimensiones de la fortificación de descenso

Como dimensiones a determinar a la hora de proyectar una fortificación de descenso, tenemos:

- Su altura.
- El diámetro interior que esta fortificación debe tener.
- El espesor de la pared.

La altura de la fortificación de descenso H_{FD} se puede calcular por la expresión

$$H_{FD} = h + v, m \quad (III.5)$$

siendo:

h : la potencia de la zona de roca acuífera-inestable que requiere del uso de este método

v : es un parámetro cuya magnitud se toma igual a la suma de lo que se hunde la zapata en el terreno firme (de 1,5 a 2,0 m) y lo que sobresale la fortificación por arriba del terreno movedizo

El diámetro interior que se le da a la fortificación de descenso debe ser como mínimo 0,5 m superior al diámetro que se requiere para el pozo. Esto se hace teniendo en cuenta que la fortificación de descenso al atravesar la zona de roca inestable-acuífera, por diferentes causas puede desviarse en alguna medida de la vertical.

Para determinar el espesor de la pared de la fortificación de descenso habitualmente se emplean las mismas expresiones usadas para el cálculo del espesor de la fortificación de los pozos laboreado en condiciones normales, o sea

$$e_{FD} = m_t R_p \left(\sqrt{\frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{perm} - 2 P_{m\acute{a}x}}} - 1 \right) \quad (III.6)$$

donde:

e_{FD} : espesor de la fortificación de descenso, m

m_t : coeficiente que tiene en cuenta las condiciones en las que trabaja la fortificación

R_p : radio útil del pozo, m

$P_{m\acute{a}x}$: carga máxima que se espera que actúe sobre la fortificación de descenso (carga de cálculo), MPa

σ_{perm} : resistencia permisible del material de que se hace la fortificación de descenso a la compresión durante cargas a flexión, MPa

El valor de la carga (presión), que actúa sobre las paredes de fortificación puede ser calculado utilizando una hipótesis de presión minera, por ejemplo, la de Tsimbarevich.

$$P = \gamma_v^n \left[h_n + \frac{\gamma_v^{n-1}}{\gamma_v^n} \cdot h_{n-1} + \frac{\gamma_v^{n-2}}{\gamma_v^n} \cdot h_{n-2} + \frac{\gamma_v^2}{\gamma_v^n} h_2 + \frac{\gamma_v^1}{\gamma_v^n} h_1 \right] T_9^2 \left(\frac{90 - \rho_n}{2} \right) \quad (III.7)$$

donde:

$\gamma_1 \dots \gamma_n$: masa volumétrica de los diferentes tipos de roca que alcanza la fortificación

$h_1 \dots h_n$: potencia de estas capas de roca

$T_9^2 \frac{90 - \rho_n}{2} = A$: coeficiente de empuje lateral

El valor de A se toma: para terrenos movedizos igual a 0,75; para terrenos sueltos (arena, grava, etc.) igual a 0,50 - 0,55; para terrenos deslizados y arcillosos igual a desde 0,35 a 0,40; para yesos, carbón de piedra, esquistos arcillosos y otros, de 0,15 a 0,20; para rocas fuertes y muy fuertes (calizas, granito, gabros, sienita y otras su valor oscila de 0,0010 a 0,02).

El valor de la presión actuante también puede ser calculado utilizando los resultados obtenidos de trabajos experimentales o diferentes metodologías de cálculo elaboradas por algunos institutos de investigación.

La magnitud del espesor de la fortificación de descenso e_{fd} que se obtiene según los cálculos (expresión III.6) se recomienda teniendo en cuenta la movilidad presente durante el hundimiento de esta fortificación y la posibilidad de un hundimiento irregular, aumentan en un 20 o un 30 %, tomando este valor resultante como el de proyecto.

Realización de los trabajos de descenso de la fortificación

La realización de los trabajos utilizando la fortificación de descenso va a estar en dependencia de la profundidad a que se encuentre la zona de roca inestable-acuífera. Así, tenemos que si esta zona está a 1,5 - 2,0 m de profundidad, la fortificación se hunde directamente desde la superficie; para ello inicialmente se quita la capa vegetal y se pone en la plazoleta de trabajo una capa de arena de granos gruesos o de grava, montándose sobre ella la zapata cortante y levantándose las paredes de la fortificación hasta la altura prevista.

Si la zona de terreno débil está a 3,0-4,0 m de profundidad se laboreo una zanja de 2,0-3,0 m de profundidad colocando en el fondo de dicha zanja la mencionada capa de arena o grava y después sobre ella se coloca la zapata y se levantan las paredes.

Si la zona de roca inestable-acuífera se encuentra a una profundidad mayor de 4,0 m, se laboreo y fortifica previamente la boca del pozo y se inicia el laboreo del mismo hasta que se llega a una distancia de 1,0 a 1,5 m del techo de la zona de roca inestable-acuífera, momento en que los trabajos de avance se detienen y se procede a la construcción de la fortifi-

Je descenso y a su penetración a través de la zona de roca inestable

multáneamente en el descenso de la fortificación se realiza el arranque de la roca en su interior; esto ocurre hasta que la parte inferior de la fortificación de descenso penetra en una zona de roca fuerte e impermeable (la denominada roca de apoyo) (ver Fig. III.4).

El proceso de descenso de la fortificación a través de la zona de roca inestable puede realizarse según dos variantes:

1) eliminando durante el descenso de la fortificación el agua del frente, o
2) sin su eliminación. La primera variante se emplea en rocas inestables que no tengan características movedizas y donde no exista una gran afluencia de agua, en tanto que la segunda variante se recomienda usar en caso de que exista roca movediza o en cualquier zona de roca inestable en la que haya una gran afluencia de agua.

Cuando se realiza el descenso de la fortificación hay fuerzas que ayudan a este movimiento (el peso propio de la fortificación) y fuerzas que se oponen a esto (la fuerza de fricción entre la pared de la fortificación y las rocas laterales), f_o - fuerza específica de fricción, MPa.

La magnitud de la fricción producida entre la pared de la fortificación de descenso y la roca depende de varios factores, siendo los más significativos:

- Características de las rocas laterales.
- Características del estado exterior (la que contacta la roca) de la fortificación de descenso.
- Profundidad de descenso.

La magnitud del coeficiente de fricción puede variar, según datos de la práctica, desde 100 a 350 Pa.

La fuerza de fricción F_f aumenta a medida que se aumenta la altura de descenso (ver Tabla 1).

Tabla 1. Valores de F_f según la profundidad de descenso

Profundidad a que desciende la fortificación, m	Magnitud de la fuerza de fricción F_f que surge entre la fortificación y la roca	
	Grava de granulometría normal	Arena arcillosa de granulometría fría
1	96	60
2	155	86
3	208	103
4	302	151
5	417	210

Tabla 1. (continuación)

Profundidad a que desciende la fortificación, m	Magnitud de la fuerza de fricción F_f que surge entre la fortificación y la roca	
	Grava de granulometría normal	Arena arcillosa de granulometría fría
1	280	361
6	553	453
7	710	556
8	889	670
9	1 090	
10	1 310	

En el caso en que el agua no se saque del frente del pozo, la fortificación de descenso se va a "sumergir en ella" en una determinada porción, lo cual trae consigo una disminución de su peso.

El peso de la fortificación de descenso Q_{FD} se calcula por la expresión

$$Q_{FD} = \frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_{if}^2) H_{FD}^2 \gamma_v + g_z, \text{ kg} \quad (\text{III.8})$$

donde:

D_{ef} y D_{if} : diámetro exterior e interior de la fortificación de descenso, m

H_{FD} : altura de la pared de la fortificación de descenso, m

γ_v : masa volumétrica del material de que está hecha la fortificación, kg/m^3

g_z : peso de la zapata, kg

La fuerza de fricción F_f que actúa entre las paredes de la fortificación y la roca será:

$$F_f = S_{FD} \cdot f_v, \text{ kg} \quad (\text{III.9})$$

donde:

S_{FD} : área de la fortificación de descenso que hace contacto con la roca, m^2

La pérdida de peso Q_o que experimenta la fortificación de descenso al sumergirse en agua se puede calcular por la expresión

$$Q_o = \frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_{if}^2) h_L \cdot \gamma_v^a, \text{ kg} \quad (\text{III.10})$$

donde:

h_L : profundidad de penetración de la fortificación de descenso en el agua, m

γ_v^a : masa volumétrica del agua, kg/m^3

A partir de lo anterior se puede decir que el peso real que actúa de la fortificación de descenso Q_{FD} viene dado por la expresión

$$Q_{FD} = Q_{FD} - Q_o \quad (\text{III.11})$$

Sustituyendo los valores de Q_{FD} y Q_o obtenidos en las expresiones (III.8) y (III.10) y realizando las operaciones necesarias se obtiene

$$Q_{FD}^1 = \frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_{if}^2) (H_{FD}^p \gamma_v^f - h_a \gamma_v^a) + g_z, \text{ kg} \quad (\text{III.12})$$

En este caso la fortificación de descenso bajará por la acción de su propio peso si

$$Q'_{FD} > F_f \quad (\text{III.13})$$

o lo que es igual

$$Q_{FD} > F_f + Q_o \quad (\text{III.14})$$

Sustituyendo en la expresión (III.13) los valores obtenidos de Q'_{FD} (expresión III.12) y de F_f (expresión III.9) se obtiene

$$\frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_{if}^2) (H_{FD}^p \gamma_v^f - h_a \gamma_v^a) + g_z > S_{FD} \cdot f_o \quad (\text{III.15})$$

pero

$$f_o = \pi \frac{D_{ef}}{2} \cdot h \quad (\text{III.16})$$

Por lo que:

$$\frac{\pi}{4} (D_{ef}^2 - D_{if}^2) (H_{FD}^p \gamma_v^f - h_a \gamma_v^a) + g_z > \frac{\pi D_{ef}}{2} \cdot h \cdot f_o \quad (\text{III.17})$$

y de esta expresión se puede despejar h y obtener el valor para el cual el descenso de la fortificación se detiene.

Si el peso de la fortificación de descenso fuese insuficiente para garantizar la realización de los trabajos, se podría pensar en aumentarlo haciendo más grueso el espesor de las paredes o aumentando la altura de la

fortificación de descenso. Ambas variantes poseen como desventaja esencial el encarecimiento de los trabajos.

Por esta causa es habitual resolver esta situación mediante el empleo de cargas adicionales P_a cuya magnitud se puede calcular por la expresión

$$P_a = Q_o + F_f - Q_{FD} \quad (\text{III.18})$$

si la fortificación se sumerge en agua, o por la expresión

$$P_a = F_f - Q_{FD} \quad (\text{III.19})$$

si el agua del frente del pozo se saca.

Conociendo la magnitud necesaria de la carga adicional (P_a) se puede elegir la forma en que ella se garantiza. Esto habitualmente se logra con el empleo de gatos hidráulicos con capacidades de 100 a 200 t.

El apoyo superior de los gatos se sitúa directamente en la boca del pozo, en tanto que en el inferior transmite directamente la carga a la fortificación de descenso.

La fortificación de descenso en ocasiones se encofra con tablas de superficies lisas para que disminuya el roce entre la fortificación y la roca durante su descenso.

La disminución de la fricción se puede lograr mediante la inyección de agua, aire comprimido o vapor, a través de orificios que se encuentren en la zapata cortante de la fortificación con el empleo de soluciones arcillosas, lo que crea una camisa entre la fortificación de descenso y la roca; de esta última opción lo más usado en la actualidad es el descenso de la fortificación con el empleo de una solución tixotrópica.

Empleo de la fortificación de descenso con una camisa a base de una solución tixotrópica

Tixotropía se denomina a la capacidad que tienen algunas soluciones, entre éstas algunas arcillosas, de fraguar en un estado tranquilo y a temperatura constante, pero cuando sobre ellas se producen afectaciones mecánicas, pasan de nuevo a un estado líquido.

La solución tixotrópica de arcilla se obtiene a partir de la mezcla de una arcilla bentonítica en agua.

El uso de solución tixotrópica para facilitar el descenso de las fortificaciones está muy difundido desde fines de la década del 60 en varios países de Europa.

La solución tixotrópica debe rellenar el espacio que queda entre la fortificación de descenso y el macizo, formando de tal forma una especie de camisa. Esta camisa disminuye significativamente la fricción entre la fortificación y la roca en el proceso de descenso.

Acorde a las investigaciones realizadas, la resistencia al cortante producido durante el descenso de la fortificación cuando se emplea la camisa de solución tixotrópica, en dependencia de la profundidad de descenso, oscila de 70 a 230 kgf por 1 m² de superficie exterior de fortificación, en tanto que esta resistencia, cuando no se emplea dicha camisa, puede llegar a los 2 500 kgf/cm².

Además, la camisa de solución tixotrópica evita la entrada de agua desde un horizonte acuífero a la fortificación de descenso y suaviza el encuentro de la fortificación con sectores duros de terreno.

Como resultado de todo lo anteriormente expresado se aumenta la presión real de la zapata cortante sobre el frente, lo cual conlleva a una mayor penetración de ella sobre el terreno.

Para la preparación de la solución tixotrópica se emplea, como ya se mencionó, una arcilla bentonítica que posee una alta capacidad de ensanchamiento.

Se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de preparar la solución tixotrópica.

Composición granulométrica: debe contener partículas arcillosas mayores que 0,005 mm por lo menos en un 30 %, partículas arcillosas mayores que 0,001 mm en más de un 10 % y partículas arenosas de 0,05 a 1 mm, en cantidades menores a un 10 %.

Número de plasticidad: debe ser por lo menos 20.

Humedad: no menos de un 25 %.

Capacidad de hinchamiento: por lo menos en un 15 o 20 %.

Para mejorar la calidad de la solución arcillosa ésta debe ser tratada con una serie de agentes químicos como son carbonato de sodio, pirafosfato de sodio (P₂O₇Na₂), un agente básico y silicato de sodio. La cantidad de cada agente debe ser determinada para cada caso en concreto.

Sobre las propiedades de las soluciones tixotrópicas ejercen influencia una serie de factores, de los cuales los principales son: el contenido de partículas arcillosas y de los agentes químicos y la temperatura de preparación de la solución. La viscosidad de la solución tixotrópica al aumentarse la temperatura, al igual que la de otras arcillas, se aumenta; por eso al preparar la mezcla con agua caliente se puede ahorrar material.

El gasto de solución arcillosa necesario para rellenar el espacio que queda entre la fortificación y el macizo se calcula teniendo en cuenta un coeficiente de reserva de 1.5. A partir de esto se puede calcular la cantidad de arcilla requerida para realizar el trabajo

El cálculo de la masa de arcilla M_1 en toneladas que se necesita para preparar 1 m³ de solución arcillosa de una densidad dada se realiza por la expresión

$$M_1 = \gamma_e^{AR} (\gamma_e^s - \gamma_e^a) (\gamma_e^{AR} - \gamma_e^a) \quad (III.20)$$

donde:

γ_e^{AR} : densidad de las partículas arcillosas, t/m³

γ_e^s : densidad de la solución arcillosa, t/m³

γ_e^a : densidad del agua, t/m³

El cálculo de la masa de arcilla M_2 en toneladas necesarias para un 1 m³ de agua se realiza por la expresión

$$M_2 = \gamma_e^{AR} (\gamma_e^s - \gamma_e^a) (\gamma_e^{AR} - \gamma_e^s) \quad (III.21)$$

Mantenimiento de la verticalidad de la fortificación de descenso

La verticalidad del hundimiento de la fortificación se asegura ante todo por la realización correcta de los trabajos de extracción de la roca en el frente.

La desviación de la fortificación de descenso de la posición vertical se elimina por medio del aumento de la carga en su parte atrasada, realizándose la extracción de la roca en el frente por esta misma parte y poniendo al mismo tiempo por el lado opuesto barras bajo la zapata cortante.

La verticalidad de la fortificación de descenso se comprueba diariamente a tres niveles hechos en la fortificación y por medio de una plomada central, también con ayuda de niveles. Para esto dentro del cilindro de descenso, a 0,5 - 1,0 m de altura de la zapata cortante se consolida un anillo tubular de 30 - 35 mm de diámetro, en el cual se colocan tubos verticales de vidrio.

Todo el sistema se llena de agua. Por el nivel del agua en los tubos de vidrio se puede juzgar sobre la verticalidad del hundimiento de la fortificación.

Al laborear el pozo sin el bombeo del agua la verticalidad de la fortificación se determina por marcas horizontales rojas trazadas en la superficie interior de dicha fortificación cada 0,5 - 1,0 m según la vertical. Al inclinarse la fortificación de la vertical estas líneas estarán a diferentes distancias del nivel del agua en los lados diametralmente opuestos de la fortificación.

Por último, después de introducida la zapata cortante a 1,0 - 2,0 m de profundidad en la roca hidrófuga fuerte, para prevenir el hundimiento arbitrario de la fortificación se elimina la carga adicional, se ponen bajo la za-

pata cortante pedazos de vigas y se llena con una solución de cemento el espacio restante entre la fortificación de la boca del pozo y la fortificación de hundimiento.

Luego de esto el pozo se ahonda en 3 - 4 m, se colocan los cuadros de apoyo y se instala la fortificación de hormigón hasta una altura de 2 - 2,5 m por encima de la base de la zapata cortante. El espesor de hormigón dentro de la fortificación debe oscilar entre 150 - 200 mm (ver Fig. III.4d).

III.2.LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE ESCUDOS VERTICALES

El primer escudo para el laboreo de pozos verticales fue construido en 1857 en Bélgica; de entonces a la fecha han sido innumerables las variaciones que han sufrido desde el punto de vista constructivo estos escudos.

No obstante esto, e independientemente de su construcción, todos los escudos poseen los mismos elementos constructivos, los cuales obedecen a dos exigencias fundamentales.

1. La necesidad de descender los elementos constructivos hasta el frente de trabajo a través de la plataforma de trabajo y el armado allí del escudo.
2. La posibilidad de garantizar la realización de varias operaciones paralelas durante el laboreo del pozo a través de rocas acuíferas inestables.

La primera exigencia conduce a la limitación de las dimensiones y peso de los elementos del escudo además de la necesidad de determinar en el proyecto el orden exacto de montaje y desmontaje del escudo.

La segunda exigencia condiciona la presencia en el frente de trabajo de un número significativo de obreros que van a encontrarse en un espacio limitado, y a los que se les debe garantizar condiciones cómodas de trabajo.

Características constructivas de los escudos verticales

Las principales partes constituyentes del escudo vertical son: la zapata cortante (1); la cámara de trabajo (2) conformada por cuatro secciones de blindas (3); la envoltura metálica (4), bajo cuya protección se lleva a cabo los trabajos de instalación de las blindas y además sirve como elemento guía; las vigas consolas (5) que sirven de apoyo a los gatos hidráulicos (6) y las plataformas de trabajo (7) (ver Fig. III.6)

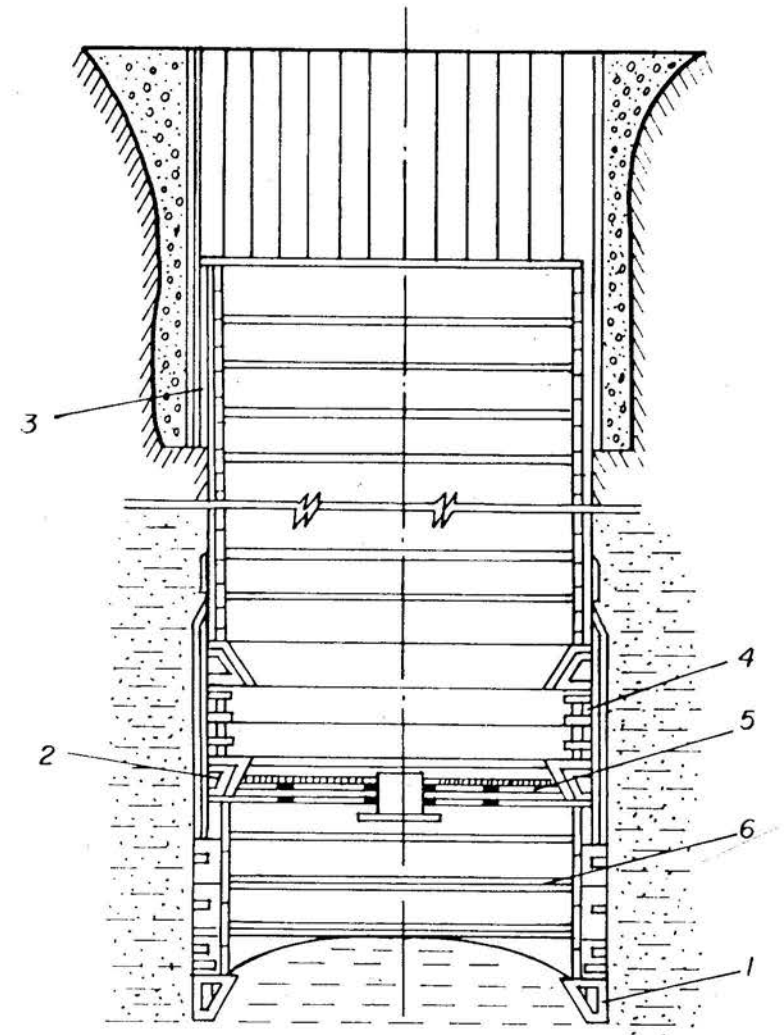


FIGURA III.6. Características constructivas del escudo vertical. 1 - zapata cortante, 2 - cuadro de apoyo, 3 - cámara para el montaje del escudo, 4 - gatos hidráulicos, 5 - plataforma de trabajo, 6 - escudo.

Otros elementos que forman parte del escudo vertical son: equipos registradores de su verticalidad, el sistema de aire, la bomba de aceite, etcétera.

Habitualmente el escudo vertical consta de tres plataformas de trabajo:

La inferior se utiliza para recepcionar los elementos de la fortificación de blindas y para su instalación. En ella habitualmente se coloca el punto de mando del escudo.

Desde la plataforma intermedia se realiza el acabado de la fortificación, los trabajos de taponamiento y otros.

En la plataforma superior se coloca la bomba o instalación de aceite, los equipos de taponamiento (la bomba y el recipiente).

Estos escudos como norma constan de 18 a 24 gatos hidráulicos, los cuales poseen una capacidad de 50 a 80 t.

Se recomienda que la altura del escudo vertical (según la envoltura metálica) nunca sea menor que su diámetro.

Realización de los trabajos de laboreo con el empleo del escudo vertical

Después de concluidos los trabajos de montaje del escudo vertical y de realizar algunas operaciones preliminares, se comienza el laboreo del pilar de protección que se dejó entre la cámara de trabajo y el techo de la roca acuífera inestable.

Antes de atravesar el pilar de protección se debe, mediante el empleo de barreros de exploración, valorar el posible empuje de las aguas subterráneas, con el objetivo de tomar las medidas pertinentes y así evitar posibles desprendimientos súbitos de agua que puedan poner en peligro la vida de los trabajadores y ocasionar daños materiales.

Los trabajos de arranque se pueden realizar con el empleo de martillos rompedores o *greifers*, pero siempre dejando una berma de por lo menos 30 cm por todo el contorno de la zapata del escudo para evitar el autohundimiento del escudo y la entrada de terreno movedizo en el frente de trabajo.

La carga de la roca del frente se puede realizar empleando diferentes máquinas cargadoras, por ejemplo: la KS-3 y tinas que conducen la roca a la superficie.

La eliminación del agua que llega al frente se efectúa con el empleo de bombas de suspensión.

Una vez realizado el laboreo del pozo a través de la zona de roca inestable-acuífera y que se penetró en una zona de rocas duras, se procede al desmontaje del escudo. Estos trabajos de desmontaje se realizan bajo la protección de la envoltura metálica exterior, la cual se deja en el pozo en calidad de fortificación temporal.

Durante la realización de estos trabajos es habitual realizar el relleno del espacio que queda detrás de la fortificación en dos etapas. La primera vez, el relleno se realiza desde la plataforma superior a medida que se coloca la fortificación, dejando una distancia del frente de 2 o 3 segmentos de blindas y la segunda vez se efectúa después que se terminó el laboreo de la zona donde se usó el escudo.

Trabajos topográficos durante el laboreo de los pozos con el escudo vertical

Durante el laboreo con el empleo del escudo vertical las cuestiones relacionadas con los trabajos topográficos poseen un significado especial.

Los trabajos topográficos que se deben realizar en tales casos son:

- Medición preliminar de las dimensiones del escudo.
- Control de las dimensiones geométricas de la cámara de trabajo.
- Precisión de la situación del escudo después de montado.
- Control durante el descenso del escudo.
- Control de los trabajos de colocación de las blindas.

La desviación permisible en el diámetro de proyecto del escudo en cualquiera de sus partes no debe exceder de 20 mm.

III.3. PRINCIPIOS BASICOS A CONSIDERAR A LA HORA DE PROYECTAR Y ORGANIZAR EL LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE CONSTRUCCIONES DE DESCENSO

La especialidad de los trabajos a realizar, cuando se emplean métodos especiales -lo que conlleva a desarrollar trabajos en condiciones no habituales- exige un cuidadoso trabajo en la elección de la tecnología y organización de los trabajos.

Para elaborar el proyecto de laboreo de un pozo en que se emplee para ello una construcción de descenso, se consideran necesarios los siguientes datos iniciales:

- Columna estructural de las rocas que va a atravesar el pozo, en la que se señale las zonas de rocas inestables, movedizas y acuíferas.
- Propiedades físico-mecánicas de las rocas.
- Afluencia de agua esperada.
- Temperatura de las aguas subterráneas.
- Composición química de las aguas subterráneas.

- Pasaporte de la fortificación permanente del pozo, teniendo en cuenta las zonas de intersección con excavaciones aledañas.
- Proyecto de hidroaislamiento de la fortificación de blinda que incluye los trabajos de relleno detrás de la fortificación.
- Cortes verticales y horizontales del pozo con la ubicación del equipamiento.
- Ubicación del equipamiento en la superficie y otros.

Después de aprobado el proyecto técnico se procede a la preparación de los gráficos de trabajo en los cuales se precisan las resoluciones formadas con el grado de detalle necesario.

Según la práctica existente al respecto se recomienda elaborar en el proyecto técnico los siguientes aspectos:

- Organización del trabajo para la instalación de los cuadros de apoyo que sirven para la suspensión de los elementos de la fortificación de blindas que se instala de arriba hacia abajo.
- Construcción de la cámara para el montaje del escudo vertical y organización del trabajo para su montaje.
- Organización del traslado de los elementos de la fortificación a la cámara de montaje.
- Pasaportes con las diferentes operaciones de laboreo.
- Ciclogramas de trabajo para el sector del pozo que se laboreo con la utilización de la construcción del descenso.
- Plan calendario de los trabajos.
- Disposición del equipamiento en el pozo, en particular el relacionado con el empleo de la construcción de descenso.
- Organización del trabajo de hidroaislamiento.
- Organización de las labores de relleno de los espacios que quedan detrás de la fortificación.
- Organización de las tareas de eliminación del agua del frente.

CAPITULO IV

LABOREO DE POZOS CON EL EMPLEO DE AIRE COMPRIMIDO

Este método se puede emplear cuando es necesario laborear zonas de rocas débiles acuíferas e inestables en las que exista empuje hidrostático de las aguas subterráneas. En tales condiciones, el empleo de las construcciones de descenso ya estudiadas usadas en forma independiente no es posible.

El método consiste en lo siguiente: a una cierta distancia del frente de trabajo, habitualmente de 2,2 a 3,0 m se construye un techo como consecuencia de lo cual entre éste y el frente se forma una cámara denominada de trabajo. A esta cámara se hace llegar aire comprimido con una presión tal que exceda al valor del empuje de las aguas subterráneas.

Bajo la acción del aire comprimido, el agua contenida en la roca del contorno de la cámara de trabajo es empujada hacia el interior del macizo, por lo que esta roca se seca aumentando su estabilidad.

La máxima presión del aire comprimido permisible en la cámara de trabajo, según las condiciones de seguridad e higiene del trabajo es de 0,2 MPa, aunque en condiciones específicas con regímenes especiales de trabajo se puede llegar hasta 0,25 MPa .

Con esta presión de aire comprimido, en las rocas del contorno de la cámara de trabajo, se puede desalojar agua (empujándola hacia el interior del macizo) que tenga un empuje de 20 a 25 m de la columna de agua (10,33 m de la columna de agua es el empuje de las aguas equivalente a 0,1 MPa).

De tal forma, hipotéticamente hablando, se podría con tal presión del aire comprimido atravesar potencias de rocas acuíferas de hasta 20 - 25 m, siempre y cuando en las aguas subterráneas no haya empuje. Ahora bien, en el caso que nos ocupa existe empuje y por ende, la potencia de roca acuífera posible a atravesar se reduce en dependencia de la magnitud existente del empuje.

Para comunicar la cámara de trabajo con la superficie se utilizan tubos metálicos que se fijan al techo de la cámara de trabajo, los cuales se denominan tubos de minas. En la parte superior de estos tubos de minas se montan esclusas. El conjunto formado por la cámara de trabajo, los tubos de mina y las esclusas (ver Fig. IV.1) durante los trabajos de laboreo, se encuentra bajo la acción del aire comprimido.

El método de laboreo de pozos con el empleo del aire comprimido posee las siguientes ventajas:

- Es simple y confiable (en las condiciones en las que se prevé su empleo).
- Exige para su aplicación poco volumen de trabajos preparatorios.
- Bajo costo de laboreo en comparación con otros métodos especiales.
- Es posible con su empleo, sin necesidad de gastos adicionales, laborear las intersecciones del pozo con las excavaciones adyacentes.
- Con su aplicación se pueden laborear diferentes zonas del pozo que así lo requieran, en tanto que el resto del laboreo puede hacerse por los métodos habituales.

Como desventaja esencial del método se puede señalar el límite dado para la magnitud del empuje de las aguas subterráneas (de 0,20 a 0,25 MPa) condicionado por lo dañinas que resultan las presiones superiores para la salud de los obreros.

El laboreo de pozos con el empleo del aire comprimido puede hacerse según 3 variantes:

1. Con el techo de la cámara de trabajo móvil (con el descenso de la fortificación).
2. Con el techo de la cámara de trabajo fijo, inmóvil.
3. Con la combinación de los dos casos anteriores, es decir, utilizando al principio la variante de techo móvil y al final la de techo fijo.

La mayor difusión la ha recibido la primera variante.

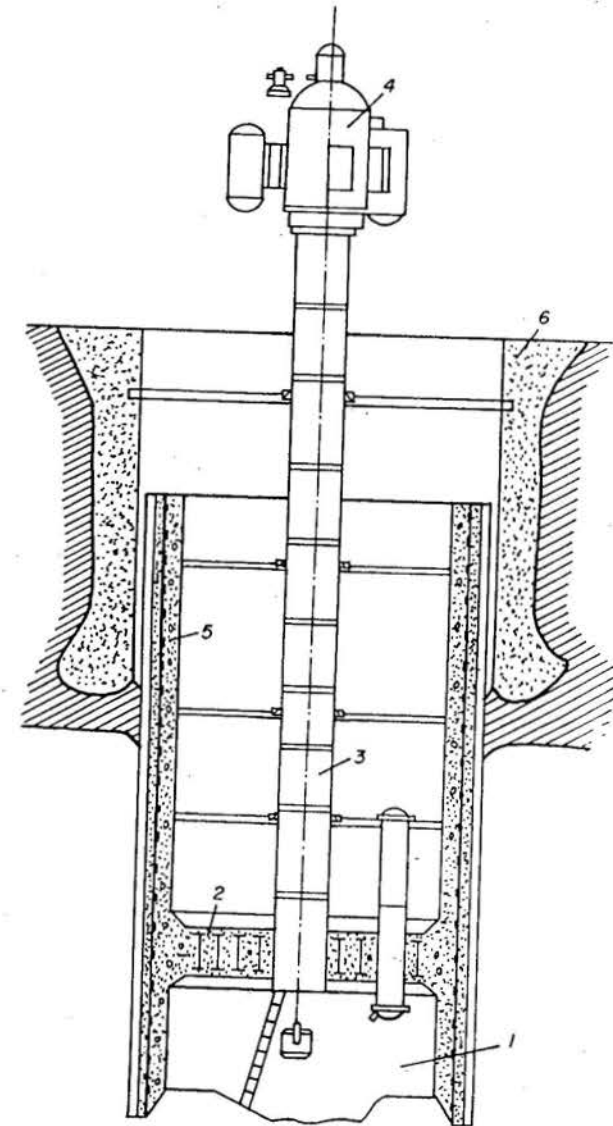


FIGURA IV.1. Esquema de laboreo de pozos bajo la protección del aire comprimido. 1 - cámara de trabajo, 2 - techo de la cámara de trabajo, 3 - tubería de mina, 4 - aparato de esclusas, 5 - fortificación, 6 - fortificación de la boca del pozo.

IV.1. LABOREO DE POZOS CON EL TECHO MOVIL DE LA CAMARA DE TRABAJO

En este caso a medida que se desplaza la fortificación de descenso también lo hace el techo de la cámara de trabajo (ver Fig. IV.2).

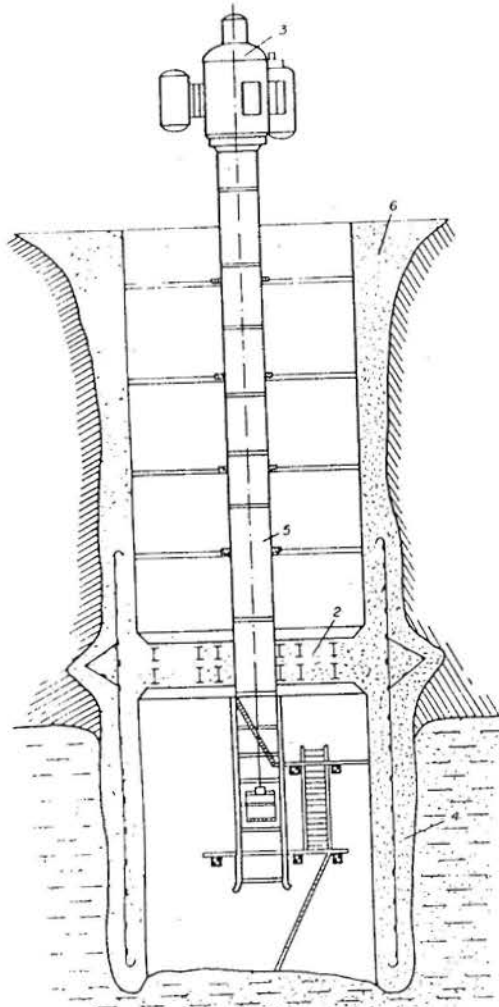


FIGURA IV.2, Esquema de laboreo con el techo móvil de la cámara de trabajo. 1 - cámara de trabajo, 2 - techo de la cámara, 3 - sistema de esclusa, 4 - fortificación, 5 - tubería de mina, 6 - fortificación de la boca del pozo.

O sea, según esta variante, a medida que se va arrancando la roca del frente de trabajo se produce el descenso de la fortificación, y simultáneamente a esto las paredes de la misma se van alargando por su extremo superior.

La altura de la cámara de trabajo se elige no menor de 2,2 m (como norma de 2,5 a 3,0 m) y su diámetro interior se toma entre 0,5 a 0,8 m superior al diámetro útil previsto para el pozo, lo cual se hace previniendo cualquier desviación de la vertical que pueda tener el conjunto cámara-techo en su descenso.

Las paredes de la fortificación habitualmente se construyen de hormigón armado, usándose para ello un hormigón de rápido endurecimiento que alcance la resistencia proyectada en no más de 5 a 7 días. El espesor de estas paredes se debe calcular teniendo en cuenta la presión minera máxima actuante y la presión de aire comprimido; habitualmente su valor oscila entre 0,6 a 0,8 m.

El techo de la cámara de trabajo se construye también de hormigón armado y se arma adicionalmente con vigas metálicas de doble T (Nos. 36 al 55) en los que se apoyan los tubos de minas. El número de estas vigas y el perfil (número) a utilizar dependen del diámetro del pozo y la presión de aire comprimido en la cámara de trabajo prevista en el proyecto. Estos aspectos se determinan mediante cálculos. El espesor del techo de hormigón armado de la cámara de trabajo habitualmente es de 0,8 a 1,0 m.

El empleo de los techos de hormigón armado tiene como desventajas esenciales un gasto de tiempo elevado en su construcción (hasta 20 días) y en su desmontaje después de concluido los trabajos (hasta de 8 días), así como las significativas pérdidas de metal surgidas durante su desmontaje.

Por estas razones en los últimos años se ha difundido el empleo de los techos metálicos desarmables, ya que con su uso se disminuye la pérdida de metal y los gastos de tiempo en el montaje y desmontaje de los techos.

Además, con esta variante se logra disminuir las pérdidas de aire a través del techo.

Durante la construcción del techo de la cámara de trabajo se prevén en él ensambladuras para la conexión de la tubería de aire comprimido y la de desagüe; para el paso de los cables de teléfono e iluminación así como de otros equipos y accesorios.

Para la realización de los trabajos bajo la protección de aire comprimido es necesario contar con el tubo de mina y el sistema de esclusas.

Las esclusas sirven para garantizar la comunicación entre la cámara de trabajo (que se encuentra bajo la acción del aire comprimido) y el exte-

rior, o sea, en ellas se produce el paso gradual de la presión desde su valor de trabajo (la que tiene en la cámara) hasta la atmosférica, y a la inversa.

Los sistemas de esclusas según su construcción pueden clasificarse en dos tipos: aquellos en que se realizan indistintamente tanto los trabajos de carga como los de acceso del personal y en los que estas funciones se dividen en dos grupos independientes de esclusas.

Existe un gran número de sistemas de esclusas diferenciados entre sí por uno o varios aspectos. En este texto no se considera necesario entrar al estudio particular de cada sistema, pero sí es conveniente señalar que en todos estos sistemas de esclusas se instalan señales acústicas y sonoras, además, y en los sistemas que se usan para el personal, se instalan teléfonos.

Abastecimiento y cálculo del aire comprimido

Para el abastecimiento de aire comprimido se construye una estación especial de compresores. Para este fin, frecuentemente se usan compresores de émbolo, pues con ellos se produce menos vapor de aceite, elemento dañino para la salud de los obreros que se encuentran en la cámara de trabajo.

El aire que llega a la cámara de trabajo debe ser puro y tener la temperatura recomendada por las normas sanitarias acorde a la presión de trabajo.

De la estación de compresores el aire, antes de llegar a la cámara de trabajo, debe pasar por lo menos por 2 recipientes de aire y por separadores de humedad y de aceite.

Estos recipientes sirven para crear una cierta reserva de aire comprimido en caso de que se produzca alguna parada forzosa de carácter temporal de los compresores, y para suavizar los golpes de aire que surgen como resultado del funcionamiento irregular de los compresores de émbolo.

La capacidad que deben tener estos recipientes se determina según las condiciones concretas de trabajo.

Para garantizar el funcionamiento continuo y seguro de la estación de compresores ésta debe estar equipada con 2 fuentes independientes de energía, por ejemplo: con energía eléctrica y con motores de combustión interna. Se debe prever que en la estación de compresores haya por lo menos un compresor y un motor de reserva, debiendo ser la productividad de este compresor similar al de mayor productividad de los que están funcionando.

El cálculo de la cantidad necesaria de aire comprimido se realiza por fórmulas empíricas partiendo de las condiciones higiénico-sanitarias que

se deben satisfacer en el frente de trabajo y de las condiciones técnico-productivas existentes.

La cantidad de aire comprimido que se debe hacer llegar a la cámara de trabajo se determina teniendo en cuenta los siguientes factores: compensación de las pérdidas de aire comprimido producidas en todo el sistema; cumplimiento de los requisitos higiénico-sanitarios y tiempo mínimo necesario para llenar la cámara de trabajo, el tubo de mina y el sistema de esclusa de aire comprimido.

El cálculo de la cantidad de aire comprimido V_1 referido a la presión atmosférica que se debe suministrar para compensar las pérdidas de explotación, en dependencia del tipo de roca y del área del frente (S_f) se realiza por las siguientes fórmulas:

- Rocas tipo areniscas

Para $S_f > 30 \text{ m}^2$

$$V_1 = 1,01 (a F + b p) \left(1 + \frac{0,42 H_{m\acute{a}x}}{10,33}\right), \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{IV.1})$$

Para $S_f < 30 \text{ m}^2$

$$V_1 = (a F + b p + 3 n_e) \left(1 + \frac{0,42 H_{m\acute{a}x}}{10,33}\right), \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{IV.2})$$

- Rocas arcillosas

Para $S_f > 30 \text{ m}^2$

$$V_1 = 1,01 a F \left(1 + \frac{0,42 H_{m\acute{a}x}}{10,33}\right), \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{IV.3})$$

Para $S_f < 30 \text{ m}^2$

$$V_1 = (a F + 3 n_e) \left(1 + \frac{0,42 H_{m\acute{a}x}}{10,33}\right), \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{IV.4})$$

donde:

a: pérdida por hora de aire comprimido a través de 1 m^2 de superficie de las paredes y techo de la cámara de trabajo

F: superficie interior del techo (F_t) y de las paredes (F_p) de la cámara de trabajo

$$F = F_t + F_p = \frac{\pi D^2}{4} + \pi D h_c \quad (\text{IV.5})$$

h_c : altura de la cámara de trabajo

D: diámetro útil de la cámara de trabajo

h : pérdida horaria de aire comprimido que ocurre por un metro de perímetro de la zapata de la fortificación de descenso
 p : perímetro de la zapata de la fortificación de descenso
 n_e : número de aparato de esclusas

$H_{m\acute{a}x}$: mayor profundidad de descenso de la cámara de trabajo por debajo del nivel hidrostático de las aguas

La cantidad de aire comprimido V_2 (en m^3/h), referida a la presión atmosférica que se debe hacer llegar a la cámara de trabajo, para dar cumplimiento a las exigencias sanitarias, se determina a partir de la cantidad permisible de óxido de carbono requerida en el aire (no más de 0,1 %) y de la norma de aire que debe llegar a cada obrero en el frente, que es de $25 m^3/h$. La cantidad permisible de otros gases dañinos se especifica por los controles sanitarios en cada caso concreto.

Cuando la roca en que se trabaja es arcillosa, parte del oxígeno del aire se gasta en la oxidación de los elementos ferrosos contenidos en la arcilla. Por esta causa el cálculo de la cantidad de aire por necesidades sanitarias para estas rocas arcillosas se hace por una fórmula diferente a la del resto de las rocas.

El cálculo de V_2 se realiza por la expresión:

- Para areniscas y otras rocas

$$V_2 = 20 n \left(1 + \frac{0,42 H}{10,33} \right), m^3/h \quad (IV.6)$$

- Para arcilla

$$V_2 = (20 n + S_c) \left(1 + \frac{0,42 H}{10,33} \right), m^3/h \quad (IV.7)$$

donde:

n : número de obreros que se encuentran simultáneamente en la cámara de trabajo

H : empuje hidrostático, metros de la columna de agua

S_c : área de la sección transversal de la cámara de trabajo, m^2

Por último, la productividad de la estación de compresores debe ser la suficientemente alta para llenar el aire comprimido de la cámara de trabajo, el tubo de mina y el sistema de esclusas en un determinado período de tiempo que habitualmente se toma de 30 minutos a una hora.

Los volúmenes de la cámara de trabajo V_c del tubo de minas V_t del sistema de esclusas V_e y de las tuberías de aire V_a se determinan según sus dimensiones constructivas.

El volumen de aire comprimido (V_o) referido a la presión atmosférica, necesaria para el llenado de la cámara de trabajo y del tubo de mina con

la simultánea eliminación del agua que se encuentra bajo una presión de $\frac{H}{10,33}$ se determina por la expresión

$$V_o = (V_c + V_t) \left(1 + \frac{H}{10,33} \right), m^3 \quad (IV.8)$$

En tanto que el volumen de aire V_o necesario para llenar el sistema de esclusas y las tuberías de aire se calcula por la expresión

$$V_o' = (V_e + V_a) \frac{H}{10,33}, m^3 \quad (IV.9)$$

El volumen total que se necesita de aire comprimido (V_i) se obtiene de la suma de las 2 expresiones anteriores.

$$V_i = V_o + V_o' = (V_c + V_t) \left(1 + \frac{H}{10,33} \right) + (V_e + V_a) \frac{H}{10,33} \quad (IV.10)$$

El cálculo de la productividad de la estación de compresores se determina teniendo en cuenta los tres factores antes señalados, o sea: la compensación de las pérdidas, las necesidades higiénico-sanitarias y teniendo en cuenta el tiempo mínimo establecido para el llenado de la cámara y demás elementos.

Para el cálculo se toma el mayor valor de los calculados.

Según las reglas de seguridad, al inicio del descenso de la fortificación la cantidad de aire comprimido que debe llegar a la cámara de trabajo debe ser por lo menos de $20 m^3/h$ y esta cantidad debe ir aumentando a razón de 2,5 % por cada metro que la fortificación descienda por debajo del nivel de las aguas.

Si el método se emplea en rocas arcillosas, es necesario hacer llegar a la cámara de trabajo complementariamente $1 m^3$ de aire comprimido por $1 m^2$ de área del frente.

Por último, la cantidad de aire comprimido puede aumentarse según indicaciones del médico en dependencia del grado de suciedad que tenga el aire.

El gasto de aire comprimido durante el laboreo de pozos por este método como promedio oscila de 30 a $45 m^3/min$.

Descenso de la cámara de trabajo (fortificación - techo móvil)

La construcción de pozos con la protección del frente de trabajo con aire comprimido y la variante de techo móvil de la cámara de trabajo en su etapa inicial, se hace igual que cuando se emplea el método de la fortificación de descenso, como se vio en el capítulo anterior.

Al principio se comienza el laboreo del pozo sin necesidad de usar el aire comprimido; al acercarse el frente de trabajo al nivel de las aguas subterráneas, o a una zona de roca inestable, se inicia el trabajo con el aire comprimido.

En este caso, como en el anterior, durante el descenso de la fortificación (de la cámara de trabajo) actúan fuerzas que ayudan esta acción y fuerzas que se oponen a ella.

En comparación con el método de la fortificación de descenso, aquí a las fuerzas vistas que ayudan el descenso ($g_1 + g_2$) se suman el peso del techo de la cámara de trabajo (g_t) y el peso del sistema de esclusas con el techo de minas (g_e). En este caso la fuerza total G_1 que posibilita el descenso de la fortificación será

$$G_1 = g_1 + g_2 + g_t + g_e \cdot t \quad (IV.11)$$

Las fuerzas opuestas al descenso de la fortificación están dadas por la fuerza de fricción (g_3) que se produce entre la pared de la fortificación, el macizo y la presión excedente de aire comprimido (g_4) que actúa sobre el techo de la cámara. Los valores de g_3 y g_4 se calculan por las expresiones

$$g_3 = F \cdot f, t \quad (IV.12)$$

donde:

F : área de la superficie exterior de la pared, m^2

f : fuerza específica de fricción entre la pared y la roca, t/m^2

$$g_4 = \frac{\pi D_e}{4} P_{exc} \cdot t \quad (IV.13)$$

donde:

D_e : diámetro exterior útil de la cámara, m

P_{exc} : presión excedente de aire comprimido en la cámara de trabajo t/m^2

La fuerza total (G_2) que se opone al descenso será:

$$G_2 = g_3 + g_4 \quad (IV.14)$$

De tal forma el descenso se producirá si $G_1 > G_2$. En caso contrario el descenso se puede lograr aumentando el peso actuante sobre la fortificación o eliminando parcialmente aire comprimido de la cámara de trabajo, con la consiguiente disminución de la fuerza g_4 .

Según la primera variante, o sea, aumentando el peso, éste se puede lograr llenando de agua o arena mojada un tramo de pozo por encima del techo de la cámara de trabajo. El peso que se debe añadir se puede obtener de la diferencia entre G_1 y G_2 .

Según la segunda variante, o sea disminuyendo la presión del aire en la cámara de trabajo, se obtiene una disminución de la magnitud de g_4 .

Es necesario tener presente a la hora de utilizar esta variante la magnitud del empuje de las aguas subterráneas, y valorar la posibilidad de penetración de agua en la cámara; por eso se debe precisar hasta qué magnitud se puede hacer descender la presión en la cámara. Se recomienda que el tiempo en que se disminuya la presión sea el menor posible.

Cuando se vaya a aplicar esta variante, las reglas de seguridad prevén el alejamiento de todo el personal de la cámara de trabajo, quedando sólo el operador ubicado en el sistema de esclusas.

En ocasiones cuando el descenso es forzado, éste se puede producir de forma súbita debido a lo cual la distancia entre el frente y el techo de la cámara se disminuye abruptamente. Por esa causa se recomienda que en estos casos se utilice personal de gran experiencia.

Realización de los trabajos de avance

El laboreo de los pozos bajo la protección del aire comprimido con el techo móvil de la cámara de trabajo, en la primera etapa, se lleva a cabo en la forma habitual al acercarse el frente de trabajo al nivel de las aguas subterráneas, o a la zona de rocas inestables; y se comienza el trabajo bajo la acción del aire comprimido.

El arranque de la roca dentro de la cámara de trabajo se realiza habitualmente con martillos rompedores y es recomendable se inicie desde el centro del pozo hacia la periferia. Cerca de la zapata de la fortificación se deja una capa de roca que no se extrae, de alrededor de 0,5 m de ancho. Después que se extrae toda la roca restante hasta el nivel inferior de la zapata comienza la extracción de la roca debajo de ella, como resultado de lo cual se va hundiendo la fortificación.

La profundidad del paso de avance se toma en rocas inestables de 0,5 m, en tanto que en rocas estables se toma de 1,0 m.

En caso de ser necesario, cuando se atraviesan intercalaciones de rocas fuertes, se permite la utilización de los trabajos de perforación y explosivos. Las cargas de sustancias explosivas se deben calcular solamente para garantizar el mullido de la roca, pero sin que se produzca su lanzado. Según las reglas de seguridad se permiten emplear barrenos

de hasta 0,75 m de profundidad, y el peso de la carga de sustancia explosiva no debe exceder de los 200 g.

La eliminación del agua durante el laboreo de los pozos bajo la protección del aire comprimido no se realiza frecuentemente. En los casos en que la llegada de agua a la cámara no se detiene totalmente, entonces ella se elimina a través de un tubo que se fija en el techo de la misma.

El extremo inferior de este tubo se sumerge en el lugar en que se produce la acumulación del agua.

Por la acción de la presión del aire comprimido, el agua desde la cámara se envía directamente a la superficie o al techo de la cámara, desde donde se bombea a la superficie.

Organización de los trabajos

La determinación del tiempo de trabajo diario y por turnos, del tiempo que invierten los obreros durante la entrada y salida de la cámara de trabajo (pasa a través del sistema de esclusas), se establece acorde a las reglas de seguridad vigentes al respecto, en dependencia de la presión que va a tener el aire comprimido en la cámara de trabajo.

Existen 2 esquemas muy difundidos de organización del trabajo: uno de ellos consiste en dividir el día de trabajo en dos medios turnos, en tanto que el otro se realiza con el trabajo continuo (en un solo turno) pero con duración del trabajo diario menor.

Ejemplos de estas dos variantes de organización se muestran en las Tablas 2 y 3.

IV.2. LABOREO DE POZOS CON EL TECHO FIJO

Cuando se emplea esta variante, la extracción de la roca y la instalación de la fortificación permanente se realizan con el esquema simultáneo de organización del trabajo.

La magnitud del avance, por pasos, oscila desde 0,8 a 3,0 m en dependencia de la estabilidad de la roca, produciéndose el arranque de la roca con el empleo de martillos rompedores por capas de 0,3 a 0,4 m de espesor. Inicialmente por cada capa se arranca la roca correspondiente a la sección útil del pozo y más tarde se completa hasta la sección de proyecto.

Después que se avanza un paso se construye la fortificación permanente.

Tabla 2. Duración del turno de trabajo en dependencia de la presión de aire comprimido

Presión del aire comprimido a la cámara de trabajo, kgf/cm^2	Duración de las diferentes etapas			Número de medios turnos al día	
	Estancia en la cámara de trabajo, h-min	Entrada por el sistema de esclusas, h-min	Salida por el sistema de esclusas, h-min		
0,10 a 1,3	5-28	0-12	0-20	6-00	8
1,31 a 1,7	5-06	0-14	0-40	6-00	8
1,71 a 2,5	4-14	0-18	1-28	6-00	8
2,51 a 2,9	3-48	0-20	1-52	6-00	8
2,91 a 3,2	2-48	0-20	2-12	5-20	9
3,21 a 3,5	2-26	0-22	2-32	5-20	9

Tabla 2 (continuación)

Estancia en la cámara de trabajo	Primer semiturno h-min		Segundo semiturno h-min	
	Entrada por el sistema de esclusas	Salida por el sistema de esclusas	Estancia en la cámara de trabajo	Salida por el sistema de esclusas
2-44	0-06	0-10	2-44	0-06
2-33	0-07	0-20	2-33	0-07
2-07	0-09	0-44	2-07	0-09
1-54	0-10	0-56	1-54	0-10
1-24	0-10	1-06	1-24	0-10
1-13	0-11	1-16	1-13	0-11

Tabla 3. Duración del turno en dependencia de la presión de aire

Presión del aire comprimido en la cámara de trabajo, kgf/m^2	Duración de las distintas etapas de trabajo				
	Estancia en la cámara de trabajo	Duración de la entrada por el sistema de esclusas	Duración de la salida por el sistema esclusas	Duración total del ciclo	Número de turnos al día
0,10 a 1,3	5 - 00	0 - 06	0 - 14	5 - 20	4,5
1,31 a 1,7	4 - 27	0 - 07	0 - 24	4 - 48	5
1,71 a 2,5	3 - 00	0 - 09	0 - 51	4 - 00	6
2,51 a 2,9	2 - 27	0 - 10	1 - 03	3 - 40	6,5
2,91 a 3,2	2 - 05	0 - 10	1 - 10	3 - 25	7
3,21 a 3,5	1 - 32	0 - 11	1 - 17	3 - 00	8

En caso de rocas muy inestables el arranque de la roca se realiza por sectores del frente y la instalación de la fortificación permanente se hace en un orden similar (ver Fig. IV.3).

Al igual que en el laboreo de pozos con el techo móvil, sobre éste se monta el tubo de minas y el sistema de esclusas. En este caso la longitud del tubo de minas es constante y el sistema de esclusa no se desplaza.

Esta variante presenta la ventaja con respecto a la anterior (con el techo móvil) de que no se puede producir el desvío de la fortificación de la vertical, en tanto que como desventaja esencial se le señala la pérdida de la resistencia de la fortificación de hormigón debido a la cantidad de uniones que posee (cada 1,5 a 2,5 m). Esto además puede afectar la hermeticidad de la fortificación ante la penetración del agua.

IV.3. METODO COMBINADO DE LABOREO

Esta variante se emplea raramente, y en todos los casos al inicio se aplica la variante con el techo móvil, después se fija el techo y se continúa el avance por este esquema.

IV.4. ASPECTOS DE LA PROTECCION E HIGIENE DEL TRABAJO A OBSERVAR DURANTE EL LABOREO BAJO LA PROTECCION DEL AIRE COMPRIMIDO

El régimen de trabajo bajo la influencia del aire comprimido puede ejercer una acción desfavorable sobre la salud de los obreros si no son tomadas las medidas pertinentes.

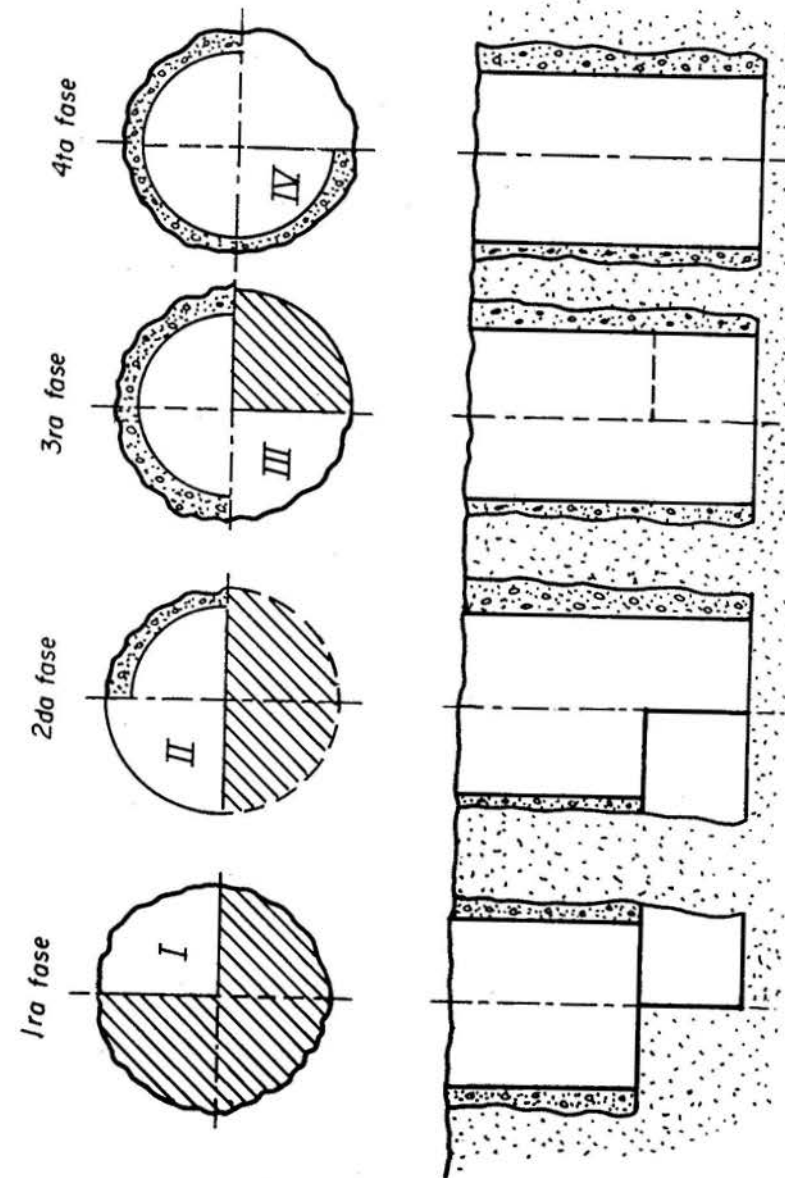


FIGURA IV.3. Orden del arranque de la roca e instalación de la fortificación en rocas muy inestables.

Así, tenemos que durante la estancia de los obreros en la cámara de trabajo por un tiempo (bajo la acción del aire comprimido) se produce la saturación de su organismo con nitrógeno, el cual se disuelve en la sangre, tejidos, en la médula, etc. Si estos obreros pasan de esta presión alta en forma súbita a la atmosférica pueden padecer del llamado mal de los buzos, el cual se manifiesta inicialmente en forma de enrojecimiento de varias parte del cuerpo y agudos dolores de cabeza y en las articulaciones. Por ello se reglamenta el paso a través del sistema de esclusa, previéndose un tiempo del turno de trabajo para esto.

Con fines profilácticos, el régimen diario de los obreros que laboran bajo la acción del aire comprimido es reglamentado, estableciéndose el tiempo de trabajo diario, especialmente en dependencia de la presión que va a existir en la cámara de trabajo.

Los obreros que laboran en estas condiciones deben recibir una atención médica periódica y una alimentación especial.

Para trabajar bajo la acción del aire comprimido sólo se permiten hombres plenamente saludables y con edades que oscilen desde 20 a 45 años.

CAPITULO V

DESCENSO ARTIFICIAL DEL NIVEL DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

Este método especial de laboreo de pozos consiste en que alrededor del futuro pozo se laborean una serie de taladros a través de los cuales se extrae agua, como consecuencia de lo cual se provoca artificialmente el descenso del nivel de las aguas subterráneas, formándose el llamado embudo de depresión, que como es lógico debe coincidir con el pozo (ver Fig. V.1).

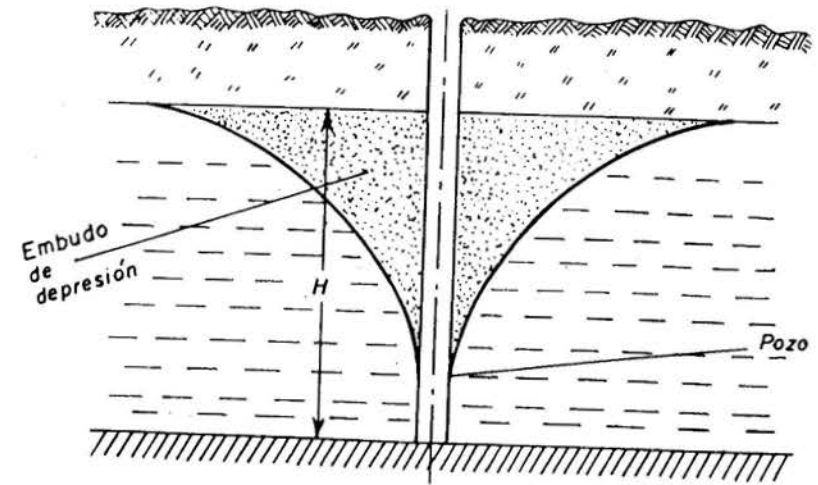


FIGURA V.1. Esquema del descenso artificial de las aguas subterráneas.

Este método puede ser utilizado tanto en macizos rocosos estables como en macizos de rocas débiles, preferiblemente en rocas de litología homogénea que faciliten la formación del embudo de depresión.

Al formarse el embudo de depresión el pozo se puede laborear en rocas secas. Un total "secado" de las rocas puede ser sólo alcanzado en macizos de rocas fuertes agrietadas; en caso de rocas débiles acuíferas siempre va a quedar en ellas un residual de agua.

Con respecto a la disposición de los taladros de drenado lo más habitual es que ellos se dispongan circularmente alrededor del futuro pozo, aunque pueden disponerse de otras formas.

Este método puede tener sus variantes, así tenemos que: en caso de existir excavaciones subterráneas ubicadas en las zonas del pozo, se pueden hacer barrenos hasta ellas con el objetivo de que el agua se desplace hacia dichas excavaciones; otra variante es que existan zonas de rocas permeables y a través de taladros el agua se eleve hasta allí.

Tanto una como otra variante no se presentan a menudo, ya que necesariamente para que esto tenga lugar tendría que coincidir el lugar de ubicación del pozo con una de dichas soluciones.

La elección del esquema de disminución artificial del nivel de las aguas subterráneas se realiza a partir de una serie de factores tales como: el cálculo del número de instalaciones para el descenso, la disposición en el plano de estas instalaciones, la magnitud del nivel estático de las aguas subterráneas, la altura residual de la columna de agua en la zona desecada, el flujo de agua hacia los taladros de drenaje y el tiempo necesario para formar el embudo de depresión.

A partir de los cálculos anteriores se procede a elegir la construcción de los taladros de drenaje y el tipo de bombas.

En los cálculos, el coeficiente de filtración se toma como la media ponderada de los ensayos realizados. Para el caso de una litología heterogénea del macizo, pero con variaciones del coeficiente de filtración que no sean mayores que 10 veces, se recomienda emplear el coeficiente de filtración, obtenido por la siguiente expresión:

$$K_f^o = \frac{K_f^1 \cdot M_1 + K_f^2 \cdot M_2 + \dots + K_f^n \cdot M_n}{M_1 + M_2 + \dots + M_n} \text{ m/s} \quad (V.1)$$

siendo:

K_f^1, K_f^2, K_f^n : los coeficientes de filtración de las distintas capas de roca

M_1, M_2, \dots, M_n : potencia de las diferentes capas

Habitualmente cuando se laborean pozos, el manto acuífero se atraviesa en su totalidad, o sea en toda su profundidad. Por esta razón, la disminución del nivel de las aguas en los taladros se toma igual a la altura de la columna de agua.

El radio R_I de influencia de toda la instalación (grupo de taladros) de drenado, para el caso en que ellos se distribuyan circularmente, se determina por la relación:

$$R_I = R_i + r_1 \quad M \quad (V.2)$$

donde:

R_i : radio de influencia de cada taladro

r : radio de ubicación de los taladros de drenado

El radio R_i de influencia de cada taladro se toma de los datos de la exploración hidrogeológica.

En caso de no obtenerse su magnitud por dicha vía, se puede calcular orientativamente promediando los valores obtenidos del uso de las siguientes expresiones:

$$R_i = 2 S \sqrt{M \cdot K_f} \text{ , m} \quad (V.3)$$

y

$$R_i = 10 S \sqrt{K_f} \text{ , m} \quad (V.4)$$

donde:

S : disminución del nivel de agua en el barreno, n

K_f : coeficiente de filtración, m/s

M : potencia de la capa de agua, m

Con respecto al valor de r , en el caso en que los taladros se dispongan circularmente, su magnitud sería igual al radio de dicho círculo; en otros casos se determina según la forma de distribución de los taladros.

El débito Q que se produce en un taladro se calcula para diferentes situaciones por las expresiones:

Para una capa homogénea:

Cuando existe empuje:

$$Q = \frac{2,73 K_f \cdot M_e S}{\log R_I - \log r_i} \text{ , m}^3/\text{h} \quad (V.5)$$

Cuando no hay empuje:

$$Q = \frac{1,36 K_f (2H_i - S)}{\log R_I - \log r_i} \text{ , m}^3/\text{h} \quad (V.6)$$

donde:

M_e : potencia de la capa de agua donde existe empuje, m

r_t : radio del taladro, m
 H_i : altura inicial de la columna de agua, m

Para una capa heterogénea:

Cuando existe empuje:

$$Q = \frac{2,73 K_f^1 M \cdot S}{\log R_f - \log r_t}, \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{V.7})$$

Cuando no hay empuje:

$$Q = \frac{1,36 K_f^1 (H_i - h_f^2) S}{\log R_f^1 - \log r_t}, \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{V.8})$$

donde:

h_f : pérdida de empuje que sufre el agua

A partir del débito que se produce en cada taladro y con el número de taladros que se usan (N) se puede conocer el débito total.

$$Q_t = NQ, \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{V.9})$$

La altura h_o de la columna residual de agua y el descenso de las aguas S_o en el centro de la zona deseado (en el embudo) se pueden determinar por diferentes expresiones, en dependencia del número de taladros utilizados. Por ejemplo, para 3 o 4 taladros pueden ser utilizadas las expresiones:

Para cuando hay empuje:

$$h_o = \frac{H_i - NQ \log \frac{R_f}{r_t}}{2KM_o}, \text{ m} \quad (\text{v.10})$$

$$S_o = \frac{N \cdot Q \log \frac{R_f}{r_t}}{2K_f M_o}, \text{ m} \quad (\text{V.11})$$

Para el caso en que no exista empuje:

$$h_o = \sqrt{H_i - \frac{n Q \log \frac{R_f}{r_t}}{\pi K_f}}, \text{ m} \quad (\text{V.12})$$

$$S_o = \frac{n Q \log \frac{R_f}{r_t}}{K_f}, \text{ m} \quad (\text{V.13})$$

La confirmación final del número necesario de taladros se puede hacer por el método denominado de "Aproximación sucesiva", procediéndose de la siguiente forma: inicialmente para el cálculo del débito se recomienda un número de taladros; a partir de esto se calcula el débito de cada taladro y para cada horizonte o capa acuífera. Después se procede a calcular los valores de h_o y S_o .

Si estos valores no son los necesarios el cálculo se va precisando hasta que se define qué número de taladros da los valores deseados de S_o .

Durante el laboreo de pozos, con el descenso artificial de aguas subterráneas, son utilizados filtros de diferentes construcciones, tales como: tuberías perforadoras con agujeros circulares o de otras formas, tuberías recubiertas por rejillas o tejidos, y filtro de construcciones especiales. La construcción y el material de que se hace el filtro, su longitud de cálculo y cantidad de agujeros va a depender de las propiedades físico-mecánicas y condiciones hidrogeológicas de la roca.

En gran medida el éxito de los trabajos en los pozos con el descenso artificial de las aguas viene dado por la posibilidad de mantener una eliminación permanente del agua.

Una condición muy desfavorable para el laboreo de pozos, con el descenso artificial de las aguas, lo constituye la existencia de un conjunto de capas de roca (incluyendo el caso en que en una o varios exista empuje), ya que en esta situación en los límites entre capas siempre quedan zonas de rocas sin ser secadas totalmente.

Cuando se realiza la eliminación del agua en rocas que posean bajo coeficiente de filtrado, ella va a arrastrar consigo pequeñas partículas de roca. Como resultado de esto, alrededor del pozo se pueden ir formando vacíos los cuales dificultan los trabajos, pueden producir deslizamiento y afectar la fortificación.

Muchas veces en la práctica, este método se emplea en combinación con otros métodos especiales; así, por ejemplo, cuando se combina con el método de laboreo bajo la protección del aire comprimido, la disminución del empuje hidrostático (por el descenso del nivel de las aguas) hace posible disminuir la presión del aire comprimido en la cámara de trabajo; por consiguiente se mejoran las condiciones de trabajo de los obreros y se puede aumentar la profundidad de laboreo con el método.

CAPITULO VI

FORTALECIMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

El estudio de los diferentes métodos de fortalecimiento del macizo rocoso se debe hacer a partir de la clasificación de dichos métodos, cosa que permite sistematizar la tarea.

En general, todos los métodos de fortalecimiento del macizo se pueden ubicar en dos grandes grupos: los físicos y los fisico-químicos. Los métodos físicos a su vez se dividen usualmente en tres grupos: los hidráulicos (se basan en el secado de las rocas), los mecánicos (métodos de densificación, paredes de apoyo, anclado, pilotaje y otros) y los térmicos (congelación). Dentro de los métodos físicos están aquellos que sólo producen variación en las propiedades físicas de las rocas.

En relación con los métodos fisicoquímicos de fortalecimiento estos son los que producen en las rocas transformaciones químicas con la variación de sus propiedades físicas.

Entre los métodos fisicoquímicos más utilizados tenemos: la silicatización, el fortalecimiento electroquímico, la fusión y otros.

De los métodos de fortalecimiento del macizo rocoso, el más difundido es la cimentación, dicho en forma más general al taponamiento de las rocas, método que por su importancia y difusión será estudiado independientemente en el capítulo siguiente.

VI.1. FORTALECIMIENTO QUIMICO DE LAS ROCAS

Este método se fundamenta en el proceso natural de formación de las areniscas y conglomerados, durante el cual los granos de arena se van uniendo entre sí mediante diferentes sustancias aglutinantes.

El método de silicatización consiste en inyectar en la roca desligada en forma sucesiva dos soluciones: una de vidrio líquido y otra de cloruro de calcio. Como resultado de la interacción se forma un hidrogel de ácido

silícico con características insolubles, el cual rellena poros e intersticios del macizo y después de su endurecimiento cementa las diferentes partes.

Para lograr una mayor difusión de la solución de vidrio líquido, al ser inyectada en el macizo o terreno que se desea fortalecer, ella se debe calentar a una temperatura de 60 a 70°.

Para la silicatización de las rocas se recomienda emplear un vidrio líquido con un módulo de 2,4 a 3,0, o sea con la relación siguiente:

$$\frac{S_1O_2}{Na_2} = 2,4 \text{ a } 3,0$$

La silicatización se puede realizar en un solo paso, inyectando al macizo o terreno vidrio líquido con agregados ácidos. Estos agregados se le añaden al vidrio líquido momentos antes de su inyección.

A partir de los resultados obtenidos con el empleo de estas dos variantes del método de fortalecimiento químico (silicatización) se recomienda:

Emplear la variante escalonada para valores del coeficiente de filtración de la roca de 2 a 80 m/día y un pH inferior a 9 y la variante en un solo paso para rocas con coeficientes de filtración de 0,5 a 5,0 m/día y un pH inferior a 7.

El método estudiado posee las siguientes desventajas:

- Costo
- Laboriosidad
- Imposibilidad de verificar en forma preliminar el resultado de los trabajos.

Este método se emplea fundamentalmente para fortalecer los subcimientos de distintas construcciones, y en ocasiones para hacer más densa la fortificación de las excavaciones.

Como método independiente para el fortalecimiento previo del macizo la silicatización prácticamente no se emplea.

VI.2. FORTALECIMIENTO ELECTROQUIMICO

Este método fundamentalmente se emplea en rocas arcillosas, y consiste en someter al terreno o macizo que se quiere tratar a la acción de un flujo eléctrico constante.

Para este fin en la roca se introducen electrodos metálicos (el ánodo de aluminio y el cátodo de cobre) y entre estos electrodos se pasa un flujo eléctrico. Como resultado de la acción de este flujo eléctrico, la roca o terreno arcilloso se densifica.

La esencia del fenómeno físicoquímico que ocurre en el macizo arcilloso durante su fortalecimiento por el método mencionado, no está totalmente aclarada; no obstante esto, se conoce que al paso de la corriente por la roca arcillosa se produce en ella un acomodamiento de sus partículas; además, y como resultado del proceso electrolítico, se produce la unión del aluminio y la alúmina, lo cual provoca una acción en la roca del tipo de la que produce el hidroaluminato de calcio en el proceso de fraguado del cemento.

Durante el proceso de fortalecimiento electroquímico, la roca arcillosa pierde de un 30 a un 40 % de su humedad, y en períodos posteriores, a pesar de que se sature de agua, sus propiedades no varían.

Este método en el campo que nos ocupa no ha encontrado difusión.

VI.3. FORTALECIMIENTO TERMICO DE LAS ROCAS

Este método se emplea hace bastante tiempo para el fortalecimiento de los terrenos arcillosos débiles en los que se construyen caminos, cimentaciones de diferentes obras; este método también se usa para luchar contra deslizamientos, entre otros.

Son conocidas tres formas de fortalecimiento térmico de la roca arcillosa:

- Mediante la transmisión directa del calor.
- Mediante la inyección bajo presión en el terreno de aire preliminarmente calentado a una temperatura de 600 a 800 °
- Mediante el quemado de cualquier combustible en taladros u otros vacíos cuyas bocas se cierran. Estos taladros o vacíos están ubicados en la zona que se quiere fortalecer.

La roca varía sus propiedades debido a que los productos volátiles formados por la acción térmica se desprenden a la atmósfera.

El método térmico más efectivo es el último de los citados. La duración del proceso de fortalecimiento térmico de las rocas arcillosas depende de las características de permeabilidad gaseosa del terreno y como promedio oscila de 100 a 180 horas.

VI.4. FORTALECIMIENTO POR MEDIO DE LA FUSION ELECTRICA

La esencia de este método consiste en que el terreno arenoso acuñero se funde y se transforma en vidrio a una temperatura de 1 700 a 1 800 °C, esto se logra debido al calor que se obtiene a partir de la energía eléctrica al hacer pasar la corriente entre los electrodos del calentador.

Después de enfriada la masa fundida se forma un material vídrio monolítico, que posee una alta resistencia, es impermeable y estable ante la acción de aguas agresivas.

Para realizar la fusión preliminar de capas de terrenos arenosos que rodean un pozo es necesario, en primer término definir la ubicación de los taladros y después la profundidad de colocación de los calentadores.

El tiempo necesario para que se forme alrededor del pozo la zona de roca (arena) fundida, va a depender de una serie de factores, tales como: distancia entre calentadores (taladros), temperatura a la que se realiza la fusión y régimen de calentado de la roca, entre otros.

Uno de los aspectos que tiene en su contra el método es el gran gasto de energía que su empleo exige. A partir de los experimentos a escala piloto realizados se obtiene que por 1 m de excavación se gastan de 5 000 a 6 000 kw/h. Este método aún no ha recibido difusión.

CAPITULO VII

TAPONAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

Se recomienda emplear este método cuando la excavación va a atravesar un macizo de roca relativamente fuerte, agrietada y porosa, en donde se producen grandes afluencias de agua que dificulten significativamente el laboreo de la excavación.

El método consiste en el llenado artificial de las grietas, poros y demás vacíos del macizo con distintos materiales de taponamiento, con el objetivo de impedir el paso del agua hacia el sector donde se laboreo la excavación y de aumentar la estabilidad del macizo.

En dependencia de las características del macizo acuífero, para el taponamiento se pueden emplear diferentes materiales, tales como: cemento, arcilla, betúmenes, silicatos, resinas sintéticas y combinaciones de ellas.

Esta gran densidad de variantes está dada por el hecho de que no existe un método universal para el aislamiento de los macizos (que como se conoce tienen muy diversas propiedades), por lo que las variantes mencionadas van a ser más o menos efectivas en dependencia de las condiciones de aplicación.

En la Tabla 4 se dan las condiciones más favorables de empleo de cada una de las variantes mencionadas.

Se diferencian dos formas de realizar el taponamiento, en dependencia del momento en que éste se realiza (Fig.VII.1): el preventivo, hecho antes del laboreo de la excavación (Fig. VII.1.a) y el posterior, que como su nombre lo indica, se efectúa después de la excavación (Fig. VII.1.b).

El taponamiento preventivo puede realizarse tanto desde la superficie como desde el frente de trabajo.

La conveniencia de la utilización de una u otra posibilidad durante el laboreo de los pozos, depende de la profundidad a que se encuentra la zona acuífera del macizo y se debe definir a base de los cálculos técnico-económicos.

Por su parte, el taponamiento posterior se realiza generalmente por taldros hechos detrás de la fortificación del pozo y muy raramente por taldros hechos desde la superficie.

Tabla 4. Campo de empleo de los materiales de taponamiento

<i>Tipo de material</i>	<i>Condiciones minero-geológicas</i>
Cemento	Macizo rocoso agrietado con abertura de las grietas de por lo menos 0,15-0,2 mm y velocidad de las aguas subterráneas menor de 600 m por día. En caso de aguas agresivas, es necesario emplear cementos especiales
Arcilla	Si se emplea una arcilla finalmente dispersa, para las mismas condiciones del cemento
Betúmenes	Macizo rocoso con abertura de las grietas de por lo menos 0,6 mm. La presión hidrostática de las aguas subterráneas no debe sobrepasar 0,2 MPa y la velocidad de las aguas subterráneas no se limita
Silicatos	Rocas arenosas con un coeficiente de filtración de 2 a 80 m/día y velocidad de las aguas subterráneas menor de 5 m/día; aguas con un pH < 9
Resinas sintéticas	Macizos agrietados y porosos conformados por rocas con un coeficiente de filtración de 0,5 a 50 m/día

El taponamiento preventivo durante el laboreo de pozos a través de macizos agrietados y acuíferos es el método más usado en una serie de países (Alemania, Canadá, República Sudafricana y otros) para la lucha contra la afluencia de agua durante los trabajos.

Por ejemplo, en Alemania es el 80 % de los casos de laboreo de pozos (en estas condiciones) se emplea dicho método, al igual que en Inglaterra, en tanto que en la República de Sudáfrica la utilización de este método es aún mayor.

Para evaluar la utilidad de empleo y determinar los parámetros tecnológicos del taponamiento, es necesario estudiar una serie de factores que se consideran esenciales, tales como: permeabilidad del macizo, grado de agrietamiento y abertura de las grietas, composición química, velocidad y empuje de las aguas subterráneas, entre otros.

El proyecto de los trabajos de taponamiento durante el laboreo de los pozos debe contener los siguientes aspectos:

1. Caracterización de la composición geológica de las rocas que atraviesa el pozo, estudio hidrogeológico y valoración sobre la composición de las aguas (grado de agresividad).
2. Gráficos con las dimensiones y formas del pozo, las mediciones de las dimensiones de cortina de aislamiento, tanto el ancho como la profundidad.

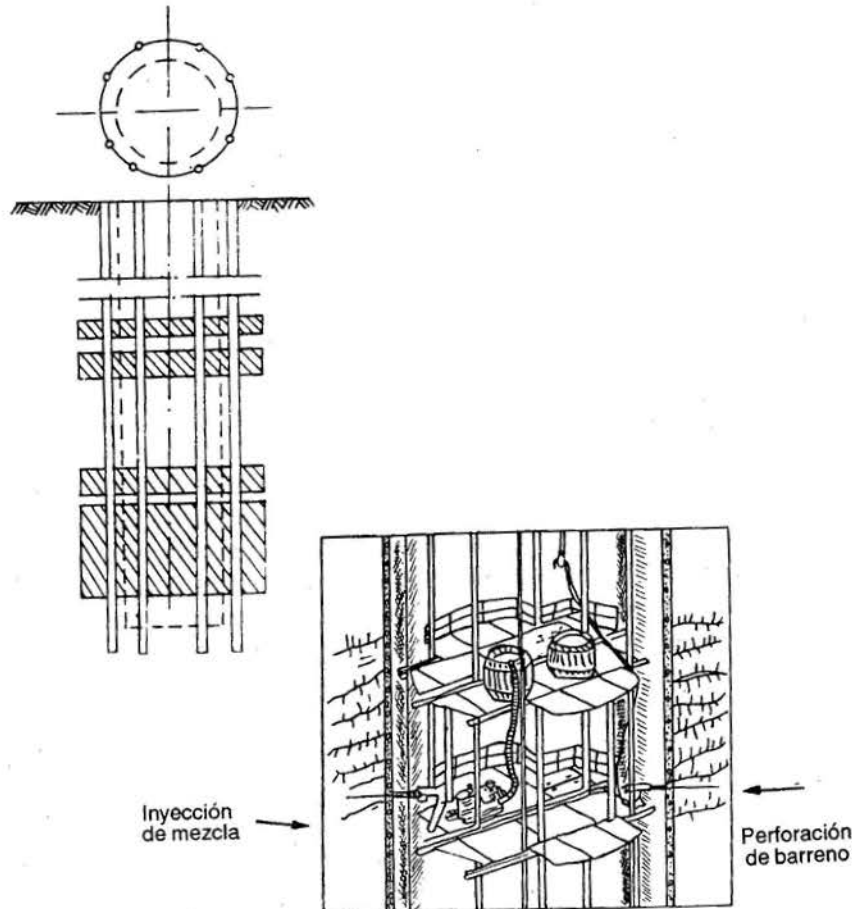


FIGURA VII.1. Formas de taponamiento. a) taponamiento preventivo, b) taponamiento posterior.

3. Gráficos que caracterizan la disposición de los taladros de taponamiento, señalándose su diámetro y distancia entre ellos. Se debe señalar la ubicación de los taladros de control.
4. Gráfico con las instalaciones y equipos especiales usados en las labores de taponamiento.
5. Los resultados de los trabajos de laboratorio que posibilitan una adecuada elección del material de taponamiento.
6. Condiciones técnicas en las que se va a realizar el trabajo.

Una organización correcta de los trabajos de taponamiento sólo es posible cuando se ha realizado una evaluación cuantitativa y cualitativa lo suficientemente detallada del agrietamiento del macizo y de la porosidad de las rocas.

VII.1. MATERIALES USADOS PARA EL TAPONAMIENTO

Para el taponamiento de las grietas y otros vacíos del macizo rocoso son usados diferentes materiales, tales como: mezclas de cemento, arcillas, silicatos, betúmenes, resinas sintéticas y diversas combinaciones entre ellas.

La función del taponamiento puede ser múltiple (puede cumplir varios objetivos simultáneamente), pero siempre se realiza la elección de la mezcla en función de la actividad principal que se proyecta.

El mayor grupo de soluciones usadas para el taponamiento son a base de sustancias inorgánicas, particularmente de cemento, en tanto las soluciones a base de sustancias orgánicas (resinas sintéticas) son menos utilizadas. En los últimos años, se ha difundido el empleo de soluciones combinadas de taponamiento (sustancias inorgánicas con la adición de polímeros).

Todas las sustancias usadas en el taponamiento en dependencia de la forma final que ellas toman en el macizo se dividen en dos grandes grupos: los que como consecuencia de un proceso físicoquímico se transforman en una piedra, y los que aumentan su cualidad de resistencia, pero sin cambiar su estado.

Según su densidad las soluciones taponantes se pueden dividir en: *ligeras*, con una densidad menor que $1,3 \text{ g/cm}^3$; *medianamente ligeras*, con una densidad que oscila de $1,3$ a $1,7 \text{ g/cm}^3$; *de densidad normal* (de $1,70$ a $2,00 \text{ g/cm}^3$); *algo pesados*, con una densidad mayor que $2,2 \text{ g/cm}^3$.

Según la velocidad con que se realiza el proceso de su endurecimiento, las soluciones taponantes se dividen en: las que endurecen muy rápido (se inicia el proceso antes de 40 minutos); las que endurecen rápido (el proceso se inicia en un intervalo de 40 a 80 minutos); las que tienen un

proceso normal de endurecimiento (el proceso de endurecimiento tarda en iniciar desde 1 hora 20 minutos a 2,0 horas), y las que tienen un lento proceso de endurecimiento (el proceso de endurecimiento no se inicia antes de las 2 horas).

A la hora de elegir las sustancias o soluciones de taponamiento que se van a utilizar, hay que tener en cuenta una serie de exigencias planteadas a ellas y que se dividen en técnicas, tecnológicas y económicas.

Exigencias técnicas: Se condicionan a la posibilidad de que la solución o mezcla empleada haga su función fortalecedora y aisladora; según esto estas mezclas deben:

- Formar en las grietas y vacíos del macizo un material de taponamiento que sea impermeable (para los líquidos y también para los gases si el caso lo requiere).
- Durante el proceso de endurecimiento tener poco o ningún asentamiento y que no se produzcan grietas.
- Realizar un proceso fortalecedor en el macizo agrietado.
- Poder penetrar en las microgrietas y poros, al mismo tiempo no salirse de los vacíos grandes a causa de su propio peso.
- Poseer una buena adhesión con el macizo rocoso.
- Poseer una buena movilidad y conservar esta propiedad durante el tiempo previsto para la labor de taponamiento, y después de esto ser capaz de endurecer rápidamente.
- No accionar sobre las rocas circundantes, ni sobre el agua subterránea, afectando sus propiedades. Ser estable ante la acción de dichas aguas.
- No variar sus cualidades de aislación a causa de la temperatura.

Exigencias tecnológicas: Se condicionan por la necesidad de realizar el proceso de taponamiento en forma simple y segura; según esto las mezclas usadas por el taponamiento deben:

- Poder bombearse fácilmente.
- Poseer una densidad no muy alta.
- Poseer propiedades reológicas regulables.
- Ser un material inerte (tanto en forma de producto inicial, como al final).
- No ser tóxico.
- Permitir la combinación con otras mezclas.

La observancia de las exigencias señaladas condiciona en gran medida la efectividad técnico-económica del taponamiento.

No obstante esto, hay que tener en cuenta las siguientes exigencias de índole económica.

- La mezcla o solución usada no debe ser deficitaria ni costosa.
- No debe perder cualidades en sus propiedades durante su conservación.

Obtener una solución o mezcla de taponamiento que satisfaga por igual a todas las exigencias antes planteadas, prácticamente es imposible. Por esta razón es de gran importancia conocer bien las condiciones ingeniero-técnicas de la región en que se va a efectuar el taponamiento y definir bien el objetivo que éste persigue, lo cual permite colocar algunas de las exigencias antes vistas en un primer nivel, y a otras darles un carácter secundario.

VII.1.1. Mezclas cementantes

Como aglutinante para la conformación de estas mezclas, lo más difundido es el uso del cemento Portland, aunque en ocasiones, en dependencia de las condiciones en que se va a efectuar el proceso de endurecimiento de la mezcla de taponamiento, es necesario el empleo de cementos especiales.

La resistencia que se obtenga de la piedra de cemento, producto del endurecimiento de la mezcla de cemento durante el taponamiento no posee tanta importancia, como en el caso de las mezclas usadas para preparar hormigones. Esto se debe a que la cortina de cementación que se crea alrededor del pozo durante el taponamiento posee un gran espesor, y la piedra de cemento que se forma en estos casos en las grietas y vacíos del macizo trabaja conjuntamente con él.

En el proceso de taponamiento, las soluciones cementadas en una primera etapa conforman una mezcla mecánica de cemento, agua y algún aditivo; más tarde esta mezcla adquiere propiedades de un líquido viscoso y por fin en la última etapa se convierte en la piedra de cemento.

El éxito de la operación de cementación depende tanto de las propiedades que tenga la mezcla cementante (en su estado fluido), como de las propiedades que ella va a poseer cuando se transforma en la piedra de cemento. En la primera etapa, sobre este aspecto tienen una gran incidencia la viscosidad y la estabilidad de la mezcla o solución.

El tiempo de fraguado de la mezcla posee una gran influencia sobre el resultado del proceso de cementación. Un tiempo de fraguado excesivamente pequeño de la mezcla trae consigo dificultades en su bombeo, e incluso en determinados casos puede provocar averías. Por el contrario, si el tiempo de fraguado es mucho, se disminuye la velocidad del proceso de taponamiento, debido a que se aumenta el tiempo que transcurre desde la inyección de la mezcla hasta el momento en que se perforan los taladros de control del proceso.

Sobre el proceso de endurecimiento de la mezcla ejercen influencia la composición química y temperatura de las aguas subterráneas, la relación agua-cemento y la presión de inyección de la mezcla. La composición química de las aguas puede influir en diferentes formas sobre la duración del proceso de endurecimiento (disminuirlo o aumentarlo), en tanto que el aumento de la temperatura de estas aguas y el aumento de la presión de inyección como regla producen su disminución.

Durante el proceso de cementación, es necesario considerar la estabilidad química que va a tener la cortina de cemento ante la acción de diversos medios agresivos, tales como: ácido carbónico libre, aguas sulfatadas, salmueras concentradas en las zonas de contacto de yacimientos potásicos y otras.

En dependencia de las condiciones en que va trabajar esta cortina, para la preparación de la mezcla de taponamiento se utilizan una serie de cementos especiales cuya aplicación es para casos concretos. Así tenemos:

Portland de escoria: Se usa en casos de aguas subterráneas sulfatadas, ya que posee una mayor estabilidad ante ellas que el Portland normal.

Mezclas de cemento-arena: Se emplea para el taponamiento de grandes vacíos y grietas, también para el rellenado de espacios trabajados con el objetivo de disminuir el gasto de cemento.

Cementos aligerados: Se caracterizan por una relación agua-cemento alta y por contener aditivos minerales activos (por ejemplo: bentonita, diatomita y otros). Estos aditivos poseen una alta superficie específica, y absorben el agua y el aire conservando gran cantidad de estos componentes al formarse la piedra de cemento.

Cementos expansivos: El aumento del volumen del cemento al endurecerse conduce a un mejor contacto de éste con el macizo. Para la obtención de este cemento, habitualmente se usa una mezcla que contiene entre un 80 y un 85 % del Portland normal, y entre un 15 y un 20 % de una mezcla yeso-arcilla.

Otros cementos especiales usados en el taponamiento son el puzolánico, el de baja higroscopicidad, etcétera.

Los cementos especiales pueden ser elaborados en las propias fábricas de cemento o en instalaciones de molienda-clasificación ubicadas cercanas al lugar de los trabajos de taponamiento.

VII.1.2. Mezclas arcillosas

La esencia física del empleo de soluciones arcillosas para la formación de cortinas que impiden el paso del agua hacia las excavaciones, vie-

ne dada por las características tixotrópicas de la arcilla. Cuando se rellenan las grietas y poros del macizo rocoso con soluciones arcillosas, éstas adquieren una estructura interna resistente caracterizada por la magnitud de la resistencia estática al cortante. Otro factor que ayuda a este proceso es el hinchamiento que sufre la arcilla, lo cual hace que la cortina sea más impermeable.

Cuando se van a rellenar grandes vacíos a la solución arcillosa se deben añadir coagulantes, lo que acelera el proceso de asentamiento de partículas arcillosas. Como coagulante es utilizado habitualmente el cloruro de calcio.

El mecanismo de aislamiento del macizo rocoso con soluciones arcillosas, se puede representar como un proceso de formación en los vacíos de redes estructurales conformados por las partículas arcillosas. Estas redes estructurales son capaces de ofrecer una alta resistencia hidráulica al paso del agua.

Estas redes deben poseer una resistencia mecánica similar a la resistencia al cortante (como se señaló antes); esto, como es lógico, depende de la composición mineralógica de la solución y se obtiene para una determinada concentración de ella.

Por ejemplo, para soluciones caolínificas, esta resistencia se alcanza para concentraciones superiores a un 4 %.

Otro aspecto a tener en cuenta para garantizar un efectivo taponamiento es la correcta elección de las dimensiones de la fase sólida. El rellenado de los poros por una solución arcillosa sólo es posible cuando las dimensiones de las partículas sólidas sea menor que la de los poros vacíos del macizo rocoso.

Con respecto al criterio de que en cuánto debe ser menor el diámetro de la partícula con respecto al de los poros, existen diferentes criterios, siendo el más aceptado el que plantea que la partícula tenga, cuando más, un tercio del diámetro del poro o vacío.

La densidad de la solución arcillosa se elige en dependencia de las características y dimensiones de las grietas y vacíos que se van a rellenar. En caso de grandes grietas y vacíos se recomienda utilizar una solución arcillosa de alta densidad (hasta de $1\ 400\ \text{kg/m}^3$).

VII.1.3. Mezclas betuminosas

El método de betumenización se fundamenta en la penetración en las grietas y poros del macizo del betumen en un estado líquido-viscoso (en forma de emulsión o pasta).

El método de betumenización puede ser utilizado en frío y en caliente. Para el caso que nos ocupa (o sea, el rellenado de vacíos y grietas con

vista a formar una cortina impermeable que impida el paso del agua hacia la excavación), se utiliza el método en frío; generalmente el método en caliente se emplea para el fortalecimiento de las areniscas.

La composición de los betúmenes es bastante compleja, pudiéndose diferenciar en ellos los siguientes componentes: asfaltos, óxidos y anhídridos de asfaltos, aceites, resinas y carbonos.

La densidad de los betúmenes oscila desde 0,70 a 1,3 kg/cm³.

Ellos poseen una estabilidad relativa al calentarse hasta una determinada temperatura; el grado de estabilidad se determina por la variación de sus propiedades y la pérdida de masa.

Los betúmenes poseen plasticidad, la cual se caracteriza habitualmente por su ductibilidad y su viscosidad relativa.

Los betúmenes son estables ante la acción de aguas agresivas y de aguas con grandes velocidades de desplazamiento.

El conjunto de propiedades vistas hace que los betúmenes sean materiales aglutinantes efectivos, cuyo empleo en el fortalecimiento de terrenos está muy difundido.

Para la formación de cortinas aislantes en el macizo rocoso, preferentemente son usadas soluciones de betúmenes similares a las que se aplican en la construcción de vías.

Durante el proceso de betumenización en rocas agrietadas, el enlace entre la solución y las paredes de las grietas o vacíos se obtiene a cuenta de la cohesión y la densificación de la solución que se alcance, así como de la fricción.

En los casos en que la cohesión es débil o no se alcanza, la fuerza de fricción es insuficiente, y para presiones de agua en los vacíos y grietas de alrededor de los 0,25 a 0,30 MPa la solución de betumen fluye de las grietas.

Para combatir este efecto, se añaden a la solución de betumen diversos compuestos (parafina tecnológica, entre otros), los cuales en determinadas concentraciones posibilitan que la solución de betumen pueda resistir magnitudes mayores del empuje de las aguas.

VII.1.4. Soluciones de silicato

Para el fortalecimiento del macizo y la creación de cortinas aislantes, la mayor difusión la ha recibido el silicato de sodio (Na₂S₁O₃), que es una solución líquida denominada vidrio líquido.

El silicato de sodio se obtiene mediante la fusión, a temperaturas de 1 000 a 1 500 °C, de la arena de cuarzo con carbonatos o sulfato de sodio.

Las principales características del vidrio líquido son su módulo y su densidad. Se denomina módulo del vidrio líquido *N* a la reacción molecular entre S₁O₂ : Na₂O .

La solución de vidrio líquido tiene un carácter fuertemente básico y se mezcla con el agua.

La viscosidad del vidrio líquido va a depender de la cantidad de agua existente en solución.

Para los trabajos de taponamiento se recomienda utilizar vidrio líquido con un módulo (*N*) de 2,6 a 3,5 y una densidad de 1 300 a 1 450 kg/m³.

VII.1.5. Soluciones a base de resinas sintéticas

Las resinas sintéticas (polímeros) tienen la cualidad de poseer alta resistencia, y a la vez propiedades elásticas. Ellas poseen la capacidad de formar en el macizo rocoso una cortina de impermeabilización resistente y durable.

Estos polímeros pueden obtenerse por dos métodos; la polimerización y la policondensación. El empleo para el taponamiento del macizo rocoso de resinas (polímeros), formadas en el proceso de polimerización es dificultoso debido a la sensibilidad que ellos presentan, en tanto que el uso de los polímeros obtenidos a partir de policondensación es mucho más factible, ya que no presentan la dificultad señalada.

La correcta elección del polímero a utilizar en cada caso concreto en gran medida determina la efectividad del taponamiento. Las resinas sintéticas que se van a usar para el taponamiento deben satisfacer los siguientes requisitos:

- Garantizar una buena cohesión con el macizo.
- Actuar en forma activa, garantizando una buena interacción polímero-macizo.
- Poseer alta estabilidad.
- Tener bajo costo.
- Garantizar un buen trabajo en las temperaturas previstas.
- Producir el asentamiento adecuado.

VII.1.6. Soluciones a base de arcilla y cemento

En los últimos años la solución de arcilla-cemento ha recibido una amplia difusión en las tareas de taponamiento durante la construcción de minas.

Esta solución se caracteriza por poseer una alta consistencia, y en su composición entran: arcilla, cemento, agregados y líquido solvente. Un

aspecto significativo en esta solución de taponamiento es que en su composición sólo entre de un 10 a un 15 % de cemento.

Las altas cualidades tecnológicas que posee esta solución permiten realizar el taponamiento, tanto en grietas con pequeñísimas aberturas (décimas de milímetro) hasta en grietas con más de 1 m de abertura.

La arcilla como base fundamental de esta solución influye en forma significativa en sus cualidades aislantes, disminuyendo el coeficiente de filtración y aumentando la estabilidad ante la acción de aguas agresivas.

Las principales cualidades que posee esta solución de arcilla-cemento como material taponante son:

- No es tóxica y no ejerce ninguna afectación sobre el organismo humano.
- No se disuelve bajo la acción del agua.
- Durante su movimiento no es afectada su consistencia, por lo que se excluye la posibilidad de su fraguado en las tuberías.
- Adquiere una alta resistencia plástica en un corto tiempo.
- Después del endurecimiento, esta "solución" se muestra como un cuerpo plástico, cuya estructura resiste movimientos tectónicos y las cargas por los trabajos de voladuras.
- Alcanza una buena cohesión con el macizo.
- Permite economizar (en comparación con la solución de cemento), de un 85 a un 90 % de cemento, conteniendo en calidad de elemento fundamental la arcilla.
- Se caracteriza por su fácil preparación y alto tecnologicismo durante la construcción de la cortina aislante.
- Es un material taponante barato.

El proceso tecnológico de preparación de esta solución de arcilla-cemento consta de dos etapas: 1ra: la obtención de la solución de arcilla con los parámetros necesarios, y 2da: la preparación de la solución final con el adicionamiento del cemento y otros agregados.

Las propiedades de esta solución van a depender de las propiedades físico-mecánicas de la solución base de arcilla y de las propiedades del cemento y de los agregados utilizados.

Los principales parámetros que caracterizan las propiedades tecnológicas de esta solución taponante de arcilla-cemento son: la tensión dinámica al corte τ_{din} ; la viscosidad estructural η ; la tensión estática al corte τ_e ; la tensión límite al corte del material estructurado τ_L y la resistencia plástica de dicho material, P_t .

A partir de la experiencia práctica existente se recomienda que las soluciones de arcilla-cemento que se van a usar para el taponamiento, tengan los siguientes valores de sus parámetros principales:

τ_{din} : 50 a 200 Pa

η : 0,02 a 0,07 Pa · s

τ_e : 150 a 600 Pa

$P_t \geq 0,15$ MPa (10 días después de preparado)

VII.7.2. ESQUEMAS TECNOLOGICOS DEL TAPONAMIENTO

El taponamiento de las rocas como es conocido puede realizarse antes de laborearse el pozo –taponamiento preventivo–, o durante el laboreo de éste, con el objetivo de rellenar los espacios que quedan detrás de la fortificación-taponamiento posterior.

El taponamiento preventivo del macizo rocoso acuífero y agrietado durante el laboreo de pozos se puede realizar mediante la perforación de taladros, tanto desde la superficie (Fig. VII.2a), como desde el frente de trabajo del pozo (Fig. VII.2b), según las condiciones concretas existentes.

La definición de cómo hacer el taponamiento preventivo (si desde la superficie o desde el frente del pozo) depende de varios factores, entre ellos los principales son: la existencia del equipamiento necesario, la potencia y profundidad del manto acuífero y los plazos para la ejecución de la obra. La elección de una u otra variante en fin de cuentas debe fundamentarse sobre la base de los cálculos técnico-económicos.

El taponamiento preventivo del macizo rocoso puede realizarse por grupos de taladros o por taladros independientes. El taponamiento por grupos de taladros en ocasiones se emplea para los trabajos desde el frente del pozo, cuando el agrietamiento del macizo se considera uniforme y la zona a aislar no posea una gran potencia; mayor difusión ha recibido el taponamiento por pozos independientes (tanto para los trabajos desde la superficie como desde el frente de laboreo del pozo), debido a que su empleo se puede regular y controlar mejor el proceso de taponamiento.

En la práctica mundial, para la inyección de la solución taponante son usados tres esquemas: el esquema de circulación, el de compresión y el de semicirculación.

Esquema de circulación: la solución taponante se inyecta a una presión constante, cuya magnitud debe exceder un poco a la magnitud del empuje de las aguas subterráneas. Aquí la solución excedente que no es absorbida por el macizo regresa a la instalación de inyección para ser inyectada de nuevo.

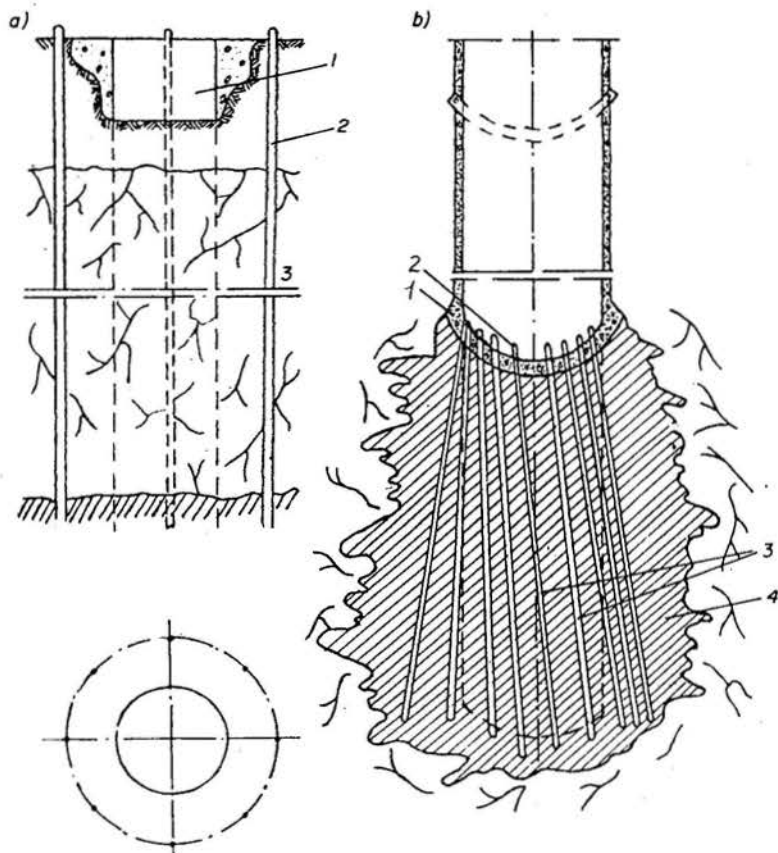


FIGURA VII.2. Esquemas de taponamiento preventivo. a) desde la superficie, b) desde el frente del pozo.

Para realizar este esquema (Fig. VII.3) el taladro se equipa con una tubería concéntrica; por la parte interior de esta tubería la mezcla de taponamiento llega hasta el fondo del taladro, en tanto que la mezcla excedente sube por el espacio comprendido entre dos paredes de dicha tubería.

En este esquema se hace necesario colocar en la tubería de recirculación (de salida) una llave que posibilite la regulación de la posición de inyección de la mezcla, manteniéndola permanente, independientemente de los distintos gastos de soluciones que se puedan producir.

Generalmente este esquema se emplea para el taponamiento desde la superficie y exige que los diámetros de los taladros oscilen entre 100 y 200 mm.

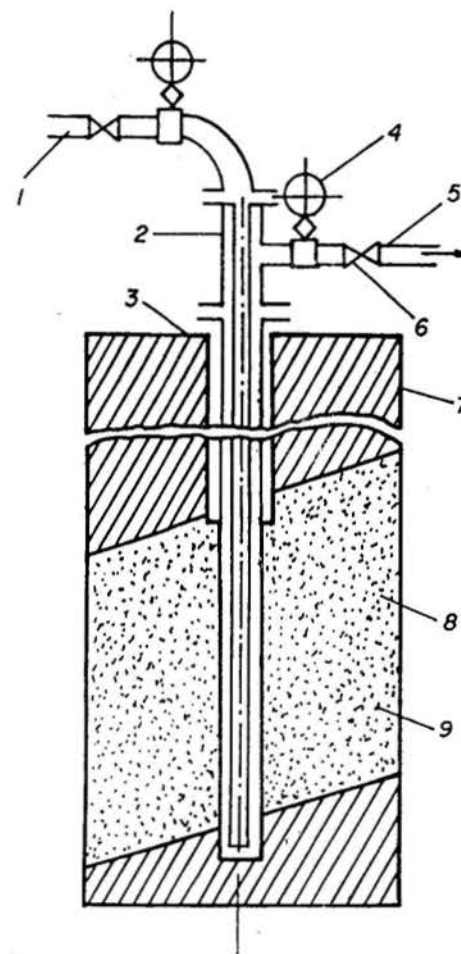


FIGURA VII.3. Esquema de inyección circular. 1- tubería de inyección, 2- cierre de taponamiento, 3- guía del taladro, 4- manómetro, 5- tubería de salida, 6- llave, 7- rocas estables, 8- columna de perforación, 9- rocas acuíferas.

Se considera racional el empleo de este esquema hasta profundidades de 200 m en macizos acuíferos muy agrietados.

Esquema de compresión: se diferencia del esquema anterior en que no hace falta equipar al taladro con la tubería concéntrica (Fig. VII.4). Según esta variante toda la solución que se inyecta debe ser absorbida por el macizo, lo cual hace necesario que la solución sea inyectada a una presión variable.

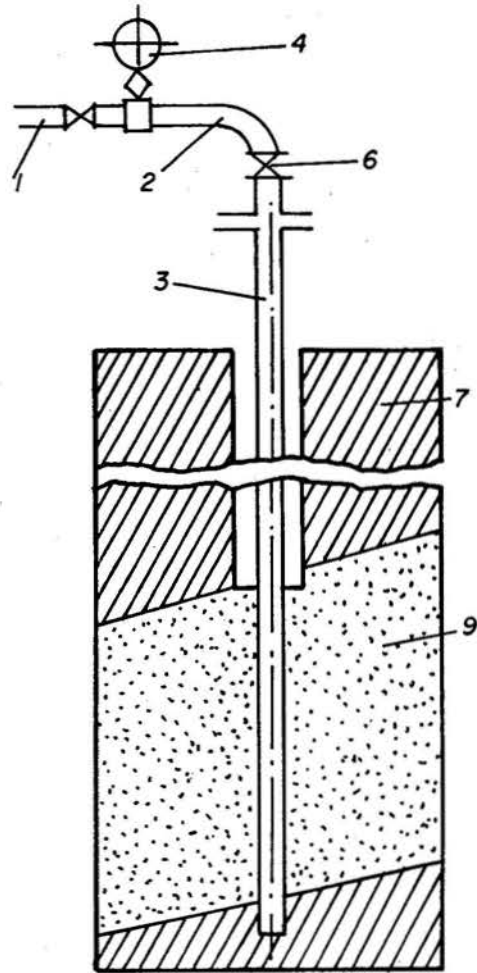


FIGURA VII.4. Esquema de inyección de compresión. 1-tubería de inyección, 2-cierre de taponamiento, 3-guía del taladro, 4-manómetro, 5-tubería de salida, 6-llave, 7-roca estable, 8-columna de perforación, 9-roca acuífera.

Este esquema se considera útil empleado en caso de macizos rocosos con agrietamiento muy fino, o en caso de macizos con grandes agrietamientos y gran magnitud del empuje de las aguas subterráneas.

Esquema semicircular: se emplea en los casos en que es necesaria una exacta regulación de la presión de inyección en el taladro de la solución taponante. Esto se logra colando una tubería de recirculación en el

esquema (Fig. VII.5). A diferencia del esquema circular, en éste no existe la tubería de inyección.

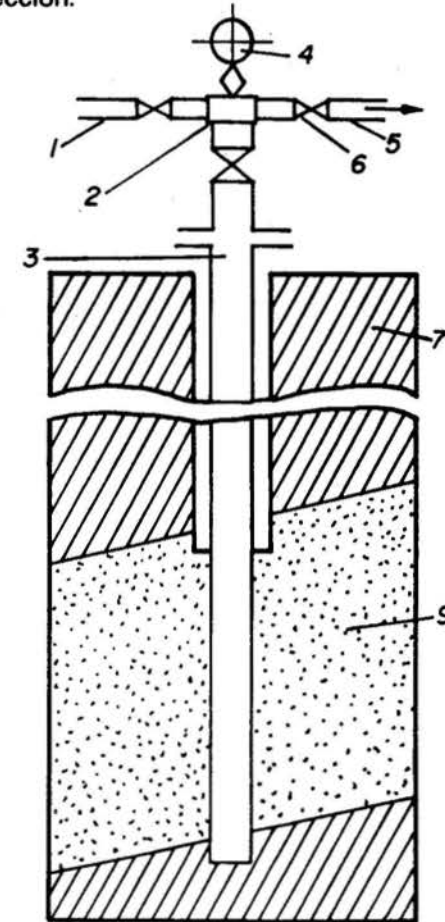


FIGURA VII.5. Esquema de inyección semicircular. 1-tubería de inyección, 2-cierre de taponamiento, 3-guía del taladro, 4-manómetro, 5-tubería de salida, 6-llave, 7-rocas estables, 8-columnas de perforación, 9-roca acuífera.

VII.2.1. Cementación preventiva desde la superficie

La cementación preventiva del macizo rocoso desde la superficie en la actualidad se emplea para cualquier profundidad a que se encuentre el manto acuífero.

La cementación y otras variantes de taponamiento preventivo habitualmente se realizan con el uso de la torre de sobremina e instalaciones

de ascenso permanente, con el objetivo de realizar estos trabajos en el período preparatorio y lograr que las pérdidas de tiempo que se produzcan en el laboreo del pozo con estas tareas sean mínimas.

Para la cementación o el taponamiento preventivo, desde la superficie alrededor del futuro pozo, se perforan en forma concéntrica una serie de taladros, los cuales deben tener una profundidad tal que les permita descender por debajo del manto acuífero por lo menos de 3 a 5 m.

Estos taladros se disponen según una circunferencia que debe tener de 4 a 5 m mayor que el diámetro del pozo, estando ellos ubicados a 2 o 3 m unos de otros.

El diámetro de los taladros se elige en dependencia de la profundidad y del esquema de inyección empleado. Para la perforación de estos taladros habitualmente se emplean perforadoras de rotación.

Durante la perforación de taladros de más de 100 m, cada 30 m debe comprobarse su desviación del eje proyectado, la cual no debe sobrepasar de un 0,5 % :

La perforación de los taladros y la inyección a través de ellos de la solución de taponamiento puede hacerse en forma sucesiva (uno por uno), o para acelerar este proceso, por grupos. Así tenemos que en caso de usarse 2 máquinas perforadoras se deben perforar: inicialmente 2 taladros señalados en un mismo diámetro (a 180°) y después otros 2 dispuestos en un diámetro perpendicular al primero, y así sucesivamente (Fig. VII.6).

Cada taladro se puede perforar a toda su profundidad de una sola vez o por pasos o zonas. Esto en gran medida va a estar condicionado al esquema de inyección de la solución elegida.

Con respecto al proceso de cementación, no se excluye la posibilidad de que éste pueda realizarse de una sola vez a toda la profundidad deseada; sin embargo, cuando existen varios horizontes acuíferos en zonas del macizo con diferentes características en su agrietamiento, se hace difícil cementarlo una sola vez a toda la profundidad y alcanzar resultados satisfactorios.

Por esta causa lo más frecuente es que la cementación preventiva desde la superficie se haga por sectores o zonas, cuyas magnitudes van a estar dadas por las características de agrietamiento –porosidad–, y por la capacidad específica de absorción de agua de las diferentes capas de macizo rocoso, lo cual condiciona el tipo y características de la solución taponante, así como la presión a que se debe inyectar.

La cementación por zonas se puede realizar en orden descendente y en orden ascendente.

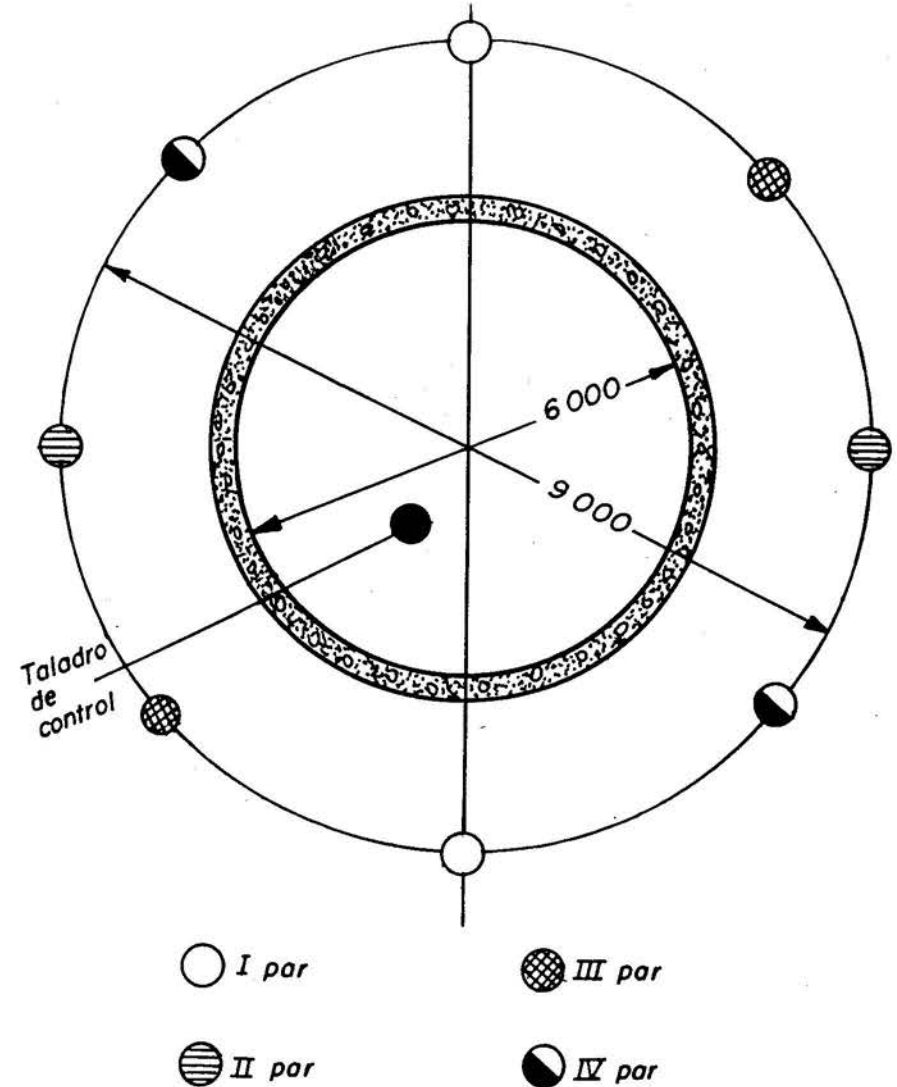


FIGURA VII.6. Esquema de perforación de taladros por pares

En el primero de los casos (Fig. VII.7) los taladros se perforan solamente hasta la profundidad de la primera zona de cementación, y después de su limpieza se procede a la inyección en ellos de la solución cementante.

Verificada la realización en forma efectiva del taponamiento en la zona dada del macizo y después de transcurrido el tiempo previsto para el endurecimiento de la mezcla de taponamiento, se procede a perforar de nuevo en los taladros, primero en la zona que se cementó, y más tarde en una segunda zona, procediéndose como en el caso anterior. Esto se repite hasta alcanzar la profundidad final del taladro.

En la cementación por zonas ascendentes (Fig. VII.8) el taladro se perfora inicialmente a toda su profundidad y se inyecta la mezcla por zonas, empezando por la zona inferior.

Para limitar que la mezcla taponante sólo sea llevada a la zona elegida, en su límite superior se coloca una especie de tapón; después que se concluye el taponamiento de esa zona, el tapón se traslada a la frontera superior de la siguiente zona.

La profundidad de las zonas de cementación debe oscilar desde los 5 a los 50 m, en dependencia fundamentalmente del agrietamiento del macizo rocoso, y su magnitud se debe determinar en el proyecto. Una magnitud menor de las zonas de cementación sólo se justifica por la existencia de un agrietamiento extraordinario del macizo por haber cavernas.

Como mayor desventaja de la variante de cementación por zonas descendente se puede señalar el gran volumen de trabajos de perforación que es necesario realizar.

Durante la cementación preventiva desde la superficie, lo más común es el empleo del esquema de circulación para la inyección de la mezcla con una presión constante de 0,1 a 0,2 MPa por encima de la presión hidrostática existente. Sólo para el caso de un agrietamiento muy fino se recomienda el esquema de compresión para la inyección de la mezcla.

VII.2.2. Arcillización preventiva desde la superficie

Se recomienda emplear en un medio acuífero agresivo y para el taponamiento de macizos rocosos con grandes agrietamientos y en donde existan grandes vacíos y cavernas, con el objetivo de disminuir los gastos de cemento, que pueden alcanzar en tales casos la cifra de hasta 200 t de cemento por 1 m de pozo.

La esencia del método consiste en inyectar en el macizo la solución arcillosa, pero en este caso la presión de inyección exigida es mayor.

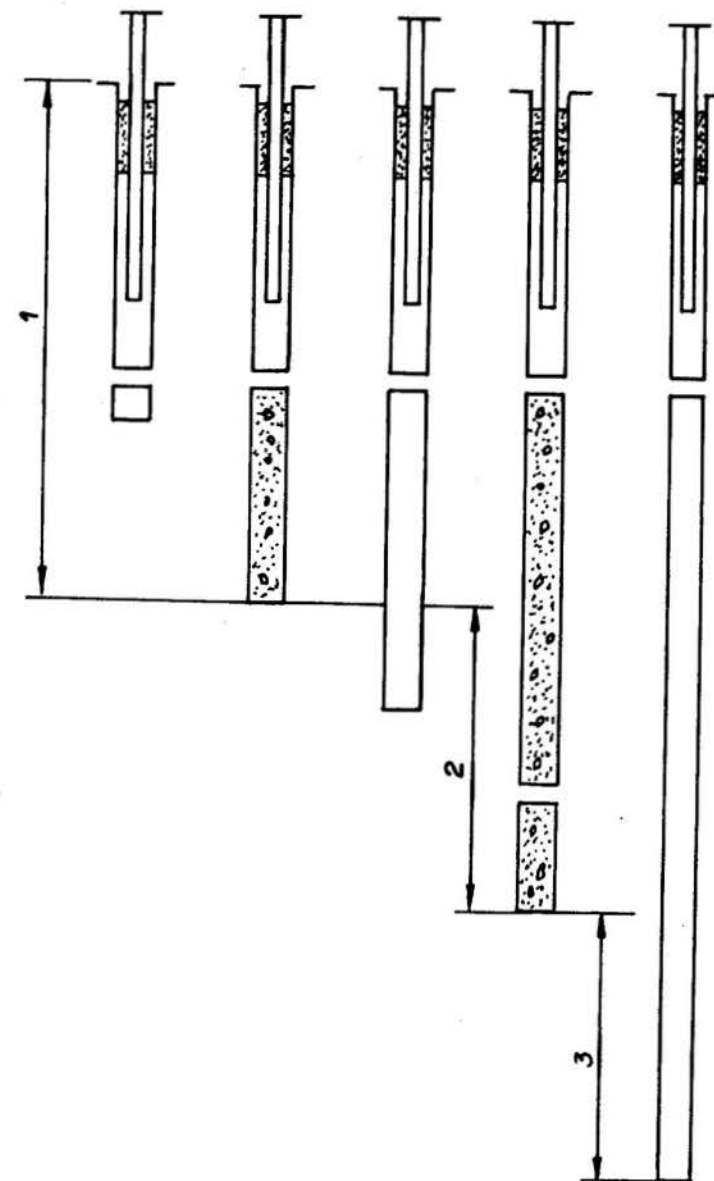


FIGURA VII.7. Cementación por zonas en orden descendente.

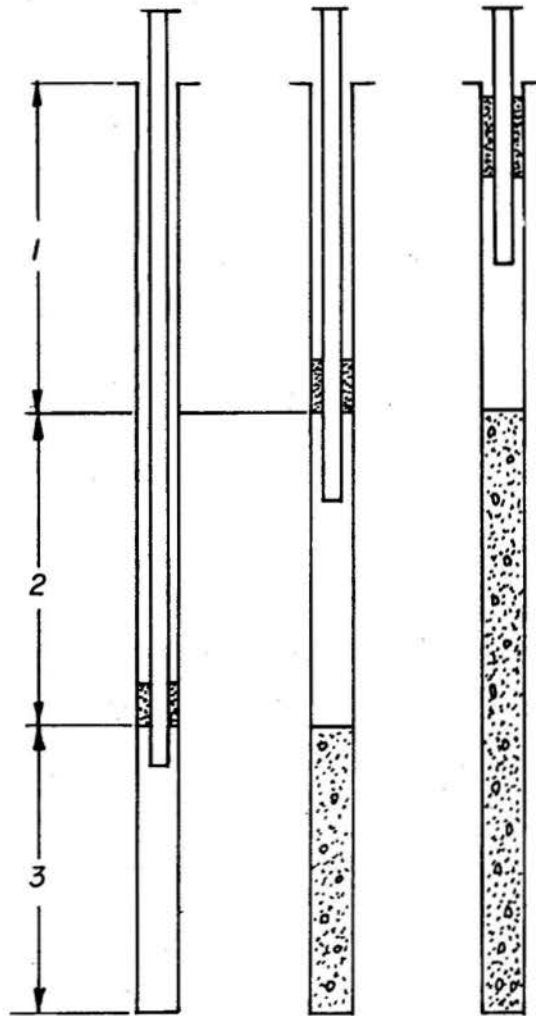


FIGURA VII.8. Cementación por zonas en orden ascendente.

Para la preparación de la solución arcillosa se debe emplear una arcilla especial que posea unas propiedades físicoquímicas específicas. La solución arcillosa debe poseer una alta viscosidad, por lo que la concentración de arcilla en la mezcla debe ser de un 50 a un 55 %.

Para garantizar un mayor asentamiento y densificación de la arcilla en las grietas, se recomienda añadir a la solución arcillosa cloruro de calcio en una cantidad de un 4 a un 5 % con respecto al peso de arcilla seca o vidrio líquido en una cantidad de aproximadamente un 2 %.

Después de realizada la inyección de la solución arcillosa es necesario proceder a su "aprisionamiento" para lo que se inyecta una solución de cemento a una alta presión (de 6 a 8 MPa).

VII.2.3. Betumenización preventiva desde la superficie

La betumenización se emplea para el taponamiento de macizos agrietados en los que el empuje hidrostático de las aguas subterráneas no sobrepasa los 0,25 MPa.

Según la tecnología de betumenización se diferencia la betumenización caliente y la fría, empleándose para el taponamiento del macizo agrietado, fundamentalmente la caliente.

Betumenización caliente: consiste en la inyección en los taladros de una solución de betumen calentada hasta una temperatura de 200 m a 220 °C.

Los taladros deben perforarse a una distancia de 0,75 a 2,5 unos de otros en dependencia de las características de agrietamiento del macizo, de la consistencia del betumen, de la presión de inyección y de la duración del proceso de inyección.

La inyección de la solución de betumen se hace con el esquema de compresión a una presión de 6 a 8 MPa. Antes de la inyección de la solución se debe calentar el taladro.

Debido a que el betumen durante su endurecimiento disminuye en volumen, su inyección se debe realizar en varios ciclos con sus respectivos intervalos de tiempo entre ellos, con vista a lograr un buen llenado de las grietas.

Debido a que la mezcla de betumen tiende a salirse de las grietas para el caso de presiones hidrostáticas de las aguas subterráneas superiores a 0,25 MPa, la betumenización en la actualidad se emplea poco en el taponamiento preventivo, teniendo una mayor difusión para el rellenado de los espacios posteriores a la fortificación.

VII.2.4. Cementación preventiva desde el frente de trabajo

La cementación preventiva del macizo rocoso desde el frente del pozo se puede realizar en dependencia de la profundidad a que se encuentran los niveles acuíferos, las características y grado de agrietamiento del macizo, la potencia de la capa superior e inferior de roca y de las características de resistencia de estas rocas, por zonas o sectores según una de las 4 variantes que a continuación se señalan.

Primera variante: la cementación se realiza con la construcción de una almohada de hormigón (Fig. VII.9). Esta variante es muy difundida y se considera útil emplearla en caso que los niveles acuíferos estén ubicados a una determinada profundidad y cuando entre ellas exista una capa patente de roca.

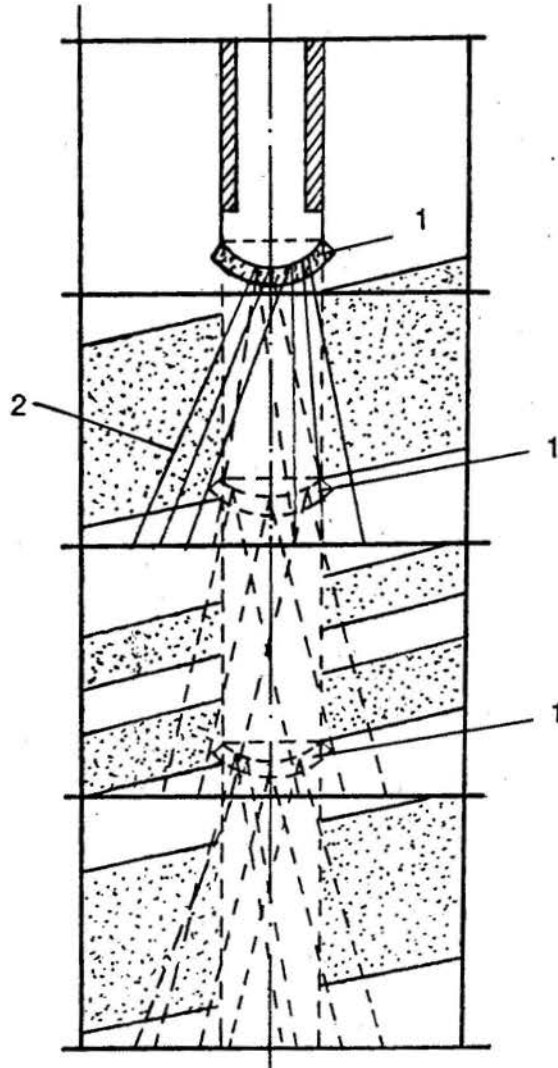


FIGURA VII.9. Cementación desde el frente del pozo con la construcción de una almohada de hormigón. 1-almohada de hormigón, 2-taladros de taponamiento.

Las desventajas de esta variante radica en la necesidad de detener los trabajos de avance para la construcción de las respectivas almohadas (en cada sector o zona), y en el gasto complementario de medios y tiempo para la instalación de la almohada.

La ventaja de esta variante es la simplicidad con que se realizan y controlan los trabajos de perforación e inyección de la sustancia cementante.

Segunda variante: la cementación se realiza desde el frente del pozo por zonas, dejando pilares de protección (Fig. VII.10). Esta variante se recomienda cuando los niveles acuíferos están situados unos cerca de otros.

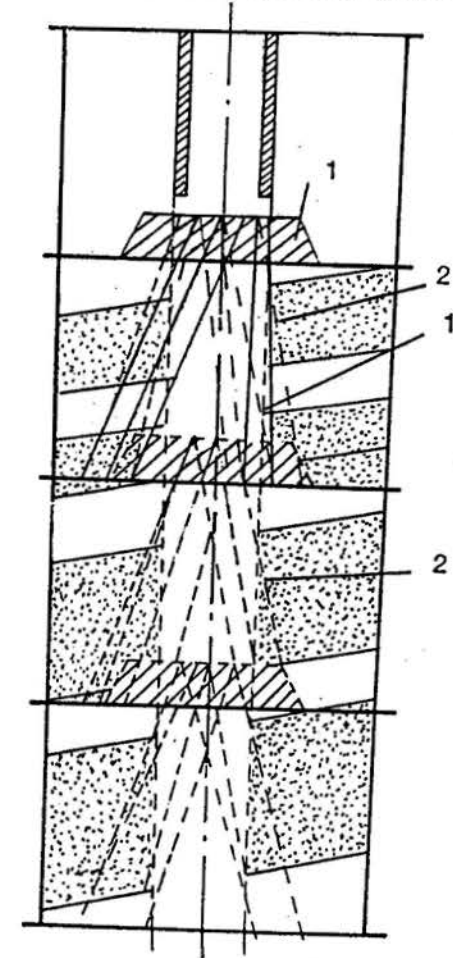


FIGURA VII.10. Cementación desde el frente del pozo dejando pilares de protección. 1-pilar de protección, 2-taladros de taponamiento.

Las ventajas de esta variante son: simplicidad en la realización y control del proceso de cementación y comparación a la anterior variante, así como el hecho de no tener que hacer la almohada, lo que produce ahorro de material y de tiempo.

La desventaja esencial de esta variante es la baja velocidad de construcción del pozo alcanzado con su empleo, debido al cese de su laboreo durante los trabajos de cementación.

Tercera variante: la cementación se realiza desde el frente del pozo por zonas, construyendo para la primera zona una almohada y dejando para las restantes pilares de protección (Fig. VII.11)

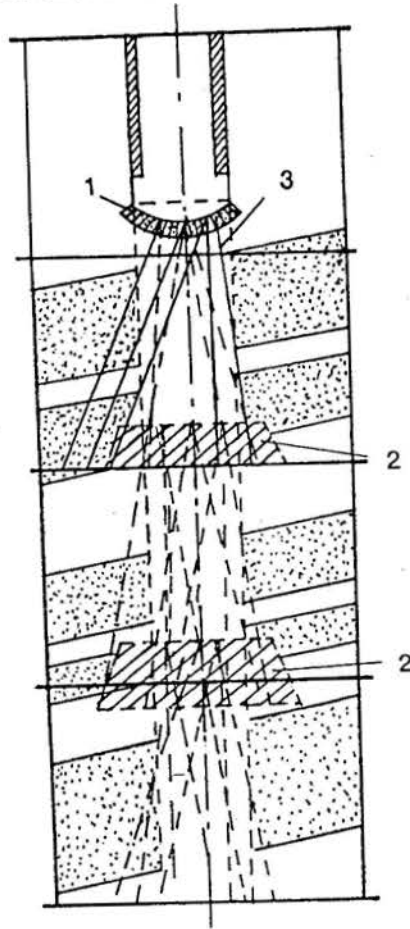


FIGURA VII.11. Cementación desde el frente del pozo por zonas, dejando una almohada de hormigón y pilares.

Esta variante reúne las ventajas y desventajas de la anteriormente analizada. Su empleo se considera recomendable cuando se encuentran en las zonas rocas acíferas inestables en las que se considera efectivo el empleo de la almohada.

Cuarta variante: la cementación desde el frente del pozo por zonas, pero con la construcción de una sola almohada (Fig. VII.12) y sin dejar pilares de protección. Esta variante se parece a la cementación por zonas descendentes realizada desde la superficie.

Las ventajas de esta última variante consisten en la posibilidad de realizar los trabajos de cementación simultáneamente con el equipamiento del pozo, sólo es necesario ubicar una vez las instalaciones para la cementación y se construye una sola almohada.

Como mayor desventaja de esta variante se señala el gasto de medios y de tiempo en la perforación preventiva de los taladros de cementación.

Se recomienda emplear esta variante cuando no es posible colocar las instalaciones de perforación en la superficie.

Para cualquiera de las variantes analizadas, la instalación de la fortificación en la zona ya laboreada del pozo antecede a los trabajos de cementación.

VII.3. TAPONAMIENTO POSTERIOR DEL MACIZO ROCOSO

El taponamiento posterior del macizo rocoso durante el laboreo de pozos consiste en la inyección de la solución taponante detrás de la fortificación a través de tuberías especiales situadas en dicha fortificación, con el objetivo de alcanzar el cese total o parcial de llegada de agua al pozo.

El taponamiento posterior se realiza en los siguientes casos:

1. Después de construido el pozo en rocas acíferas y agrietadas por métodos habituales en los casos en que con la instalación de la fortificación permanente no se logre evitar la llegada de agua al pozo.
2. Después de construido el pozo con el taponamiento preventivo, si a pesar de ello el flujo de agua que llega al pozo es significativo.
3. Cuando existen grandes vacíos detrás de la fortificación formados por desprendimientos de rocas o por la baja calidad del trabajo de relleno.

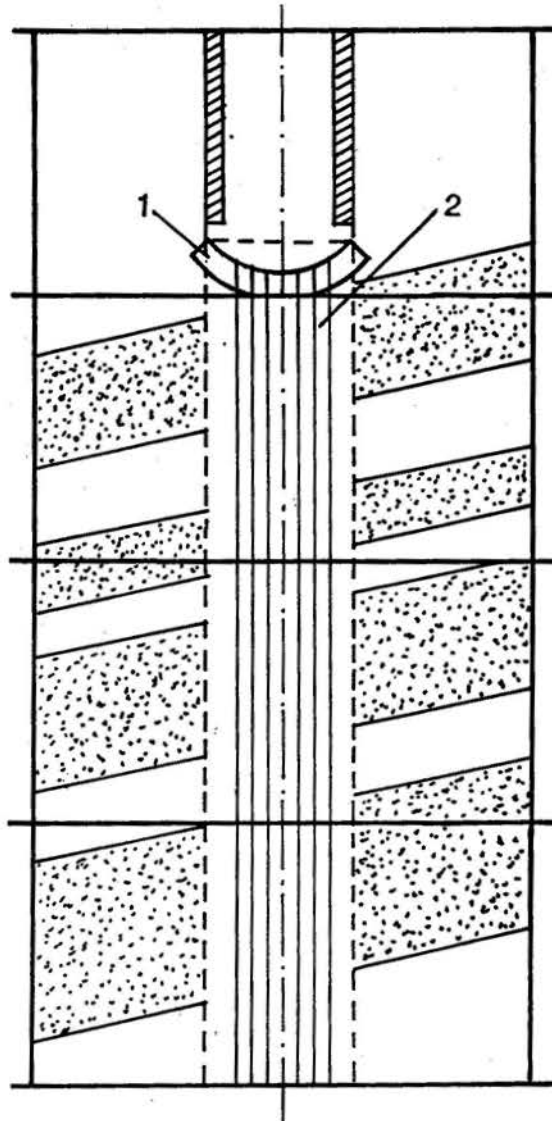


FIGURA VII.12. Cementación desde el frente del pozo por zonas dejando una sola almohada y sin pilar. 1-almohada de hormigón, 2-taladros.

4. Cuando la fortificación se deforma o disminuye su capacidad portadora debido a la acción de aguas agresivas.

En dependencia de las condiciones hidrogeológicas existentes y el grado de deformación que tenga la fortificación del pozo, el taponamiento posterior puede realizarse por toda la profundidad del pozo o sólo por aislados sectores.

El taponamiento posterior se puede realizar tanto en los períodos de construcción como de reconstrucción del pozo, así como en pozos en explotación.

En los casos en que los sectores de pozo que exijan el taponamiento posterior sean muy largos, ellos se dividen en pasos de 15 a 20 m en los pozos que se construyen, y en los pozos que se explotan esta longitud se hace coincidir con la distancia entre los niveles de viguetas.

En cada sector de pozo en el que se realiza el taponamiento posterior, los barrenos de taponamiento se colocan en hileras situadas unas de otras a una distancia de 1,3 a 1,5 m.

La distancia entre barrenos (en las hileras) se toma de aproximadamente 1,5 m.

Estas magnitudes, en dependencia de las condiciones concretas que existan, pueden variar.

Para el taponamiento posterior en pozos que se construyen o se reconstruyen (no están en explotación), los equipos para el taponamiento se colocan en las plataformas suspendidas habituales de laboreo. Desde estas plataformas se realiza también el trabajo de taponamiento.

En los casos de pozos que se explotan, los equipos de cementación se colocan sobre una plataforma especial, desde la cual se realizan también los trabajos de taponamiento.

Al igual que en el taponamiento preventivo, en este caso antes de la inyección en los taladros (barrenos) de la solución taponante, ellos se lavan con agua.

Los trabajos de taponamiento por zonas en general se realizan en orden descendente, aunque en cada zona los trabajos se llevan a cabo en orden ascendente.

Durante el taponamiento posterior es habitual el empleo de soluciones o mezclas compuestas, tales como de cemento-arena, cemento-arcilla y = cemento-arena-arcilla.

La mezcla de taponamiento se prepara en la superficie y se lleva al frente de trabajo en el pozo mediante tuberías.

VII.4. PROYECCION DE LOS TRABAJOS DE TAPONAMIENTO

Durante la realización del proyecto para los trabajos de taponamiento, con vista a la formación de una cortina de aislamiento alrededor del pozo que se laborea en condiciones difíciles, se deben cumplir una serie de tareas, tales como:

- Recolección y estudio de la información geológica sobre el macizo rocoso, las características e intensidad del agrietamiento, las condiciones hidrogeológicas y la agresividad de las aguas subterráneas.
- Realización de los planos del pozo con los cálculos de las dimensiones necesarias de las cortinas de aislamiento para cada nivel acuífero, con el trazado del contorno del área de expansión de la sustancia taponante para cada sector y taladro.
- Plano con la distribución de taladros y filas de taladros, señalando las distancias respectivas.
- Cálculo del volumen de solución taponante para cada cortina y en total.
- Elección de la composición que debe tener la mezcla o solución taponante.
- Estudio de las condiciones técnicas en las que se realiza el trabajo.

VII.4.1. Proyección de los trabajos de taponamiento preventivo desde la superficie

Durante la realización del proyecto para el taponamiento preventivo desde la superficie se realizan las siguientes tareas:

- Estudio de las propiedades del sector del macizo rocoso en el que se van a realizar los trabajos de taponamiento.
- Cálculo de las dimensiones que debe tener la cortina de aislamiento.
- Selección de la profundidad de las zonas de cementación.
- Selección del esquema de disposición y cálculo del número de taladros de taponamiento.
- Cálculo de la presión de inyección necesaria.
- Cálculo del volumen de mezcla o solución de material taponante que se debe inyectar.

Cálculo de las dimensiones de la cortina

El espesor de la cortina de aislamiento, así como su zona de expansión, se calculan a partir del criterio de que alrededor de un pozo de sección circular se va a formar una cortina de sección circular de espesor e_i y con diámetros exteriores e internos D_e y D_i (Fig. VII.13).

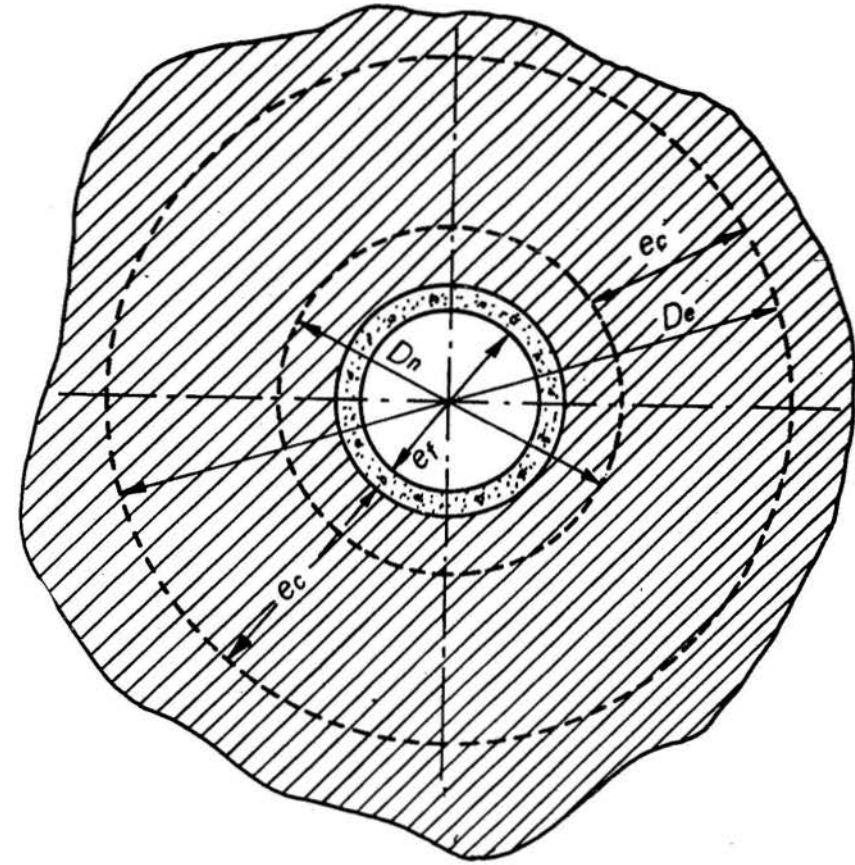


FIGURA VII.13. Esquema para el cálculo de la cortina de aislamiento.

El diámetro interior D de la cortina se puede calcular aproximadamente por la expresión:

$$D = (D_o + e_f) K_i + 2 Z_f, \text{ m} \quad (\text{VII.1})$$

donde:

D_o : diámetro útil del pozo, m

e_f : espesor de la fortificación, m

K_f : coeficiente de irregularidad en el contorno; se toma de 1,07 a 1,1

Z_f : zona de afectación del macizo por los trabajos con explosivos, m

El espesor de la cortina se puede obtener con el empleo de la expresión de Lami:

$$e_l = \frac{D_l}{2} \sqrt{\frac{m R_c}{m R_c - 2 \lambda P_H} - 1} \quad (\text{VII.2})$$

donde:

m : coeficiente que depende de las condiciones de trabajo; se toma m de 0,6 a 0,7

R : resistencia a compresión lineal de la roca cementada, MPa

λ : coeficiente de sobrecarga; se toma de 1,25 a 1,35

P_H : presión hidrostática de las aguas subterráneas, MPa

Conocido el valor de e_l se puede calcular el valor de D_e a partir de la expresión:

$$e = \frac{D_e}{2} - \frac{D_l}{2} \quad (\text{VII.3})$$

A la hora de realizarse los trabajos de taponamiento se deben realizar las correcciones necesarias de las dimensiones de la cortina.

Elección de la longitud de las zonas de taponamiento

La cementación (taponamiento) de las rocas agrietadas y acuíferas se considera útil realizarla por zonas o sectores. La longitud de estos sectores de taponamiento va a depender de una serie de factores, y en la práctica oscila desde 10 hasta 100 m.

Las ventajas de realizar la cementación por sectores de poca longitud son: se produce un menor gasto de sustancia taponante; es necesaria una menor presión de inyección; es más fácil el control del proceso de taponamiento y se obtiene una aislación de mayor calidad en la zona deseada debido a que se logra una cementación más homogénea del macizo rocoso.

Como principal desventaja de la cementación con el empleo de sectores de corta longitud está la baja velocidad que se alcanza en la construcción del pozo.

En tanto las ventajas de realizar los trabajos con sectores de cementación largos son: un menor gasto de tiempo en los trabajos de taponamiento y una mayor velocidad de construcción del pozo.

Como desventajas de esta variante tenemos: una mayor dificultad en la elección de la composición que debe tener la mezcla de taponamiento; necesidad de una mayor presión de inyección y debido a esto un mayor gasto de mezcla; una mayor dificultad en el control del proceso de taponamiento y de la calidad de los trabajos así como la posibilidad de que existan filtraciones de agua en algunas partes, debido a que la cementación no se realizó uniformemente.

A la hora de elegir la longitud de los sectores de cementación se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El aumento de la longitud de los sectores de cementación permite mejorar la organización y disminuir el costo de los trabajos de cementación.

A la hora de dividir el macizo en el cual se van a realizar los trabajos en sectores, es necesario tratar que en cada sector se encuentren mantos acuíferos con similares características de filtración.

- Para lograr una buena calidad en los trabajos de cementación, la longitud de los sectores se debe elegir teniendo en cuenta el régimen de trabajo de las bombas de cementación y conociendo las capacidades del macizo rocoso, de absorber la mezcla taponante con vista a que se logre una cementación uniforme en todo el sector.

Habitualmente la longitud de estos sectores de cementación se determina teniendo en cuenta los factores geológicos; técnicas organizativas y económicas, y después con este parámetro fijado se elige la bomba de cementación que garantice el trabajo.

Para el cálculo de la longitud l_c de los sectores de cementación, en la práctica existen un gran número de fórmulas propuestas y usadas por distintos centros de investigación de diferentes países (URSS, Alemania, EE.UU., y otros).

Elección del esquema de distribución del número de taladros de taponamiento

El esquema de distribución de los taladros y el número de éstos se determina teniendo en cuenta una serie de factores: características de filtración del macizo rocoso, magnitud de inyección de la mezcla taponante, magnitud de la zona de difusión de la mezcla taponante, composición y concentración de la mezcla, grado de simultaneidad entre los trabajos de cementación y construcción del pozo, entre otros.

Durante la construcción de pozos con el taponamiento preventivo desde la superficie son usados diferentes esquemas de distribución de los taladros, entre ellos los más difundidos son:

Primer esquema: Se coloca alrededor al pozo y concéntricamente a él una hilera de taladros (Fig. VII.14). Esta variante es una de las más difundidas en la práctica mundial. El diámetro de la circunferencia donde se ubi-

can los taladros, habitualmente es de 12 a 20 m mayor que el diámetro útil del pozo.

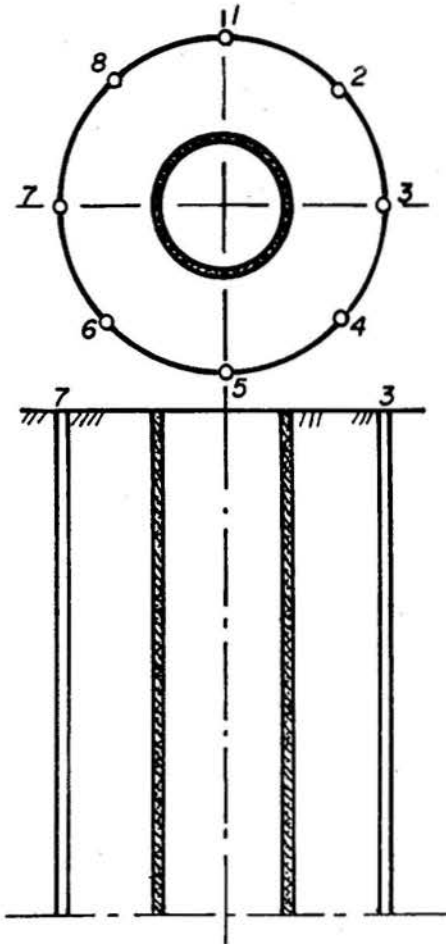


FIGURA VII.14. Esquema de distribución concéntrica de los taladros en un solo círculo.

Se recomienda el empleo de este esquema para el caso en que los mantos acuíferos sean horizontales o tengan poca inclinación, y en rocas en las cuales las velocidades de filtración sea relativamente pequeña.

Segundo esquema: Se emplea para condiciones similares que el primer caso, pero cuando además existe una dirección significativa de las aguas subterráneas (Fig. VII.15)

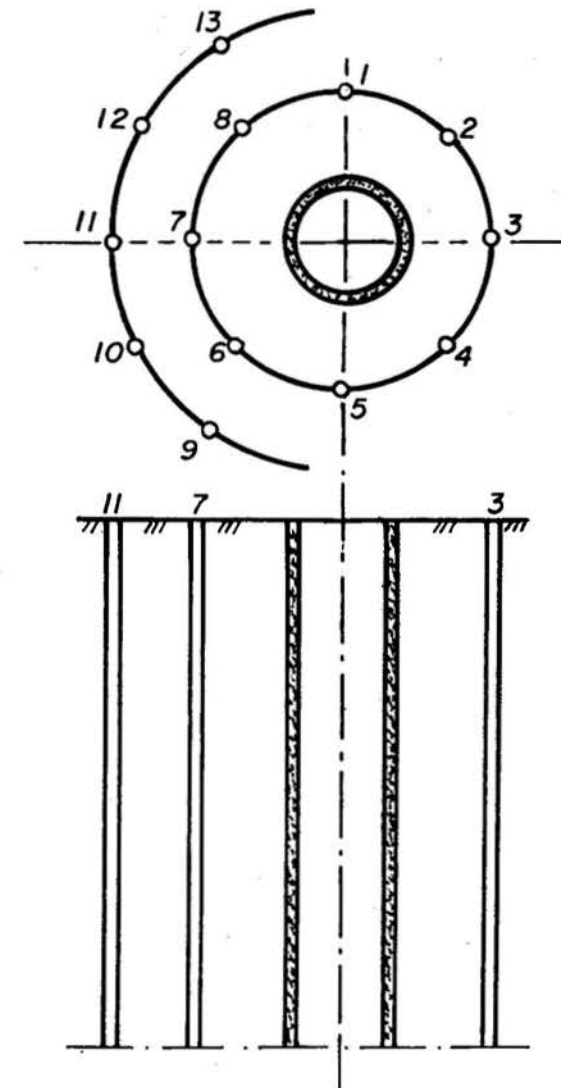


FIGURA VII.15. Esquema de distribución de los taladros para el caso en que exista una dirección predominante del flujo de agua.

Como se ve, de la Fig. VII.15 además del círculo de taladros se coloca una fila complementaria (aproximadamente en forma de semicircunferen-

cia) del lado de donde viene el flujo de agua. Esto se hace con vista a crear condiciones más seguras en la formación de la cortina de aislación.

Tercer esquema: Consiste en colocar alrededor del pozo 2 círculos de taladros en forma concéntrica a él (Fig. VII.16).

Se emplea este tercer esquema para la cementación de macizos acuíferos finamente agrietados.

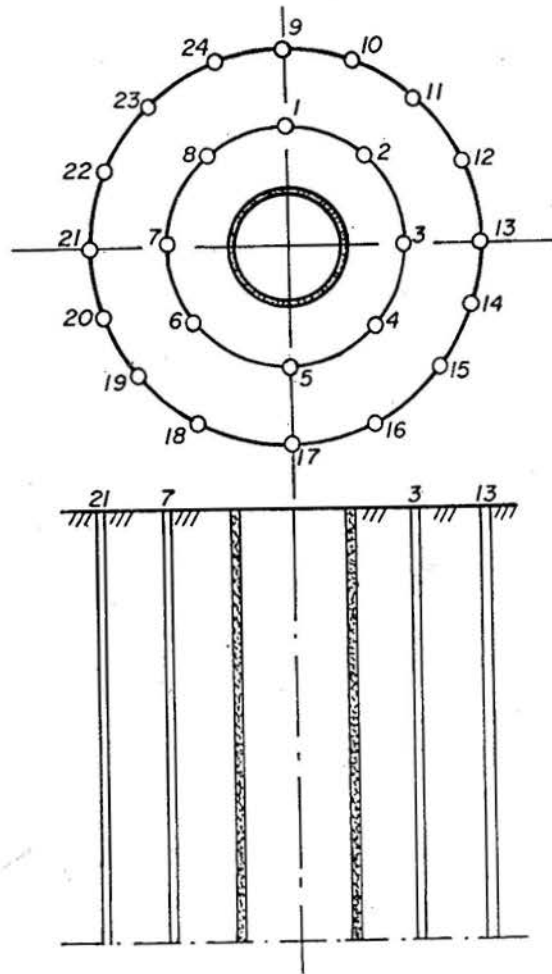


FIGURA VII.16. Esquema de distribución concéntrica de los taladros en 2 círculos.

La distancia entre taladros de cementación en una fila (circunferencia) se toma a partir de la experiencia práctica existente y es de 5 a 7 m en macizos rocosos en los que predominan grietas finas y muy finas; de 7 a 9 m en macizos medianamente agrietados, y de 9 a 12 m en macizos con grandes grietas.

El número necesario de taladros de cementación N_t sin tener en cuenta los de control se calcula por la expresión:

$$N_t = \frac{D_t}{l_t} \quad (\text{VII.4})$$

donde:

D_t : diámetro de la circunferencia en la que se disponen los taladros, m

l_t : mayor distancia posible entre taladros en una fila (circunferencia), m

Como elemento de comprobación del cálculo del número de taladros se utiliza el criterio de que la mezcla taponante de cada taladro ocupe de 1,5 a 2,0 m de la zona de influencia del taladro vecino.

Magnitud de la presión de inyección

La magnitud de la presión con que se inyecta en el taladro la mezcla o solución taponante es uno de los parámetros tecnológicos más importantes del proceso de cementación preventiva desde la superficie, ya que en forma significativa este parámetro influye en el resultado final.

La magnitud de la presión de inyección depende de una serie de factores, entre ellos los principales son:

- Cantidad y abertura de las grietas del macizo.
- Empuje hidrostático de las aguas subterráneas.
- Composición y concentración de la mezcla taponante.
- Radio de difusión de la mezcla.
- Esquema tecnológico de inyección que se emplea.

De la correcta elección de la magnitud de la presión de inyección va a depender en gran medida la calidad de la cortina de aislación, el gasto de materiales de taponamiento y la duración y costo de este proceso.

Cuando tenemos un macizo rocoso acuífero caracterizado por la existencia de grandes grietas y vacíos, inicialmente la resistencia que se ofrece al paso de la solución taponante no es grande, por lo que en tal situación se exige una presión inicial de inyección mínima.

Cuando el agrietamiento se hace más fino, se va aumentando la resistencia que se ofrece al paso de la mezcla cementante y por ello se debe aumentar la presión de inyección.

Es de gran importancia en cada caso correcto elegir la magnitud adecuada de la presión de inyección, ya que con su aumento se eleva el gasto de mezcla taponante, el costo y duración de esta operación; por el contrario, si la presión de inyección está por debajo de lo necesario no se logra un buen llenado de las grietas con la sustancia taponante y por ende el trabajo no es de calidad.

Cálculo del volumen necesario de sustancia taponante

En la práctica mundial este cálculo se realiza a partir del criterio de que alrededor del pozo se va a formar una cortina de aislación que tiene forma de un cilindro compacto, cuya altura es igual a la potencia de la zona del macizo que se quiere cementar y su espesor va desde el contorno del pozo hasta el diámetro exterior de dicha cortina. A partir de esto se calcula el volumen de vacíos existentes en esa zona del macizo por la siguiente expresión:

$$V_v = 0,25 \pi D_e^2 h_c K_i, \text{ m}^3 \quad (\text{VII.5})$$

donde:

D_e : diámetro exterior de la cortina de aislación, m

h_c : potencia del horizonte acuífero que se cementa (longitud del sector de taponamiento)

K_i : coeficiente de irregularidad en la distribución del agrietamiento; se toma $K_i = 1,25$ a $1,35$

A este valor de V_v se le puede añadir para hacer el cálculo más exacto el volumen de los taladros de cementación.

A partir de esto se puede calcular el volumen de mezcla taponante necesaria (Q_v)

$$Q_v = V_v \cdot K_e, \text{ m}^3 \quad (\text{VII.6})$$

donde:

K_e : coeficiente que tiene en cuenta cierta cantidad de mezcla taponante que sale fuera de los límites de la cortina; su valor oscila de 1,2 a 1,3

VII.4.2. Proyecto de los trabajos de taponamiento preventivo desde el frente de trabajo del pozo

Para poder elaborar el proyecto de taponamiento preventivo desde el frente de trabajo del pozo se deben cumplimentar las siguientes tareas:

- Determinación de las propiedades de filtración del macizo rocoso.
- Cálculo de los parámetros geométricos de la cortina de aislación.
- Elección de la longitud de los sectores o zonas de taponamiento.
- Cálculo de la almohada de taponamiento o del pilar de protección.
- Elección de la longitud de los sectores o zonas de taponamiento.
- Cálculo de la almohada de taponamiento o del pilar de protección.
- Elección del esquema de disposición de los taladros de cementación y la determinación de su cantidad.
- Cálculo de la presión de inyección de la sustancia taponante.
- Cálculo de la cantidad necesaria de la sustancia taponante.

Para realizar los diferentes cálculos que entran en el proyecto de taponamiento preventivo desde el frente del pozo en calidad de datos geológicos e hidrogeológicos primarios, se utilizan los mismos que se vieron cuando se estudió el taponamiento preventivo desde la superficie.

Para el cálculo de las dimensiones de la cortina de aislación que se forma alrededor del pozo producto de la cementación desde el frente de trabajo, se puede utilizar la vía y expresiones vistas anteriormente.

Con respecto al cálculo de la longitud óptima de las zonas o sectores de cementación (h_c) en este caso (cementación desde el frente del pozo), se recomienda emplear la siguiente expresión que parte del criterio organizativo de los trabajos.

$$h_c = \frac{V_p(T_i + T_a) \sqrt{\frac{aN}{Z\eta p} - 1}}{\frac{aN}{Z\eta p} - (T_i + T_a)} \quad (\text{VII.7})$$

donde:

V_p : velocidad de perforación de los barrenos

N : número de barrenos de cementación

Z : número de trabajadores por turno

ηp : número de instalaciones de perforación en el frente que trabajan simultáneamente

a : coeficiente que tiene en cuenta el aumento del tiempo de perforación durante la perforación de la piedra de cemento; se toma de 1,05 a 1,15

T_i : tiempo invertido en la construcción de la almohada de taponamiento y en el endurecimiento del hormigón hasta el comienzo de los trabajos de perforación.

T_a : tiempo invertido en las operaciones auxiliares y preparatorias

Como se señaló, antes de empezar a perforarse los taladros de taponamiento desde el frente del pozo, se construye en dicho frente la almohada de taponamiento o se deja un pilar protector.

La almohada de taponamiento se construye con el objetivo de evitar la llegada de agua al pozo durante la perforación de los taladros de taponamiento.

La forma de esta almohada puede ser plana o esférica; en ambos casos sus lados se hacen inclinados con el objetivo de transferir parte de la presión del agua o de la sustancia taponante hacia el macizo rocoso.

El espesor de una almohada de taponamiento plana e_p (Fig. VII.17) de construcción simple (un solo escalón) se realiza por la expresión:

$$e_p = \frac{\eta P_o (r^2 + a^2)^2}{4 r^2 a m R_c} + a \quad (\text{VII.8})$$

donde:

η : coeficiente de sobrecarga, se toma de 1,1 a 1,2

P_o : presión que actúa sobre la almohada y que es igual a la suma de la presión hidrostática del agua y la presión que ejerce la mezcla excedente, MPa

r : radio de laboreo del pozo, m

a : flecha de la parte esférica de la almohada, m

R_c : resistencia a compresión del hormigón, MPa

m : coeficiente que se toma de 0,7 a 0,8 según las condiciones de trabajo

El espesor de una almohada de taponamiento esférica de un solo escalón (Fig. VII.18) se realiza por la expresión:

$$e_f = \frac{\eta P_o (r^2 + a^2)^2}{4 r^2 a m R_c} \quad (\text{VII.9})$$

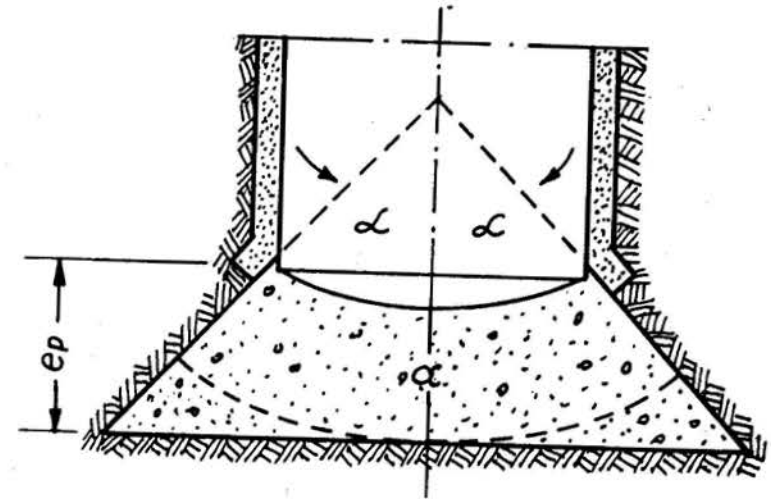


FIGURA VII.17. Esquema para el cálculo del espesor de una almohada plana de taponamiento.

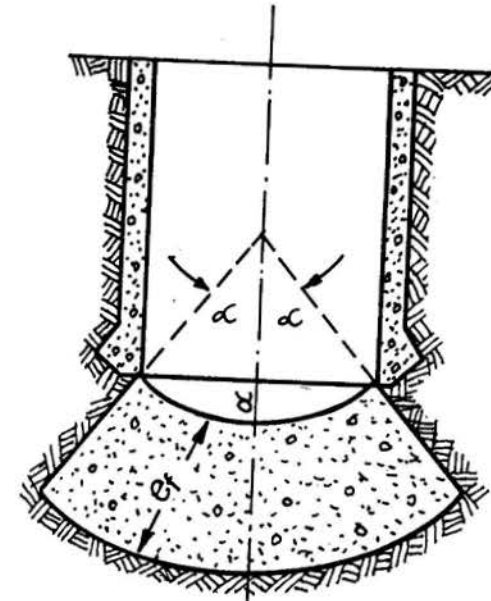


FIGURA VII.18. Esquema para el cálculo del espesor de una almohada esférica de un solo escalón.

Cuando por los cálculos se obtenga que el espesor de la almohada es mayor que 2,5 m, es recomendable pasar al uso de almohadas de varios escalones.

Con respecto al número de taladros de cementación y a su distribución, cuando se realiza el taponamiento preventivo desde el frente del pozo, se puede decir que su determinación se hace teniendo en cuenta el grado de agrietamiento de las rocas, características de la mezcla o solución taponante, longitud de los sectores de cementación, así como el tipo y características de los equipos e instalaciones empleadas. Aquí, como en el caso anterior, los taladros habitualmente se colocan en forma circular.

El cálculo de la presión de inyección de la sustancia taponante se hace con el empleo de las mismas expresiones que existen para el caso del taponamiento preventivo desde la superficie, sólo que aquí hay que tener en cuenta la pérdida de presión que se sufre en la tubería (desde la superficie hasta el frente del pozo).

Habitualmente la presión inicial de inyección se toma de 0,2 a 0,4 MPa por encima de la presión hidrostática de las aguas subterráneas, en tanto que la final puede llegar a 5 MPa .

El volumen necesario de mezcla taponante para la realización de los trabajos se realiza de igual forma que en el caso anterior.

CAPÍTULO VIII

LABOREO DE POZOS CON EL CONGELAMIENTO PRELIMINAR DEL MACIZO ROCOSO

La esencia del método especial de laboreo que nos ocupa consiste en que, por medio del congelamiento de las aguas contenidas en la zona del macizo rocoso que rodea al futuro pozo se forma en dichas rocas como especie de un cilindro hueco de hielo-roca cuyas paredes van a proteger al pozo, en el período de su construcción, de la afluencia de agua y de la penetración en él de rocas movedizas.

Este método se recomienda emplear en capas de rocas inestables acuíferas con potencias superiores a los 10 m o cuando ellas tengan un empuje hidrostático superior a los 20 m . Para capas de potencias o empujes hidrostáticos menores este método sólo se recomienda cuando se haga una fundamentación técnico-económica de su empleo; también se recomienda aplicar este método en rocas fuertes y acuíferas en las que el flujo de agua sea superior a los 20 m³/h .

Si en el corte geológico se observan capas de rocas estables (caliza, margas, etc.) las cuales se combinan con capas acuíferas inestables, es posible en tales casos solamente el empleo de una congelación zonal o local del macizo, lo que trae consigo una disminución del metraje de perforación y por ende influye en la duración y costo del método.

Los trabajos de laboreo de pozos con la congelación del macizo rocoso constan de los siguientes procesos fundamentales:

- Estudio geológico e hidrogeológico preliminar de la zona que se va a congelar.
- Confección del proyecto de los trabajos de congelación.
- Perforación de los taladros de congelación y de control.
- Montaje de la estación y redes de frío.

- Formación del cilindro protector, o sea, la realización propiamente dicha del proceso de congelamiento y su control.
- Mantenimiento del cilindro protector de hielo-roca durante todo el tiempo que se laboree y fortifique el pozo.
- Derretimiento (en forma natural o artificial) del cilindro protector después de construido el pozo.
- Desmontaje de la estación y red de enfriamiento.

La resistencia del cilindro protector debe garantizar su estabilidad para las condiciones existentes de presión minera y de empuje hidrostático de las aguas subterráneas. Para ello es necesario realizar correctamente la determinación de la temperatura de congelación y el cálculo del espesor que se requiere para la red del cilindro protector.

La resistencia del cilindro protector depende de una serie de factores, entre ellos:

- Composición mineralógica y granulométrica de las rocas.
- Temperatura de congelación de las rocas.
- Presencia de soluciones salinas en el agua.
- Capacidad de absorción de agua de las rocas.

Con la disminución de la temperatura la resistencia de la roca congelada habitualmente aumenta, aunque esto no se manifiesta igual en los distintos tipos de rocas. Así vemos que en rocas arenosas saturadas en agua esto se manifiesta más intensamente que en rocas arcillosas. Así tenemos que en rocas arenosas congeladas a menos de 10 grados ellas alcanzan una resistencia de 11,0 a 12,0 MPa, y a 20 grados una resistencia de 16,0 a 17,0 MPa, en tanto que las rocas arcillosas alcanzan a la suma de 7 a 9 MPa.

Con el aumento en el contenido de agua la resistencia de la roca congelada tiende a aumentar; se considera que en tales casos el agua juega un papel de sustancia cementante. Esta situación sólo es totalmente real en casos de rocas completamente saturadas.

Las rocas que contienen agua con soluciones salinas son más difíciles de congelar. Esto se logra a temperaturas por debajo de los 35 grados.

VIII.1. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS FUNDAMENTALES DEL PROCESO DE CONGELACION

Para la formación de la pared de hielo-roca alrededor del pozo se perforan taladros y dentro de estos taladros se sitúan sistemas de tuberías concéntricas. El extremo inferior de la tubería exterior está cerrado y tiene

forma de zapata afilada para que su descenso por el taladro sea más fácil, en tanto que el extremo inferior de la tubería interior queda abierto y está alrededor de 50 a 80 cm de la terminación de la tubería.

A través de la tubería interior pasa al taladro una solución frigorífica, por tal motivo dicha tubería interior se llama alimentadora. Por el espacio comprendido entre las tuberías (interior-exterior), la solución va ir subiendo por el taladro quitándole calor al sector del macizo rocoso circundante; debido a esto la tubería exterior se denomina congelante.

El diámetro de la tubería de alimentación se adapta habitualmente de 25 a 50 mm, en tanto que el de la tubería de congelación, de 100 a 120 mm. Esta relación entre los diámetros de ambas tuberías provoca que la solución frigorífica descienda rápido por el taladro (por ende no se calienta) y su subida sea comparativamente más lenta por la tubería congelante, lo que conduce a una mayor pérdida de calor por las rocas.

Cuando el proceso de congelación en los taladros lleva un cierto tiempo, alrededor de ellos se van formando sectores (cilindros) de rocas congeladas. Al cabo de cierto tiempo los cilindros de los diferentes taladros se unen, formando alrededor del pozo un cilindro hueco continuo. El conjunto formado por las tuberías de alimentación y de congelación habitualmente recibe el nombre de columna de congelación.

La perforación de los taladros de congelación y control del proceso puede realizarse por el método de percusión o por el giratorio. Usando la primera variante se obtiene una menor desviación de la vertical, pero en comparación con la segunda variante es más costosa y menos productiva.

Espesor de la pared del cilindro protector

Como se señaló anteriormente, como resultado del proceso de congelación alrededor del pozo que se laborea se debe formar un cilindro de roca-hielo hueco e impermeable, cuyas paredes deben garantizar que los trabajos en el pozo se realicen de forma segura y eficiente. En otras palabras, las paredes de este cilindro, durante el tiempo de laboreo del pozo, van a ser como una fortificación que va a asimilar la presión en las rocas y el empuje hidrostático de las aguas.

Teniendo en cuenta lo expresado, la ubicación de los taladros de congelación debe ser tal que el espesor de la pared del cilindro que se forme, para la temperatura de congelación elegida, debe garantizar la estabilidad del macizo durante el tiempo de laboreo del pozo.

Para magnitudes no muy altas de la presión minera ($P < 2$ MPa), lo cual tiene lugar a profundidades pequeñas ($H < 120$ m), el espesor

E de la pared del cilindro puede ser calculado por la fórmula de Lami, o sea:

$$E = \frac{D_L}{2} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{cc} - 2P} - 1} \right) \quad (\text{VIII.1})$$

donde:

σ_{cc} : resistencia de cálculo a compresión de la roca congelada y

$$\sigma_{cc} = \frac{\sigma_c}{n}, \text{ MPa}$$

σ_c : límite de resistencia a compresión de la roca congelada

D_L : diámetro de laboreo del pozo

P : presión actuante contra la pared del cilindro protector; se determina analíticamente usando una de las hipótesis o metodología para el cálculo de la presión minera en excavaciones verticales o por vía experimental

n : coeficiente de seguridad, se toma de 2,0 a 3,0

Para el caso en que $2P > \sigma_{cc}$ la fórmula (VIII.1) no se puede utilizar.

En tales situaciones se puede emplear:

$$E = \frac{D_L}{2} \left[0,29 \frac{P}{\sigma_{cc}} + 0,23 \left(\frac{P}{\sigma_{cc}} \right)^2 \right] \quad (\text{VIII.2})$$

Las fórmulas de cálculo vistas parten de la consideración de que el cilindro protector va a trabajar en un medio elástico, cuando en realidad su trabajo se realiza en un medio elástico-plástico y se producen deformaciones plásticas.

Otro aspecto que en dichas fórmulas no se tiene en cuenta es la disminución de la resistencia de la roca congelada en un tiempo prolongado de acción de la carga.

Como se señaló al principio, estas fórmulas pueden usarse para pocas profundidades y pequeñas magnitudes de la presión, en caso contrario, con su empleo se obtienen valores de E por encima de lo real.

Para profundidades superiores a los 120 m existen una serie de fórmulas para el cálculo del espesor del cilindro, una de ellas es la que se ofrece a continuación

$$E = \frac{\gamma H \cdot h}{\sigma_c} \quad (\text{VIII.3})$$

La expresión anterior fue dada por Y. Liberman y parte del cálculo del espesor por su capacidad portadora.

Profundidad de congelación de las rocas

La profundidad de congelación de las rocas depende de la profundidad de yacencia de las rocas acuíferas y del pozo, de las propiedades físico-mecánicas de las rocas y otros factores. Los taladros congelantes deben penetrar en la capa de roca hidrófuga varios metros; para profundidades de congelación hasta de 50 m se considera suficiente ahondarlos de 2 a 5 m; para mayores profundidades este ahondamiento puede llegar hasta los 10 m.

En ausencia de rocas hidrófugas, en la profundidad hasta la que se laborea el pozo, en su frente se construye una almohada de roca congelada a partir de una serie de taladros que se perforan desde el mismo frente del pozo.

Disposición y cantidad de taladros

Los taladros congelantes se disponen alrededor del pozo en una circunferencia de diámetro D_t . Para el caso en que la dirección de los taladros no se desvíe de la vertical, la magnitud de D_t se puede calcular por la expresión:

$$D_t = D_L + E, \text{ m} \quad (\text{VIII.4})$$

Como se comprueba de la práctica, el crecimiento de la pared interior del cilindro (la que da al pozo) ocurre más rápidamente que el de la exterior; esto se explica por la difusión del frío en el medio circundante y la gran área que tiene la pared del cilindro. La velocidad de congelación en las paredes internas-externas habitualmente se toman en relación 3/2. Por esta causa, para el cálculo del diámetro de la circunferencia en la que se ubican los taladros de congelación se recomienda emplear la expresión:

$$D_t = D_L + 1,2 E, \text{ m} \quad (\text{VIII.5})$$

que tiene en cuenta la posible superposición de las zonas de influencia de los taladros.

Otro factor que se debe tener en cuenta es la desviación de la vertical que pueden sufrir los taladros. Este factor habitualmente se calcula en porcentajes de la profundidad de los taladros.

Para pequeñas profundidades esta desviación Δl de la vertical no debe exceder de un 0,5 %; para mayores profundidades la magnitud de la desviación se puede calcular por la expresión:

$$\Delta l = 0,5 + 0,002 H_c, \text{ m} \quad (\text{VIII.6})$$

siendo:

H_c : profundidad de congelación de los taladros, m

Teniendo en cuenta el factor desviación de la vertical, el diámetro del círculo en que se disponen los taladros congelantes se debe calcular por la expresión:

$$D_t = D_L + 1,2 E + \Delta l \cdot H_c, \text{ m} \quad (\text{VIII.7})$$

Establecido el diámetro de la circunferencia en que se ubican los taladros congelantes, su número se determina por la expresión:

$$N = \frac{\pi D_t}{T} \quad (\text{VIII.8})$$

siendo:

l: distancia entre taladros; esta magnitud habitualmente oscila entre 1,0 y 1,3 m; sólo en caso de rocas muy acuíferas e inestables y de un alto nivel hidrostático se toma de 0,8 a 0,9 m

A medida que se aumenta la distancia entre taladros, se hace menor, para condiciones análogas, el espesor de la pared del cilindro protector formado en un tiempo dado. Según datos de los institutos de investigaciones al variar por ejemplo la distancia entre taladros de congelación de 1,0 a 2,0 m, el espesor del cilindro en 3 meses de congelamiento disminuye en más de 2 veces.

A medida que se aumenta la duración del ciclo de congelación y se disminuyen las temperaturas de este proceso la influencia de la distancia entre taladros de congelación sobre la magnitud del espesor de la pared del cilindro se hace más significativa.

Resistencia de la roca congelada

En todas las fórmulas de cálculo, como uno de los parámetros de mayor peso interviene el límite de resistencia lineal a compresión o el de la resistencia permisible a compresión (σ_c) de la roca congelada.

Las primeras investigaciones relativas a la determinación de este parámetro se hicieron desde el año 1887; sin embargo aún hoy en día no se ha logrado hacer una valoración total e integral de él.

Hasta hace unos años para determinar el valor de σ_c de la roca se utilizaban una serie de fórmulas empíricas, entre ellas:

$$\sigma_c = -0,153 t^2 + 11 t + 20 \quad (\text{VIII.9})$$

$$\sigma_c = 8 t + 20 \quad (\text{VIII.10})$$

siendo:

t: la temperatura de congelación, grados

Estas expresiones son consideradas orientativas debido a que no tienen en cuenta las propiedades de las rocas.

Existen otra serie de expresiones basadas en trabajos experimentales realizados en determinadas zonas con diferentes tipos de rocas y que sólo pueden ser utilizadas para las condiciones en que se estudian.

Por ejemplo, según investigaciones realizadas en el Instituto de Minas de Moscú bajo la dirección de N.M. Pocrovsky se obtuvieron las siguientes expresiones:

Para arena de granulometría media, con una porosidad aproximadamente de un 40 % y una humedad entre 10 y un 22 % :

$$\sigma_c = a + b \sqrt{t} \quad (\text{VIII.11})$$

Para arena muy fina y arcilla:

$$\sigma_c = a + b t \quad (\text{VIII.12})$$

Siendo los valores de *a* y *b* obtenidos de monogramas o tablas.

Tabla 5. Valores de *a* y *b*

Tipo de roca	Porosidad	Humedad	A	B
	%	ponderada, %		
Arena de granulometría media	38	10,0	11,2	17,1
		16,5	21,9	21,50
		22,5	37,6	21,60
Arena muy fina	42	8,0	5,1	2,26
		15,0	8,6	3,67
		23,0	11,5	5,20
Arcilla	40	8,0	5,9	1,96
		14,7	10,2	3,12
		24,0	15,7	3,50

Según las investigaciones de este Instituto la resistencia de la roca congelada aumenta a medida que se disminuye la temperatura, se aumenta la granulometría promedio y la humedad, en tanto que disminuye a medida que aumenta la porosidad.

Un factor importante a tener en cuenta es que durante el laboreo de pozos en la congelación de la roca circundante las paredes del pozo pueden permanecer sin revestir o fortificar por un período relativamente largo (25-30 días o más), por lo que en los cálculos hay que tener en cuenta la posibilidad de disminución de la resistencia.

Transmisión de calor durante el proceso de congelación de las rocas

El congelamiento de las rocas que rodean al pozo se produce como resultado del intercambio de calor que tiene lugar entre el macizo y el agente congelante; como ya se señaló este fenómeno se produce alrededor de los taladros de congelación.

La intensidad de este intercambio va a depender de la suma total de las áreas de las tuberías congelantes y se puede calcular por la expresión:

$$Q_1 = \pi dt \cdot H_t \cdot N_t \cdot K_c \quad (\text{VIII.13})$$

donde:

d_t : diámetro de la tubería de congelamiento, m

H_t : longitud de cada tubería de congelamiento, m

N_t : número de tuberías, m

K_c : coeficiente de transmisión de calor, habitualmente $K_c = 225$ kcal/m² · h

Las investigaciones han demostrado que el valor de K_c es muy variable y depende de varios factores, tales como: diámetro y material de que está hecha la tubería, profundidad de congelación, temperatura inicial, velocidad de desplazamiento del agente refrigerante, de las propiedades de las rocas y de la duración del proceso de congelación.

Volumen de roca congelada

El volumen de roca congelada se puede calcular por la expresión:

$$V = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_c^2) H_c, \text{ m}^3 \quad (\text{VIII.14})$$

donde:

D_o : diámetro exterior del cilindro productor de roca congelada, m

D_c : diámetro interior de dicho cilindro

H_c : profundidad de congelación

Los valores de D_o y D_i se calculan por las expresiones:

$$D_o = D_t + 2 R_o \quad (\text{VIII.15})$$

$$D_i = D_t - 2 R_i \quad (\text{VIII.16})$$

donde:

D_t : diámetro de la circunferencia de ubicación de los taladros de congelación (su cálculo se realiza por las expresiones (VIII.4, VIII.5 y VIII.7)

R_o : radio exterior de congelación de la roca alrededor de la columna de enfriamiento

R_i : radio interior de congelación de la roca alrededor de la columna de enfriamiento

$$R_o = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \frac{(D_t - D_L)^2}{3^2}} \quad (\text{VIII.17})$$

$$R_i = \frac{1}{2} \sqrt{l^2 + (D_t - D_L)^2} \quad (\text{VIII.18})$$

donde:

l : distancia entre taladros

D_L : diámetro de laboreo del pozo

Durante el proceso de congelación el frío se gasta: en enfriar al macizo rocoso desde una temperatura t_i hasta una temperatura t_c ; en enfriar el agua contenida en la roca desde la temperatura t_i hasta la temperatura de 0°; en transformar el agua en hielo y en enfriar el hielo hasta una temperatura t_c .

La cantidad de calor que durante este proceso se le quita al macizo rocoso se puede calcular por las siguientes expresiones:

para enfriar el agua hasta 0° (q_1):

$$q_1 = \gamma a \cdot V_a \cdot C_a (t_i - t_o), \text{ kcal} \quad (\text{VIII.19})$$

para transformar el agua en hielo (q_2):

$$q_2 = \gamma a \cdot V_a \cdot q_o, \text{ kcal} \quad (\text{VIII.20})$$

para enfriar el hielo hasta t_c (q_3):

$$q_3 = \gamma h \cdot V_h \cdot C_h (t_o - t_c), \text{ kcal} \quad (\text{VIII.21})$$

para enfriar la roca del macizo (q_4):

$$q_4 = \gamma r \cdot V_r \cdot C_r (t_i - t_c), \text{ kcal} \quad (\text{VIII.22})$$

donde:

γ_a, γ_h y γ_r : densidad del agua, hielo y roca, kg/m³

V_a y V_r : volumen de agua y roca, m³

C_a, C_h y C_r : calor específico del agua, hielo y roca, kcal/kg.grado

q_o : cantidad de calor necesaria para el cambio de estado líquido a sólido (agua-hielo), kcal/kg; se toma de 80 kcal/kg

t_i : temperatura inicial antes de empezar el proceso de congelación

t_c : temperatura final, después del proceso de congelación

Conociendo q_1 , q_2 , q_3 y q_4 se puede determinar la cantidad total de calor que se le quita al macizo q :

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \quad (\text{VIII.23})$$

Tiempo de congelación

Un parámetro de significativo interés es el tiempo necesario T_c para formar el cilindro protector de roca-hielo con las dimensiones deseadas y a partir de las condiciones dadas.

Para la determinación de este parámetro T_c existen varias expresiones, entre ellas las más usadas son:

a) Según el criterio del profesor Trupak:

$$T_c = \frac{(1+x) \rho E^2}{192 (T_c - T_p)} \log \frac{1/2 E}{d_T} \quad (\text{VIII.24})$$

b) Según la transferencia de calor entre la roca y los taladros de congelación:

$$T_c = \frac{Q}{(Q_1 + Q_2) 24} \quad (\text{VIII.25})$$

c) Según la velocidad de crecimiento del cilindro protector:

$$T_c = \frac{R_c}{V} \quad (\text{VIII.26})$$

donde:

ρ : cantidad de calor contenida en las rocas

E : espesor del cilindro protector (ver expresiones VIII.1, VIII.2, y VIII.3)

x : coeficiente que tiene en cuenta variaciones en la cantidad de calor que contiene el macizo

T_c : temperatura de congelación

T_p : temperatura promedio del agente congelante

d_t : diámetro del taladro

Q : cantidad total del calor que se le quita al macizo; se calcula por la expresión (VIII.23)

Q_1 : capacidad de los taladros congelantes de transmitir calor, se calcula por la expresión (VIII.13)

Q_2 : gasto frío para contrarrestar las variaciones de calor

R_c : radio del cilindro protector

V : velocidad de crecimiento de la zona congelada; orientativamente según datos de la práctica para terrenos arenosos $V = 0,025$ m/día y para arcilla $V = 0,01$ a $0,015$ m/día

VIII.2. RED DE CONGELACION

La red de congelación (ver Fig. VIII.1) consta de las siguientes partes:

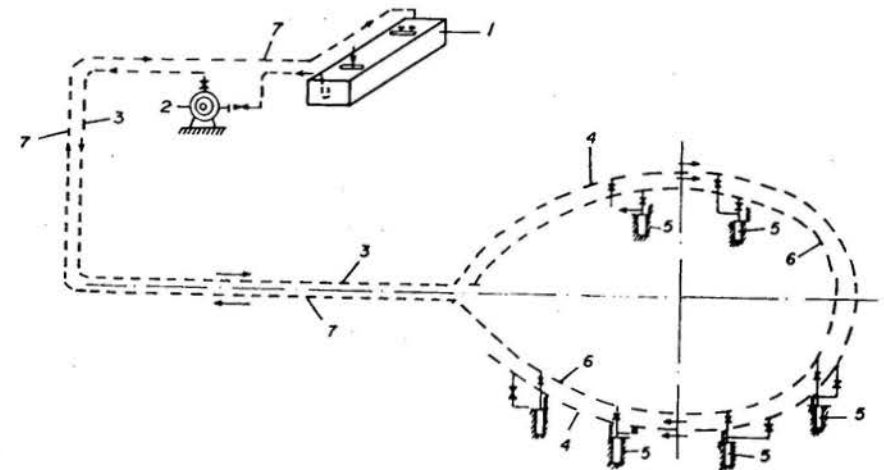


FIGURA VIII.1. Esquema de la red de congelación. 1-evaporador, 2-bomba, 3-tubería de llegada del agente, 4-tubería distribuidora, 5-taladros de congelación, 6-tubería colectora, 7-tubería de salida del agente.

- De las columnas (taladros) de congelación con las tuberías de unión.
- De las tuberías magistrales: distribuidora, colectora y de llegada (alimentación) y salida del agente congelante con sus respectivas estructuras de apoyo.
- De los equipos de medición y control.

La solución refrigerante, en el evaporador de la estación frigorífica, es bombeada y llevada a través de la tubería de alimentación y de distribución a los diferentes taladros de congelación.

Por la parte interior de la tubería (de alimentación) la solución llega al fondo del taladro y después sube por la exterior hasta la superficie, desde donde a través de la tubería de unión pasa a la colectora y de ahí se envía nuevamente la solución frigorífica al evaporador, repitiéndose el ciclo.

El diámetro de las tuberías magistrales puede ser calculado por la expresión:

$$d_t = \frac{4 W}{\pi V_a}, \text{ m} \quad (\text{VIII.27})$$

donde:

V_a : velocidad con que circula la solución frigorífica en las tuberías, habitualmente $V_a = 1,5$ a $2,0$ m/s

W : cantidad de solución que circula en la red

El valor de W se puede calcular por la expresión:

$$W = \frac{Q_e}{A t \cdot \gamma_a \cdot C_a}, \text{ m}^3/\text{h} \quad (\text{VIII.28})$$

donde:

Q : productividad de la estación de congelación, kcal/h

t : diferencia de temperatura de la solución cuando entra en los taladros de congelación y cuando sale, grados celsius

γ_a : densidad de la solución frigorífica, kg/m^3

C_a : capacidad calorífica de la solución, kcal/kg

Habitualmente son empleadas tuberías con diámetros entre 100 y 200 mm; si según los cálculos es necesaria una mayor capacidad se colocan varias tuberías unidas.

Estas tuberías magistrales (desde la estación hasta la distribución), habitualmente son colocadas en trincheras buscando la distancia más corta.

En caso de terrenos arcillosos se recomienda (para los países fríos) que la profundidad de colocación de ellos esté por debajo de la profundidad de congelación de la roca.

Para disminuir la pérdida de frío en las tuberías éstas se colocan sobre juntas de madera y se recubren con un material aislante.

Como ya se señaló, la tubería magistral de alimentación se une a la de distribución, en tanto que la colectora a la de salida; esto para el caso de un pozo de sección circular conduce a que se forme como un aro abierto (con una abertura) (ver Fig. VIII.2).

Para este tipo de construcción, la suma total de distancia recorrida (por la tubería de distribución y colectora) para cada taladro va a ser la misma, lo cual beneficia la uniformidad del proceso de congelación de los diferentes taladros.

En ocasiones, con el objetivo de no entorpecer los trabajos en el pozo, las tuberías distribuidoras (1) y colectora (2) (Fig. VIII.2) son colocadas

en galerías especiales. En caso de que esté hecha la boca del pozo, esta galería habitualmente se hace durante su fortificación.

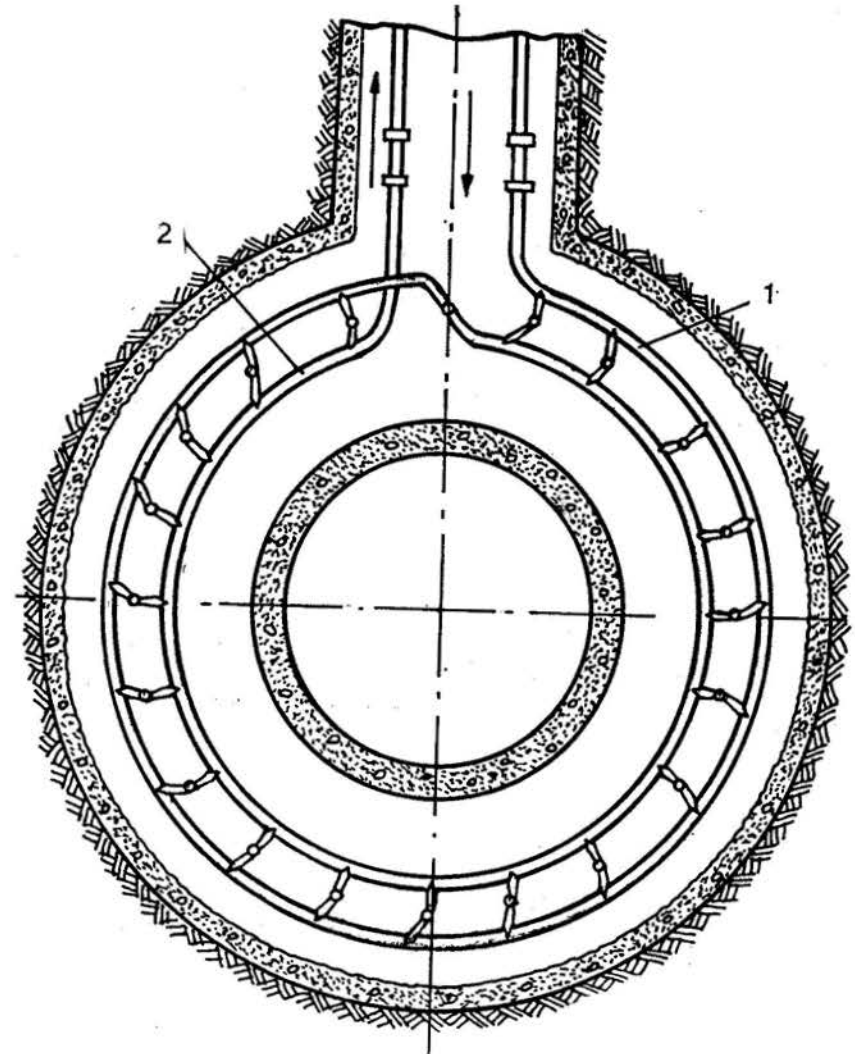


FIGURA VIII.2. Esquema para un pozo circular. 1-tubería de distribución, 2-colector.

Cuando los trabajos de congelación anteceden al laboreo de la boca del pozo, para la construcción de la galería se realiza el laboreo y fortificación de una trinchera circular alrededor del futuro pozo.

La altura de esta galería debe tener por lo menos 1,8 m y su ancho ha de ser tal que garantice la comodidad de ubicación en ella de las diferentes tuberías y las normas de seguridad (ver Fig. VIII.3)

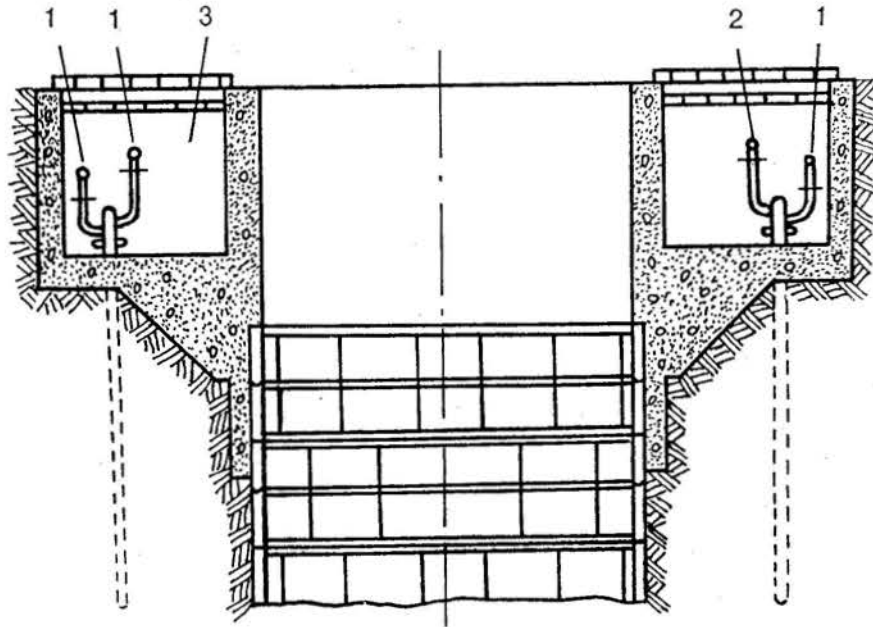


FIGURA VIII.3. Galería para la ubicación de la tubería distribuidora y colectoras. 1-tubería distribuidora, 2-tubería colectora, 3-galería.

Esta galería debe estar alumbrada y comunicada con la estación de frío mediante un sistema de señales.

Con respecto a las tuberías de alimentación y de congelación (en los taladros) sus diámetros deben tener una relación tal que se logre que la solución refrigerante llegue rápidamente al fondo del taladro (para que pierda la menor cantidad posible de frío) y después que suba más lentamente, con el objetivo de que "tome" el calor del macizo circundante. Por ello se recomienda que la tubería interior (de alimentación) tenga un diámetro de 25 a 50 mm, en tanto que la exterior (de congelación), de 100 a 200 mm. Para estos valores se logra velocidad de alimentación de la solu-

ción de 1 a 1,5 m/s, en tanto que la velocidad de ascenso es mucho más lenta de 0,08 a 0,2 m/s.

Estos valores de los diámetros y de las velocidades garantizan un intenso trabajo de enfriamiento en el macizo rocoso.

El éxito de los trabajos de congelación depende en gran medida de la calidad de las tuberías de congelación y de la calidad en sus uniones. La rotura de estas tuberías o la mala unión entre ellas conduce a que se derrame solución frigorífica en el macizo, lo cual siempre produce efectos negativos. Si esto sucede antes de la congelación del macizo, la zona afectada no se va a congelar a la temperatura prevista, en tanto que si sucede posteriormente puede provocar el "derretimiento" de una determinada zona del macizo ya congelado.

La rotura de las tuberías de congelación puede ocurrir debido a la existencia de altas tensiones térmicas (provocadas por las bajas temperaturas); a la acción de la presión de las aguas durante su congelamiento (debido al aumento de su volumen) y al hinchamiento de la roca.

Por estas causas es recomendable para las tuberías de congelación emplear tubos de paredes finas (de 7 a 8 mm) de metal y de polietileno.

VIII.3. ESTACION FRIGORIFICA. CALCULO DE SU PRODUCTIVIDAD

El frío necesario para el congelamiento de la zona del macizo rocoso que rodea al pozo se produce en la estación frigorífica. Habitualmente son usadas estaciones frigoríficas estacionarias, aunque en ocasiones para pozos poco profundos o en casos de necesitarse solamente la congelación parcial, se emplean estaciones frigoríficas móviles.

Como norma la estación frigorífica va a estar constituida por las siguientes instalaciones: compresor, condensador, evaporador y también por un grupo de equipos e instrumentos auxiliares.

Por el congelamiento de la roca en calidad de solución frigorífica son usadas soluciones de cloruro de calcio (Cl_2Ca) o de cloruro de magnesio (Cl_2Mg), estando el uso de la primera más difundido. En la práctica es habitual el uso del Cl_2Ca con una densidad de 1,23 a 1,25 g/cm^3 , solución cuya temperatura de congelación oscila desde 28 a 35 °C.

Como se ha expresado, esta solución frigorífica en los taladros congelantes quita calor en las rocas, enfriandolas, en tanto que en la estación entrega el calor, refrigerándose por sí misma.

La obtención de temperaturas bajas en la estación frigorífica se basa en el principio de la absorción de calor del ambiente al pasar algunas sustancias (por ejemplo: amoníaco NH_4 , ácido carbónico CO_2) del estado lí-

quido al gaseoso. Tales sustancias se denominan agentes frigoríficos. En la práctica la mayor aplicación la tiene el amoníaco, debido a que con el uso de este agente la instalación frigorífica se hace más simple.

El paso del amoníaco al estado gaseoso se produce en el evaporador (estación frigorífica). El calor para su evaporación el amoníaco lo recibe de la solución refrigerante. Los vapores de amoníaco producidos en el evaporador se absorben por el compresor a la temperatura de -25°C y a la presión de 0,15 a 0,16 MPa y ahí los comprime hasta una presión de 0,8 a 1,2 MPa. Como resultado de ello la temperatura del amoníaco (en estado gaseoso) se eleva hasta los $+100^{\circ}\text{C}$. Después este amoníaco comprimido a una alta presión y temperatura pasa al condensador, en donde se enfría con agua hasta una temperatura de 15 a 20 grados, este amoníaco enfriado a esta alta y constante presión (de 0,8 a 1,2 MPa) pasa paulatinamente al estado líquido. Desde los condensadores el amoníaco se dirige hacia el evaporador a través de una tubería que posee una válvula reguladora que hace disminuir la presión del amoníaco de nuevo hasta una presión de 0,15 a 0,16 MPa, y como resultado de esto la temperatura del amoníaco líquido disminuye hasta los 25°C ; de ahí en adelante este ciclo se repite.

Un segundo ciclo cerrado que se produce en la estación frigorífica es el dado por el momento en la solución frigorífica. Así tenemos que esta solución enfriada en el evaporador se envía mediante el bombeo y a través de la tubería magistral y de distribución a los taladros de congelación. Al pasar por estos taladros la temperatura de la solución refrigerante aumenta en varios grados. De ahí esta solución, mediante la tubería colectora y de rechazo, va de nuevo a enfriarse al evaporador.

La diferencia de temperatura entre la solución refrigerante que llega y la que sale no es constante en todo el proceso de congelación de la roca. En los primeros días de este proceso puede llegar a 4 o 5 grados, después lentamente esta diferencia va decreciendo hasta que se hace de 2 a 3 grados y por último al final del proceso puede llegar a ser hasta de 1 grado.

Otro ciclo cerrado que se produce en la estación frigorífica es el debido al movimiento del agua destinada al enfriamiento del amoníaco en el condensador.

El cálculo de la cantidad de frío necesaria para el congelamiento de la zona del macizo deseada se hace a partir de la cantidad de calor que contiene dicha roca y de su conductividad térmica.

La cantidad de calor que contiene la roca depende de su densidad, del contenido de agua y de su capacidad calorífica.

En forma general la cantidad de frío Q_f que se necesita para congelar la zona deseada del macizo rocoso puede ser calculada por la expresión:

$$Q_f = q \cdot V_c, \text{ kcal} \quad (\text{VIII.29})$$

donde:

q : cantidad de frío necesario para congelar 1 m^3 de roca, kcal/ m^3

V_c : volumen de roca que se congela, m^3

Si se conocen las propiedades termotécnicas del macizo, el valor de q se puede calcular por la expresión (VIII.23) vista anteriormente referida a 1 m^3 de roca. Y el volumen de roca V_c que va a ser congelado es igual a

$$V_c = \frac{(D_o^2 - D_f^2)}{4} \cdot H_c, \text{ m}^3 \quad (\text{VIII.30})$$

La productividad de la estación frigorífica se calcula a partir de la magnitud de la transferencia de calor que tiene lugar en los taladros de congelación teniendo en cuenta las pérdidas de frío en las diferentes redes; de tal forma esta productividad Q_E puede calcularse por la expresión:

$$Q_E = K \cdot Q_T, \text{ kcal/h} \quad (\text{VIII.31})$$

donde:

K : coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas de frío en las redes, su valor se toma de 1,15 a 1,20

Q_T : capacidad total de transferencia de calor que tienen los taladros de congelación

La magnitud de Q_T se puede calcular por la expresión:

$$Q_T = q_o \cdot F, \text{ kcal/h} \quad (\text{VIII.32})$$

siendo:

q_o : coeficiente de transferencia de calor a través de 1 m^2 de taladro, $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$

F : superficie interior del taladro de congelación

$$F = \pi d_f H_c N, \text{ m}^2 \quad (\text{VIII.33})$$

VIII.4. PERFORACION DE LOS TALADROS DE CONGELACION

Los taladros de congelación pueden hacerse con perforación de percusión o rotatoria. La perforación rotatoria desde el punto de vista de la

velocidad de perforación que se logra y de su costo es más ventajosa que la de percusión, pero tiene como desventaja la gran posibilidad existente de que se desvíe de la dirección prevista, en particular con el aumento de la profundidad de perforación.

Los taladros de congelación, como ya se señaló, se disponen habitualmente en una circunferencia (menos frecuentemente en dos) concéntrica al pozo. El centro de esta circunferencia coincide con el del pozo (ver Fig. VIII.4)

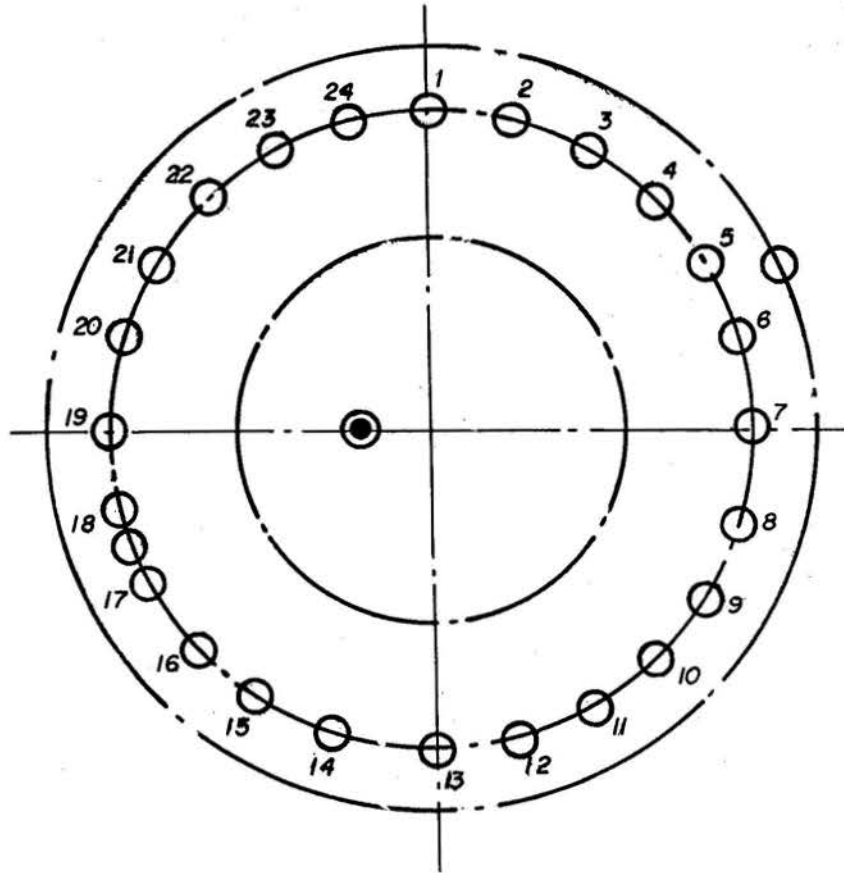


FIGURA VIII.4. Esquema de disposición de los taladros de congelación y de control.

Además de los taladros de congelación se perforan varios taladros para el control del proceso de congelación (términos e hidrogeológicos).

Los taladros térmicos se usan para medir la temperatura de la roca; habitualmente se laborean dos de ellos; uno ubicado entre dos taladros de congelación vecinos y otro en el límite exterior del cilindro protector (ver Fig. VIII.4). En caso de condiciones hidrogeológicas difíciles y para temperaturas de congelación muy bajas la cantidad de estos taladros se aumenta.

En tanto, los taladros de control hidrogeológico (uno o dos) se perforan habitualmente en el contorno del pozo. Ellos habitualmente se perforan hasta el horizonte acuífero principal y en su extremo inferior se coloca un filtro.

La perforación de los taladros, para la realización del proceso de congelación, dentro de todo el conjunto de tareas de construcción del pozo, se considera la operación más trabajosa y que ocupa un mayor tiempo.

Otro aspecto a tener en cuenta es que a estos taladros se les exige tener una mínima desviación (de 0,5 a 1,0 %). Esta exigencia se puede satisfacer fácilmente con la perforación de percusión, pero como se señaló, con ella se alcanza una baja velocidad de perforación y aumenta su costo.

Actualmente para estos fines lo más usado es la perforación rotatoria de turbina, conjuntamente con el empleo de medios modernos para medir la desviación del taladro y métodos para corregir la desviación de los taladros de su dirección.

En el proceso de perforación de los taladros, debido a la colocación incorrecta de la instalación de perforación o del instrumento de trabajo, cuando existen en el macizo inclusiones de rocas duras y a causa de la poca experiencia de los perforadores, pueden ocurrir desviaciones de la vertical.

Por esto en el proceso de perforación de los taladros es necesario sistemáticamente realizar su control, o sea, verificar su desviación de la vertical.

VIII.5. PROCESO DE CONGELACION DE LA ROCA Y SU CONTROL

Para iniciar los trabajos de congelación de la roca es necesario tener concluido el montaje de la estación frigorífica y de la red de congelación, incluyendo los taladros de congelación, y haber comprobado su estado y su hermeticidad.

El proceso de congelación de la roca habitualmente se divide en 2 etapas o períodos:

La activa es cuando se forma el cilindro de roca-hielo con las dimensiones requeridas, y la pasiva, en la que se mantienen estas condiciones durante el período proyectado de construcción del pozo.

Etapa activa de congelación

En la etapa activa la solución frigorífica enfriada a la temperatura mínima posible se envía a los taladros de congelación en forma continua (todo el día) con el objetivo de formar el cilindro protector con las dimensiones previstas en el menor tiempo posible.

Durante los primeros días de congelación activa la temperatura de la solución frigorífica debe ir disminuyéndose gradualmente para evitar la posibilidad de que surjan tensiones térmicas de altos valores que puedan romper las tuberías de congelación. Por esta causa, la temperatura de trabajo activo de la solución frigorífica se alcanza a los 6-8 días de iniciado el proceso de congelación.

Durante las primeras 2 o 3 semanas de trabajo la diferencia de temperatura de la solución refrigerante cuando llega al taladro de congelación y cuando sale, llega a ser de 4 a 5°, después esto va disminuyendo y esta diferencia puede llegar hasta 1°. Menos de un grado de diferencia se produce raramente.

La temperatura a que se debe enfriar la solución frigorífica se determina a partir del valor tomado en el proyecto para la resistencia lineal a compresión de la pared del cilindro protector.

Por ejemplo, si según el proyecto se establece que la resistencia a compresión de la arena es de 12 MPa, esta magnitud se puede alcanzar disminuyendo su temperatura hasta - 10°. Por consiguiente, para este caso (para lograr esta resistencia) hay que enfriar este macizo a dicha temperatura.

A fin de obtener una temperatura promedio en la arena de - 10° para una distancia entre taladros de congelación de 1 m es necesario disminuir la temperatura de la roca que rodea a los taladros hasta - 15 a - 17°. La diferencia de temperatura entre la solución frigorífica y la roca habitualmente es de 3 a 5°; por lo que la temperatura de la solución frigorífica que sale será de 18 a 22°, y por ende de 21 a 25° la temperatura de la solución entrante.

La velocidad de aumento del espesor del cilindro de roca-hielo (según el radio) alrededor de los taladros de congelación en terrenos arenosos para los primeros días del proceso de congelación es de 0,06 a 0,07 m/día.

Gradualmente esta velocidad va descendiendo hasta llegar a los 0,01 - 0,02 m/día. Para los cálculos se recomienda tomar un valor de 0,025 m/día.

Para los terrenos arcillosos la velocidad de crecimiento del espesor del cilindro protector se puede tomar para los cálculos de 0,01 a 0,015 m/día

La velocidad de crecimiento del espesor del cilindro protector según el radio alrededor de los taladros de congelación depende de una serie de factores:

- características de las rocas que se congelan.
- cantidad de agua que contiene el macizo.
- temperatura de la solución frigorífica.
- distancia entre los taladros de congelación.

Los más importante de ellos son la temperatura con que llega la solución frigorífica al taladro y la distancia entre taladros de congelación.

La distancia de la temperatura alrededor de los taladros de congelación según la vertical para diferentes profundidades no es uniforme. Esto se explica en primer lugar por la heterogeneidad del macizo (el pozo atraviesa distintas capas de rocas), lo cual provoca diferencias en el contenido de agua de estas capas y diferentes capacidades caloríficas de ellas, y en segundo lugar, por la variación de la temperatura de la solución frigorífica a medida que sube.

Sobre la marcha del proceso de congelación se puede juzgar por los siguientes factores:

- Diferencia de temperatura entre la solución frigorífica que llega y sale del taladro de congelación.
- Cantidad de calor que toma la solución frigorífica.
- Temperatura de la roca, que se mide en los taladros de control.
- Variación del nivel de las aguas subterráneas.
- Espesor de las paredes del cilindro protector.

La cantidad de calor que toma la solución frigorífica del macizo, o lo que es igual, la cantidad de frío que entrega dicha solución al macizo, se puede determinar por los valores obtenidos en los termómetros colocados en los taladros de congelación.

La cantidad de frío que se entrega al macizo se puede determinar por la expresión:

$$Q = V_s \gamma_s C_s (t_s - t_e) \quad (\text{VIII.34})$$

donde:

V_s : cantidad de solución frigorífica, m³

γ_s : densidad de la solución frigorífica, kg/m³

C_s : capacidad calorífica de la solución frigorífica, kcal/kg

t_e : temperatura a la que la solución frigorífica llega al taladro, grados

t_s : temperatura con que la solución frigorífica sale del taladro de congelación, grados

El proceso activo de congelación del macizo puede realizarse por 2 esquemas de inyección de la solución frigorífica: el paralelo y el de cascada.

En el primer esquema la solución frigorífica se hace llegar simultáneamente a todos los taladros de congelación, según el segundo esquema la solución va llegando en forma sucesiva a parejas de taladros de congelación dispuestos diametralmente (ver Fig. VIII.5).

La elección de la primera pareja de taladros de congelación en los que se va a iniciar el proceso se determina por las condiciones concretas que existan; por ejemplo, si se conoce la dirección del movimiento de las aguas subterráneas, entonces esta primera pareja puede colocarse según un diámetro que coincide con dicha dirección.

Las ventajas del sistema de cascada son las siguientes:

- Posibilidad de que el agua salga libremente hasta el momento que se cierre el cilindro protector. Esto, según criterio de algunos especialistas, es importante a la hora de instalar la fortificación.
- Posibilidad de realizar el proceso de congelación a través de diferentes taladros.
- Una capacidad menor de la instalación frigorífica.
- Mayor y mejor control del proceso de congelación.

La desventaja de este esquema es la gran duración del proceso de congelación.

Cuando la cantidad de frío transmitida al macizo rocoso alcanza la magnitud prevista en el proyecto para la formación del cilindro protector con las dimensiones calculadas, se puede pensar que el período de congelamiento activo ha concluido.

Sin embargo, esto no es suficiente, es necesario lograr que las paredes del cilindro protector se cierren y que la temperatura de la roca allí alcance la proyectada.

En la etapa activa de congelación en los taladros de control hidrogeológico se realizan sistemáticamente observaciones del nivel de las aguas subterráneas. Al iniciarse el proceso de congelación el nivel de las aguas subterráneas no varía o es poco variable; más tarde, al comenzar a cerrarse las paredes del cilindro protector y debido al aumento del volumen producido por el congelamiento, el agua contenida en la roca aún no congelada va a derramarse, y debido a que la única salida que tiene dicha agua es el taladro de control hidrogeológico en él se va a observar un aumento continuo del nivel de las aguas; por último, al final de este proceso se producirá la salida del agua, por este taladro, a la superficie. Este hecho sirve como señal de que concluyó completamente el cierre de la pared del cilindro protector.

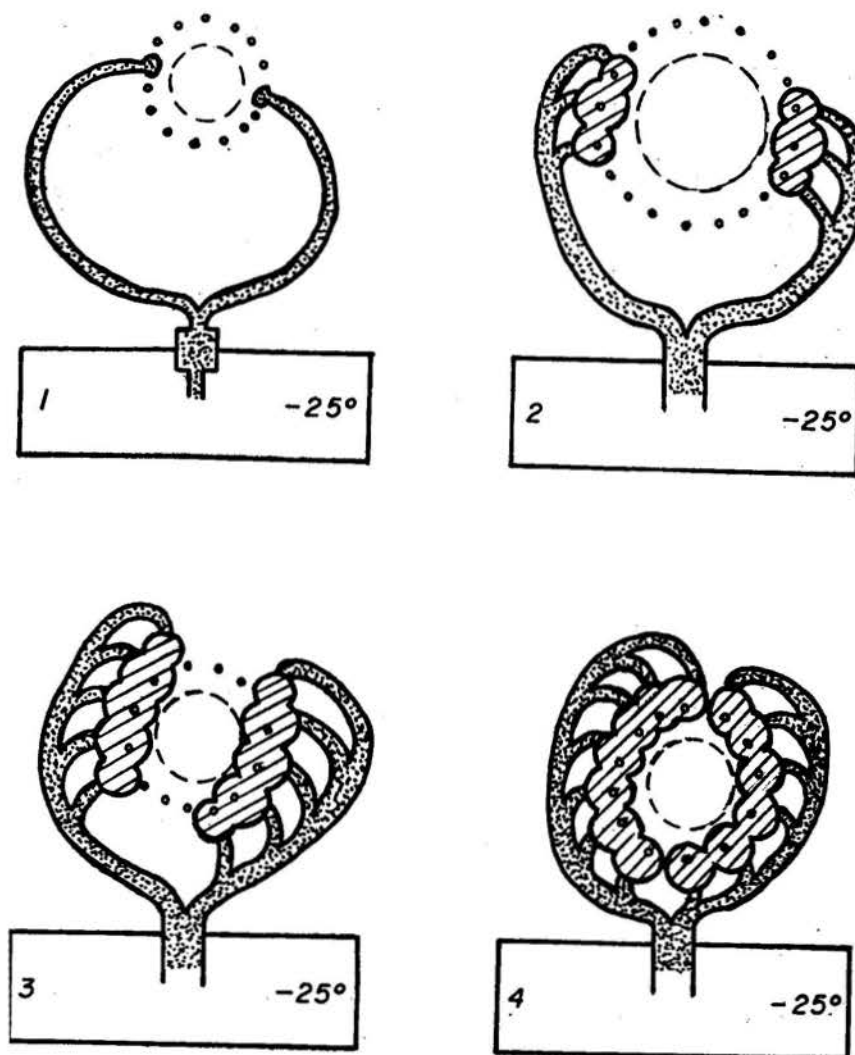


FIGURA VIII.5. Esquema de cascada para el congelamiento del macizo.

Si se hiciese necesario proceder al congelamiento simultáneo de varios horizontes, entonces se puede perforar para cada horizonte un taladro de control hidrogeológico; otra variante es perforar un taladro de control de un diámetro mayor que el habitual y disponer en su interior una tubería concéntrica acorde al número de horizontes acuíferos. En este caso se debe prever el hidroaislamiento de los diferentes horizontes.

Con respecto a los taladros de control destinados a medir la temperatura (térmicos), se puede señalar que debido a que este parámetro en gran medida determina la resistencia de la roca, estos taladros se deben perforar en los lugares más representativos desde el punto de vista de poder establecer la resistencia del cilindro protector. Se consideran como más representativos los siguientes lugares (ver Fig. VIII.4): entre 2 taladros vecinos de congelación, en la frontera de influencia de la zona fría y en los límites de la pared del cilindro protector.

Un momento significativo en el proceso de congelación es cuando se logra el cierre de los diferentes cilindros de roca-hielo (para cada taladro de congelación).

Puede ocurrir que algunas zonas del macizo se hayan quedado sin congelar lo cual se puede deber, entre otras, a las siguientes causas:

- desviación de los taladros de su dirección
- insuficiente disminución de la temperatura de la solución frigorífica
- gran velocidad de las aguas subterráneas.

O sea, se forman las llamadas "ventanas" a través de las cuales en el proceso de laboreo llega al pozo agua y roca movediza.

Etapa de congelación pasiva

Durante el período pasivo el cilindro protector va a recibir la cantidad de frío que necesita para conservar sus dimensiones; o sea, la función de esta etapa de congelación es contrarrestar el calor que llega desde el macizo a la pared exterior del cilindro de roca-hielo.

La magnitud de este calor va a depender de la profundidad de congelación y para su determinación existen diferentes expresiones, entre ellas la de H-G Trupak que se da a continuación:

$$Q_c = -1,13 \sqrt{\lambda_o C_o \gamma_o t_i} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{g} \quad (\text{VIII.35})$$

donde:

- λ_o : conductividad térmica de la roca no congelada, kcal/m · h · g
- C_o : capacidad calorífica de la roca no congelada, kcal/kg · g
- γ_o : masa volumétrica de la roca no congelada, kg/m³
- t_i : tiempo transcurrido desde que se inició el proceso de congelación, h

La diferencia esencial entre la etapa activa y pasiva de congelación es la cantidad de frío que se hace llegar a los taladros de congelación.

En el período pasivo de congelación de las rocas el costo de explotación de la estación frigorífica puede alcanzar valores significativos, en particular cuando esta etapa dura un largo tiempo. Incluso en algunos casos, el costo de explotación en esta etapa puede ser superior al de la etapa de congelación activa.

La duración del período pasivo de congelación viene dado por el tiempo necesario para laborear y fortificar el pozo.

Durante el período pasivo de congelación la estación frigorífica trabaja a un 30 o 40 % de su capacidad en relación con el período activo.

VIII.6. VARIANTES ESPECIALES DEL PROCESO DE CONGELACION

De igual forma que el método fundamental de congelación de la roca, o sea, de una sola vez a través de taladros perforados desde la superficie a todo el espesor de la roca acuífera inestable, en la práctica se emplean otros esquemas de congelación, tales como: congelación por zonas, congelación escalonada, congelación con la circulación invertida de la solución frigorífica, congelación en condiciones de filtración de agua y otros.

Congelación por zonas

Este método se emplea en los siguientes casos: el pozo atraviesa inicialmente una roca estable y seca y después una roca acuífera que exige el proceso de congelación, sobre la capa de roca inestable acuífera yace una roca seca y estable, la parte inicial (superior) del pozo está laboreada y para continuar su construcción hace falta el empleo del método de congelación.

En tales situaciones con el objetivo de economizar medios y tiempo, se procede al congelamiento de la zona de roca inestable.

El método de congelación zonal se puede realizar según 2 variantes, desde la superficie y desde el frente del pozo.

Para la variante de congelación desde la superficie, como en el método habitual, los taladros de congelación se perforan desde la superficie a toda la profundidad. En la columna (taladros) de congelación en este caso se ubican no uno sino dos tuberías; una de ellas, la de alimentación (1) (ver Fig. VIII.6) llega prácticamente hasta el fondo del taladro, en tanto que la segunda tubería (2) (la de salida) queda de 3 a 5 m del techo de la zona de roca acuífera inestable.

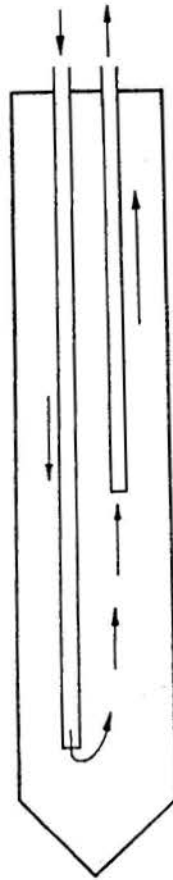


FIGURA VIII.6. Construcción de la columna de congelación.

Durante el proceso de congelación de la roca, según esta variante, la solución frigorífica llega hasta el fondo del taladro por la tubería (1) y después comienza a subir, inicialmente por el espacio que queda detrás de la tubería y después por la tubería (2).

De tal forma se logra que se produzca un intercambio térmico intenso entre la solución frigorífica y la roca en la parte inferior del taladro, o sea, en el sector BC que coincide con la zona de roca inestable acuífera. En tanto, en el sector AB se produce una transferencia térmica menos signifi-

cativa, la cual en el proyecto se toma de un 30 a un 50 % de la que se produce en el sector BC.

La variante de congelación zonal desde el frente del pozo se emplea en aquellos casos en que las zonas acuíferas estén ubicadas a una profundidad significativa.

Las ventajas de esta variante son: disminución del volumen de perforación y de la roca a congelar, en tanto que las desventajas son: necesidad de construir una cámara en el pozo y el aumento de su tiempo de laboreo.

Cuando se perforan los taladros desde la superficie se tiene la posibilidad de simultanear los trabajos de avance del pozo en su parte superior (roca seca y estable) con los de congelación de las rocas en la parte inferior (zona de roca acuífera inestable).

Para la variante de perforación de los taladros desde el frente del pozo esta posibilidad no existe. Aquí el trabajo se realiza en el siguiente orden: laboreo de la parte superior del pozo, construcción de la cámara, perforación de los taladros de congelación, proceso de congelación de la roca y continuación de los trabajos de avance en el pozo.

La utilidad de empleo de una u otra variante del método de congelación zonal se determina a partir de la comparación económica entre las variantes y de las exigencias planteadas en relación con el tiempo de terminación de la obra.

Congelación escalonada

Se diferencia del método habitual en que en este caso el congelamiento de las rocas no se realiza de una sola vez para todo el espesor de la zona de roca acuífera, sino por sectores.

El congelamiento de la roca, según este método, se puede realizar en varios sectores (lo más habitual es en 2 o 3 sectores). Como es normal los taladros de congelación se perforan a toda la profundidad de proyecto. En estos taladros se ubican 2 tuberías. La tubería de alimentación llega hasta 3 o 4 m por debajo del piso del sector de roca acuífera que se quiere congelar, en tanto que la tubería de salida queda 3 o 4 m por arriba del techo de dicho sector.

Después de realizado el proceso de congelación de la roca en este sector se continúa el laboreo del pozo y simultáneamente se produce de igual forma a la explicada al proceso de congelación del siguiente sector.

Congelación con el movimiento invertido de la solución frigorífica

Habitualmente el proceso de congelación de las rocas se realiza con la llegada al fondo del taladro de congelación de la solución frigorífica a través de la tubería de alimentación y se eleva por el espacio que queda entre esta tubería y el contorno del taladro de congelación.

Según este método de circulación invertida la solución frigorífica llega al taladro de congelación por su parte superior (a través de una tubería) y se desplaza hacia abajo del taladro por él para elevarse después por una tubería de pequeño diámetro que llega hasta el fondo del taladro.

La ventaja de este método consiste en que se logra una congelación más intensa de la parte superior del taladro, lo cual permite disminuir el tiempo de espera para el inicio de los trabajos de laboreo del pozo.

Congelación sin empleo de la "solución frigorífica"

El proceso de congelación de las rocas sin el empleo de la solución frigorífica se diferencia del habitual en que en lugar del Cl_2Ca a los taladros de congelación llega directamente el amoníaco en estado líquido.

Las ventajas de este método son: una tecnología de trabajo más simple; una temperatura más baja del agente frigorífico ya que se excluye la transferencia de calor entre el amoníaco y la solución frigorífica en el evaporador.

Por primera vez este método se empleó en el año 1845 en una mina de Holanda.

Existen varios esquemas de este método; el más difundido consiste en lo siguiente (ver Fig. VIII.7):

El amoníaco líquido desde el depósito (1) y a través de la válvula de regulación llega al separador 3, en donde se produce la separación de la mezcla de amoníaco (vapor-líquido) en amoníaco líquido y gaseoso. De aquí el amoníaco líquido llega al depósito (4) desde donde mediante el bombeo (5) y a través del distribuidor (6) se inyecta a los taladros de congelación (7).

La circulación del amoníaco líquido en los taladros de congelación es igual a la que realiza la solución frigorífica. En los taladros de congelación se produce la transferencia térmica entre el amoníaco líquido y el macizo rocoso, debido a lo cual la temperatura de éste se eleva en 2 o 3 °C.

Después que sale de los taladros de congelación el amoníaco va al colector (8) y desde ahí a la tubería en donde debido a la disminución de la presión, entra en ebullición, o sea, del amoníaco líquido se desprende

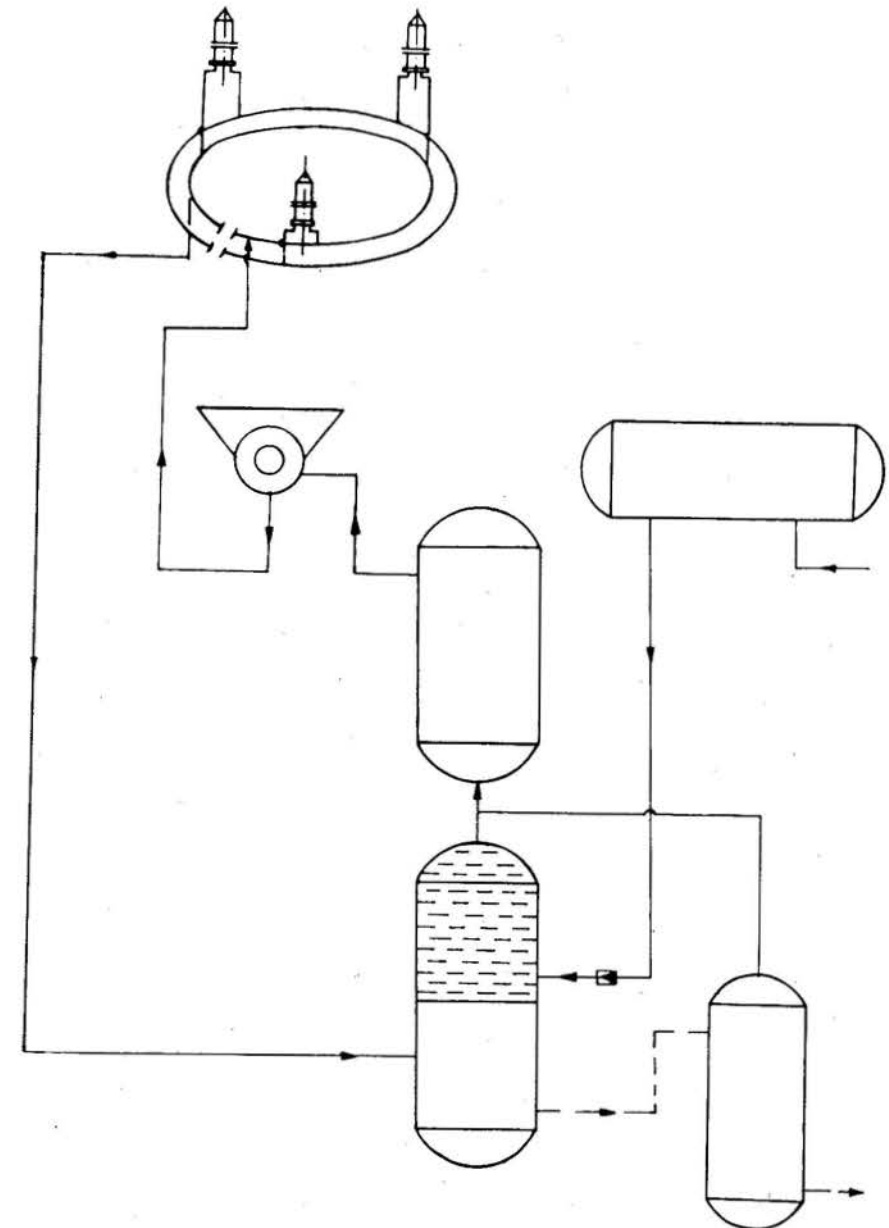


FIGURA VIII.7. Esquema de congelación directa.

vapor, al llegar al separador (3) tiene lugar la separación del amoníaco líquido y el vapor.

El vapor de amoníaco producido en este proceso va desde el separador de líquido (3) al (9). Desde este separador (9) el vapor de amoníaco pasa a través del compresor y el condensador, transformándose en amoníaco líquido. De ahí en adelante el ciclo se repite.

VIII.7. LABOREO DEL POZO EN LA ZONA CONGELADA

El laboreo del pozo en la zona congelada es posible iniciarlo después que concluye la etapa activa de congelación.

El arranque de la roca se puede realizar de diferentes formas, en dependencia del estado en que ella se encuentre, así tenemos que en ocasiones la roca inestable no congelada se puede arrancar directamente con los *greifers* de carga, en otros casos se exige el trabajo de los martillos rompedores (cuando estas rocas inestables parcial o totalmente se congelan) para separar las rocas del macizo.

Para el arranque de roca congelada con martillos rompedores se recomienda hacer un corte central en el pozo hasta 50 o 60 cm de profundidad y después ir complementando el arranque desde el centro a la periferia. En estos casos de rocas débiles e inestables se prohíbe el uso de los trabajos con explosivos. Estos trabajos sólo se permiten utilizar en caso de rocas fuertes y estables (por ejemplo, calizas y areniscas congeladas).

Al utilizar los trabajos de perforación y explosivos en roca congelada se deben observar una serie de requisitos para evitar con aquéllos que se dañe la cortina de roca-hielo.

Tales medidas son: los barrenos se perforan a una menor profundidad (de 1,2 a 1,5 m); los barrenos de contorno se colocan a por lo menos 300 m de la pared del pozo (a causa de esta medida por la periferia del pozo va a quedar una cantidad de roca sin arrancar, lo cual se hace con los martillos), el ángulo de inclinación de estos barrenos debe ser de 75 a 78°, la sustancia explosiva que se use debe ser del tipo de las amonitas caracterizadas por su estabilidad a bajas temperaturas. El gasto específico de sustancia explosiva varía en dependencia del estado y fortaleza de la roca que se quiere arrancar y habitualmente es distinta para los diferentes tipos de barrenos (corte, arranque y de contorno).

Los barrenos se perforan con martillos neumáticos o con taladros eléctricos. En general, la utilización de equipos neumáticos en zonas de roca congelada exige una atención al trabajo de estos equipos dada la

posibilidad de congelación que tienen debido a la humedad del aire comprimido.

La longitud de los pasos de laboreo va a depender del tipo de roca y su estado, del espesor del cilindro de hielo-roca y de la carga que sobre él actúa y de las condiciones hidrogeológicas entre otros factores. Este parámetro se determina en el proyecto de la obra.

Para la carga de las rocas son usadas las tinas normales, las cuales se llenan con el empleo de las cargadoras tipo *greifers*; el agua no congelada que se encuentra dentro del pozo se debe sacar en las tinas; el uso del bombeo se prohíbe durante el laboreo en rocas congeladas.

Si en una zona congelada de roca débil llega agua al pozo los trabajos de avance deben detenerse hasta que se definan las causas, y de ser necesario se proceda de nuevo a la congelación de dicho sector.

Los trabajos de mantenimiento se deben realizar estrictamente por un proyecto aprobado por el ingeniero principal de la obra; el trabajo de avance continuará sólo cuando se hayan comprobado los resultados.

Sistemáticamente se realiza, por el personal debidamente autorizado, la observación del frente de trabajo y de las paredes desnudas del pozo con el objetivo de detectar cualquier indicio de que los trabajos no marchan bien; por ejemplo, aparición en la roca de solución frigorífica, manifestaciones de deformación en la roca congelada y otras.

Los resultados de esta observación deben quedar escritos en un cuaderno; la fortificación temporal se debe instalar cuando más a 2 m del frente.

El revestimiento en esta fortificación debe hacerse discontinuo para poder observar por los espacios que quedan el estado de la roca congelada.

A los obreros que trabajan en la zona congelada debe garantizárceles la ropa y botas adecuadas.

VIII.8. FORTIFICACION DEL POZO EN LA ZONA CONGELADA

En la zona de roca congelada se pueden utilizar los mismos tipos de fortificaciones que se usan en las condiciones habituales. En la práctica mundial las más utilizadas actualmente son la fortificación de blindas metálicas y la de hormigón monolítico, y sólo en caso de grandes presiones (minera e hidrostática) son utilizadas fortificaciones más complejas.

Las principales exigencias planteadas a la fortificación de hormigón de los pozos verticales laboreados a través de roca congelada son: alta impermeabilidad, densidad y estabilidad ante la acción de aguas agresivas.

La impermeabilidad que tenga la fortificación monolítica de hormigón va ligada a la densidad del hormigón. Una mayor densidad se alcanza: disminuyendo la relación agua-cemento de la mezcla hasta un mínimo ($a/c = 0,35$ a $0,4$), aumentando el contenido de cemento (hasta 450-500 kg) por 1 m^3 de hormigón, empleando áridos finos de calidad y colocando la mezcla de hormigón con vibradores.

El aumento de la estabilidad del hormigón ante la acción de aguas agresivas se logra aumentando la densidad del hormigón y con el empleo de cementos especiales.

Una de las principales dificultades que existe en el empleo de la fortificación de hormigón monolítico y otras a base de cemento (la de piedra, prefabricados, etc.) en zonas congeladas es que el proceso de endurecimiento del cemento a temperaturas por debajo de $+ 15 \text{ }^\circ\text{C}$ se hace muy lento, y a temperaturas de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ prácticamente cesa.

Para contrarrestar este efecto es necesario que la mezcla de hormigón cuando salga de la mezcladora tenga una temperatura de alrededor de $40 \text{ }^\circ\text{C}$, para lo cual se hace necesario el calentamiento previo de los componentes. Esto se hace buscando que cuando el hormigón (ya en la fortificación) comience a enfriarse, tenga por lo menos un 70 % de la resistencia prevista en el proyecto. Este proceso de rápido endurecimiento del hormigón se ayuda con la añadidura de diferentes actividades químicas.

Para lograr que la fortificación de hormigón tenga la calidad requerida se deben cumplir una serie de requisitos; siendo los principales:

- emplear un cemento Portland de 40-50 MPa de resistencia
- el espesor de la fortificación en la zona congelada debe ser por lo menos de 50 cm
- la temperatura de la mezcla de hormigón al salir de la mezcladora debe ser de alrededor de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para el caso de altas presiones minera e hidrostática, o cuando se atraviesa una zona de roca acuífera e inestable de gran potencia son utilizadas fortificaciones de construcciones más complejas, algunas de las cuales se mencionan a continuación:

- fortificación de blindas de hierro con el relleno del espacio detrás de las blindas con una capa de hormigón de 250 a 300 mm de espesor.

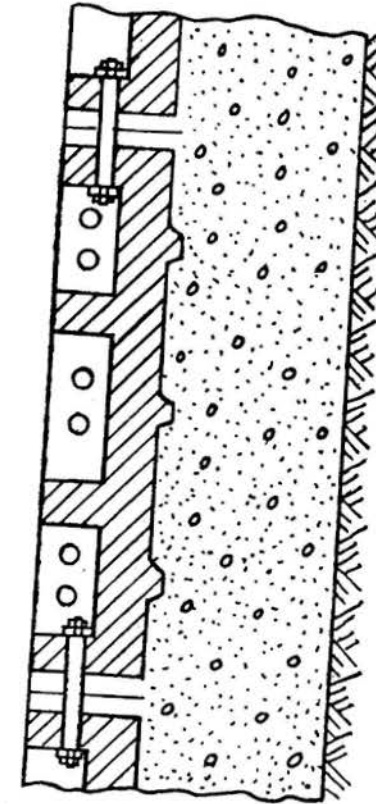


FIGURA VIII.8. Fortificación de blindas de hierro y hormigón monolítico.

- fortificación con dos estructuras de salidas metálicas y el relleno de los espacios entre ellas y detrás de ellas con hormigón.

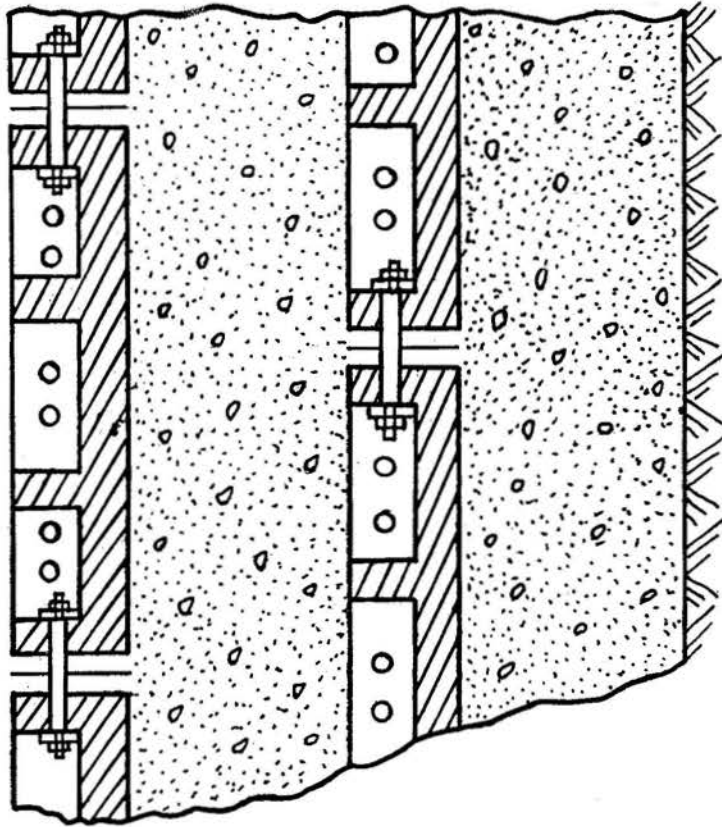


FIGURA VIII.9. Fortificación de doble estructura de blindas metálica y hormigón.

- fortificación con cilindros metálicos rellenos de hormigón, con una capa de betum para la aislación y el relleno con hormigón.

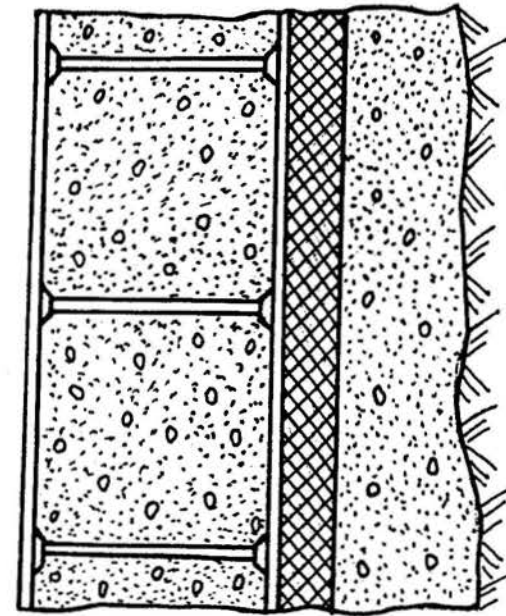


FIGURA VIII.10. Fortificación con cilindro metálico, aislamiento con betumen y relleno de hormigón.

- fortificación con un perfil metálico relleno con hormigón, una capa de betum como aislante y relleno con hormigón.

En ocasiones, para mejorar las condiciones de hermeticidad de esta fortificación, se recomienda emplear hormigón plástico.

La organización de los trabajos para la construcción de la fortificación se analiza a partir del caso que se muestra en la Fig. VIII.12, y que no es más que la fortificación vista anteriormente.

depende en gran medida la hermeticidad y resistencia de esta fortificación.

VIII.9. DESCONGELACION DEL MACIZO

Después que se termina la construcción del pozo, en la zona congelada, concluye la etapa pasiva de congelación y se pasa a la descongelación de esa parte del macizo, lo cual puede hacerse en forma natural o artificial.

El descongelamiento natural se produce a cuenta del calor de la tierra, o sea, tiene lugar sin gastos de energía. Como desventajas de esta variante tenemos la gran duración que va a tener esta etapa de descongelamiento y la forma irregular en que este proceso se va a manifestar, lo cual provoca que la presión sobre la fortificación crezca no uniformemente y como resultado de ello esta pueda deformarse y hasta afectarse su hermeticidad.

Por esta causa el descongelamiento de la roca habitualmente se hace por vía artificial. Para ello, y utilizando las mismas redes y taladros de congelación, se hace circular una solución calentada. Otra variante para el descongelamiento artificial es inyectar aire calentado por el pozo, o una combinación de las dos mencionadas; estas dos últimas opciones son poco empleadas.

Para evitar que se produzcan en forma súbita altas tensiones térmicas al pasar por los taladros soluciones calentadas, el proceso de calentamiento de la solución debe hacerse gradualmente subiendo 2 o 3 grados al día su temperatura. La temperatura final de la solución no debe exceder de los 35 °C.

El período de descongelación es un momento de gran importancia durante la construcción de pozos con el congelamiento de la roca, ya que solamente después del descongelamiento total de la roca se puede juzgar sobre la calidad de la construcción, sobre lo correcto de la elección del tipo de fortificación y sobre su impermeabilidad.

El control de este proceso de descongelación se hace a través de los taladros de control térmico de vía indirecta; para evaluar este proceso nos sirve la desaparición de las escarchas de la fortificación.

La penetración de agua al pozo, durante el proceso de descongelación, debe ser solucionado en forma inmediata; si la fortificación es de hormigón, mediante el taponamiento del espacio de detrás de la fortificación; si es de blindas metálicas, por medio de la colocación de planchas metálicas.

Después de concluido el proceso de descongelación de la roca se procede a desmontar la estación frigorífica y las diferentes tuberías.

Por último, los taladros de congelación y los de control se rellenan con una solución de arena-cemento.

VIII.10. TIEMPO DE CONSTRUCCION Y COSTO DE LOS POZOS CONSTRUIDOS CON EL CONGELAMIENTO DE LA ROCA

El tiempo total de construcción de los pozos (T_t) con este método especial de laboreo va a estar en dependencia de la duración de una serie de actividades: perforación de los taladros de perforación, proceso de congelación de la roca, montaje de los equipos de laboreo y laboreo-fortificación del pozo. En este análisis no se ha tenido en cuenta el período preparatorio.

El tiempo (T_1) necesario para la perforación de los taladros (de congelación y control) depende de la cantidad de taladros (N) y de su profundidad (H_c), del tipo de roca, del tipo y cantidad (n) de instalaciones de perforación. Su magnitud se puede determinar por la expresión:

$$T_1 = \frac{N \cdot H_c}{n \cdot V_p \cdot K_s}, \text{ meses} \quad (\text{VIII.36})$$

donde:

V_p : velocidad de perforación, m/mes

K_s : coeficiente de simultaneidad en el trabajo de las instalaciones de perforación para $n = 1$, $K_s = 1$, para $n = 2$, $K_s = 1,2$ a $1,3$ para $n = 3$, $K_s = 1,3$ a $1,5$

Después que concluye la perforación de los taladros se procede a la construcción de la galería, al montaje de las redes, son colocadas las tuberías en los taladros de congelación y se realizan todos los trabajos necesarios para proceder al congelamiento de la roca. La duración de estos trabajos (T_2) habitualmente oscila entre 1 a 1½ mes.

El tiempo necesario para el proceso de congelación se calcula por una de las expresiones vistas (VIII.24 a VIII.26) y se designa por T_3 .

Habitualmente durante la perforación de los taladros y en el período comprendido desde la terminación del proceso de congelación de las T_2 se realiza el montaje de la estación frigorífica, de las máquinas de ascenso y de toda una serie de equipamientos.

Durante el período de congelación de las rocas (T_3) se monta la torre de sobremina y se concluye el montaje del equipamiento necesario para iniciar el laboreo del pozo.

Para los casos de una buena organización de los trabajos se logra que al finalizar la etapa activa de congelación pueda inmediatamente iniciarse el laboreo del pozo.

El tiempo de laboreo del pozo (T_4) depende de su profundidad (H_c) y de la velocidad de laboreo (V_L); se determina por la expresión:

$$T_4 = \frac{H_c}{V_L} \text{ , meses} \quad (\text{VIII.37})$$

La velocidad promedio de laboreo de los pozos en rocas congeladas es de 30 a 35 m/mes para el caso de empleo del esquema sucesivo, mientras que para el esquema paralelo o el simultáneo puede alcanzar 40-45 m/mes. Esta velocidad como se ve es menor que la velocidad de laboreo en condiciones normales; esto se debe a que en muchas ocasiones hay que arrancar la roca con martillos rompedores; a la dificultad en los trabajos a la hora de construir fortificaciones más complejas, entre otras causas. Después de laboreado y fortificado se procede a garantizar la máxima hermeticidad de la fortificación (mejorando sus condiciones de aislamiento) colocando placas, con el taponamiento del espacio detrás de la fortificación y otras. El tiempo que dura estas operaciones (T_5) se puede calcular por la expresión:

$$T_5 = \frac{H_c}{V_a} \text{ , meses} \quad (\text{VIII.38})$$

donde:

V_a : velocidad promedio de los diferentes trabajos encaminados a mejorar las condiciones aislantes de la fortificación, m/mes

El tiempo (T_6) necesario para el armado del pozo se puede calcular por la expresión:

$$T_6 = \frac{H_c}{V_{ar}} \text{ , meses} \quad (\text{VIII.39})$$

donde:

V_{ar} : velocidad de armado, según la experiencia su valor es de 200 a 300 m/mes

Además de los gastos de tiempo principales mencionados ocurre una serie de gastos de tiempo al pasar de una actividad a otra (por ejemplo, del laboreo al mejoramiento de las condiciones de hermeticidad de la fortificación o de esta actividad al armado), y también en la realización de una serie de operaciones finales (desmontaje de las plataformas de trabajo, tuberías, etc.). El tiempo invertido en este conjunto de actividades se designa por T_7 y su duración puede oscilar entre 1,0 y 1,5 mes.

Entonces el valor de T_t se puede calcular por la expresión:

$$T_t = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 \text{ , meses} \quad (\text{VIII.40})$$

El costo de construcción de un pozo con el empleo del método de laboreo con congelación de la roca va a estar dado por el costo de las siguientes actividades: costo de perforación de los taladros, costo del proceso de congelación de las rocas, costo de laboreo, costo de la fortificación y de su hidroaislación y costo del armado.

El costo de 1 m de pozo construido con el empleo de este método depende del tipo de fortificación usado y oscila de 3 000 a 3 500 pesos.

El congelamiento del macizo rocoso durante el laboreo de pozos es el método especial más difundido, utilizándose este método no sólo en la industria minera, sino también en la construcción de túneles, metros, construcciones hidrotécnicas y otras.

CAPITULO IX

PERFORACION DE POZOS

Durante la perforación de los pozos se crean las condiciones necesarias para la automatización de su laboreo, garantizándose la ausencia de obreros en el frente trabajo, ya que todas las operaciones pueden dirigirse desde la superficie. Muchas veces en la literatura se diferencia la perforación de pozos y la perforación de taladros de gran diámetro (1,2 a 2,2 m). Esta diferenciación en gran medida es artificial, ya que en ambos casos el principio y forma de realización de los trabajos, en lo esencial, es igual. Los denominados taladros de gran diámetro habitualmente juegan el rol de pozos auxiliares; muy frecuentemente, de ventilación.

Durante la perforación de los pozos se usan 2 métodos de perforación: el de percusión y el de rotación. La perforación por percusión tiene como ventaja que con su empleo se logra conservar la verticalidad del pozo, y como desventaja esencial, la baja velocidad de laboreo, en tanto que con el empleo de la perforación por rotación se hace más difícil mantener la verticalidad del pozo, pero se alcanzan velocidades de avance mayores; este último método es el más usado.

Dentro de la perforación por rotación y según la ubicación del mando del instrumento de perforación se diferencia la perforación con rotor, en la que se coloca esta instalación en la superficie, y la de turbina reactiva, en la cual se coloca en el pozo junto con el instrumento de perforación.

Como ejemplo del primer grupo tenemos las UZTM soviéticas; las TH de la firma Kato japonesas; las de Robins (USA) y otras; en tanto que como ejemplo de la turbina reactiva tenemos las RTB soviéticas.

Otra forma de diferenciación dentro de la perforación rotatoria es a partir del hecho de que se perfore a sección completa (o sea, se destruye la roca en todo el frente) o que se perfore sólo por el perímetro del pozo (perforación de columna), separando el núcleo (testigo) de la parte perforada del resto del macizo y después sacándolo del pozo sin destruir.

El equipamiento y tecnología que se emplea para la perforación de los pozos depende, entre otros factores, del destino del pozo, su profundi-

dad, sus características constructivas, las características ingeniero-geológicas de las rocas, etc.

Las instalaciones de perforación y agregados se diferencian por los siguientes aspectos:

Forma en que se produce el avance (cómo se produce la destrucción de la roca), lugar de ubicación del órgano de trabajo y cantidad de fases en que se realiza la perforación.

En la actualidad, a escala industrial la perforación de pozos de minas con los diámetros habituales (mayores de 6 m), sólo es posible efectuarla en rocas débiles e inestables, tales como arenas acíferas, arcillas, margas, etcétera.

En rocas de fortaleza hasta 6-7 se pueden perforar pozos hasta de 6 m de diámetro, en tanto que pozos (o taladros de gran diámetro) de 2,0 a 2,8 m de diámetro se pueden perforar hasta en rocas que tienen una fortaleza de 12, según la escala de Protodiakonov.

La perforación de los pozos se hace utilizando en el "lavado soluciones arcillosas" (lodo de perforación). Esta arcilla al penetrar en las grietas de las rocas las fortalece. La extracción de este lodo del pozo o taladros en el proceso de perforación se hace con el empleo de bombas o elevadores de aire (*airlift*).

Durante el laboreo de pozos el lavado puede ser directo, de retroceso y periódico.

El lavado directo (Fig. IX.1) consiste en que la solución mediante el bombeo se envía al frente; una vez allí esta solución lava el instrumento de perforación y después sube por el espacio concéntrico entre tuberías hasta el depósito de limpieza en donde se eliminan las partículas de roca que contiene y de nuevo se envía esta solución al frente.

Esta variante de lavado se emplea para pequeños diámetros.

El lavado en retroceso (Fig. IX.2) consiste en que la solución desde el depósito de limpieza llega por gravedad, a través de una canal, hasta el pozo y asciende hasta el frente de trabajo. Después del lavado la solución va a la tubería de absorción del elevador de aire (*airlift*) y desde ahí se envía a la superficie por tubería.

Esta variante es muy empleada en los pozos de diámetro normal.

La potencia que debe tener la instalación de perforación está en dependencia de la superficie (área) que se quiere perforar de una vez en el pozo. Por esta razón habitualmente el pozo no se laboreo de una sola vez a su sección completa (la de proyecto) sino por fases. En tales casos son empleados unos agregados llamados ampliadores. Con el aumento del número de fases de perforación el tiempo en que se laboreo aumenta y por esta causa el número de fases se tiende a disminuir. Si la perforación se va a emplear sólo para laborear la parte del pozo que atraviesa roca

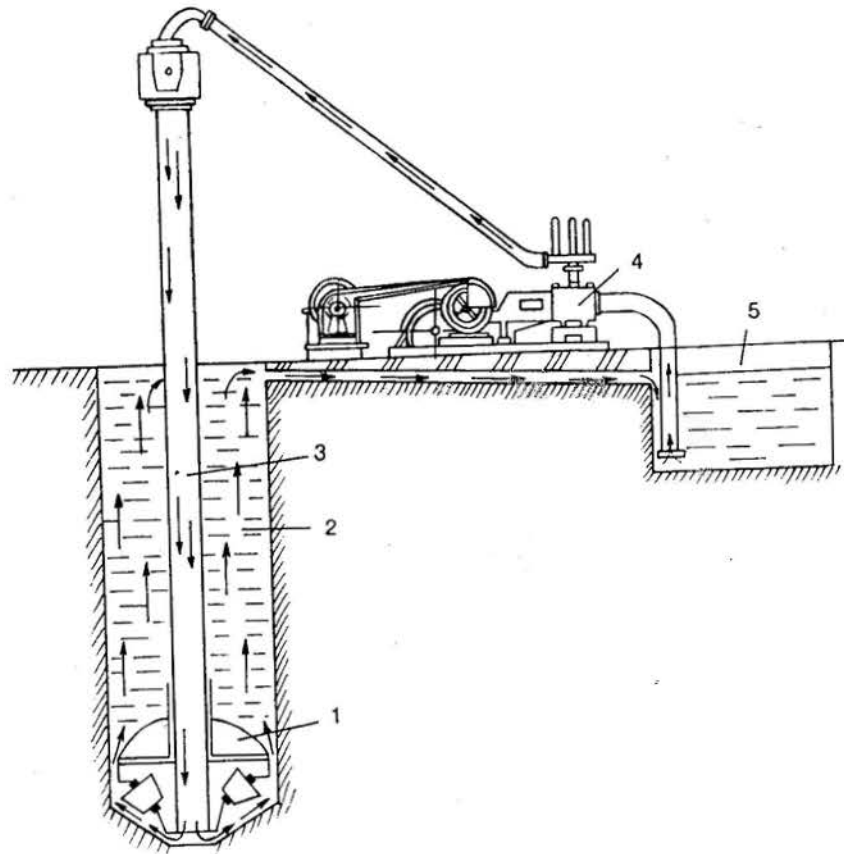


FIGURA IX.1. Esquema de lavado directo. 1-instrumento de fragmentación, 2-espacio entre la tubería y la pared, 3-columna de perforación, 4-bombas, 5-instalación de limpieza.

inestable entonces esta operación se puede considerar cumplimentada cuando el pozo ha sido perforado y fortificado en la zona inestable e incluso profundizado de 8 a 10 m en la roca estable.

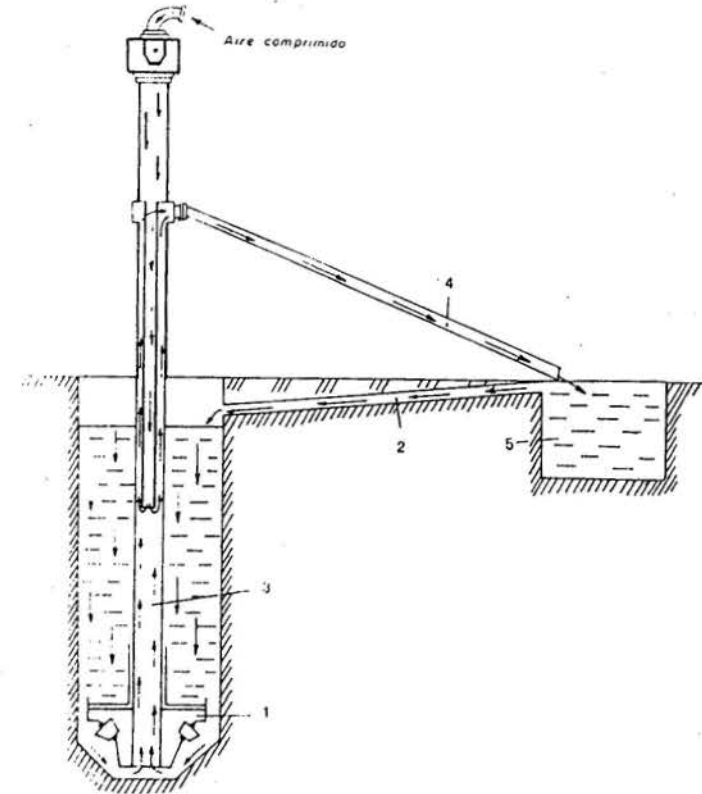


FIGURA IX.2. Esquema de lavado en retroceso. 1-instrumento de fragmentación, 2-canal por gravedad, 3-columna de perforación, 4-tubería, 5-instalación de limpieza

Antes de comenzar los trabajos de perforación es necesario concluir la construcción de la boca del pozo, instalar la torre de perforación y montar todo el equipamiento de perforación.

Una desventaja que tiene este método especial de laboreo de pozos es el tiempo que se necesita invertir cuando termina la perforación en el desmontaje de todo el equipamiento de perforación y en el montaje de todo el equipamiento necesario para continuar con los trabajos de construcción.

IX.1. ALGUNOS ASPECTOS DE LA PERFORACION ROTATORIA

Este método de perforación para la construcción de pozos, según se conoce, se emplea desde fines del pasado siglo.

El laboreo de pozos con el empleo de la perforación rotatoria consta de las siguientes operaciones fundamentales:

- construcción de la torre y montaje del equipamiento de perforación.
- perforación del pozo.
- instalación de la fortificación.
- rellenado del espacio que queda detrás de la fortificación con una solución taponante.

La perforación rotatoria preferentemente se emplea para la perforación de pozos que se laborean en rocas débiles y acuíferas, tales como: arenas acuíferas, arcilla, margas y otras. Este método de perforación confronta serias dificultades cuando se encuentran intercalaciones de roca dura, arena de pedazos gruesos y de rocas cársticas debido a que en dichas situaciones se pueden producir pérdidas significativas de la solución de arcilla.

Habitualmente el pozo no se perfora a sección completa de una vez sino en varias fases. En tales casos inicialmente se perfora a toda la profundidad un taladro de 1,0 a 1,2 m, el cual más tarde se va ampliando hasta el área proyectada para la sección del pozo.

Tanto durante la perforación de este taladro como después durante el proceso de su ampliación (en una o varias fases) las paredes del pozo se fortalecen por la acción de la solución arcillosa.

Este taladro que se hace inicialmente tiene varias funciones:

- Sirve para garantizar la dirección del instrumento de perforación durante la posterior ampliación del taladro.
- Se puede utilizar para realizar el rellenado de grietas (taponamiento) cuando se atraviesa zonas rocosas de estas características.
- Para precisar las informaciones geológicas e hidrogeológicas, concretamente de la zona en que se construye el pozo.
- En este taladro se pueden determinar mediante mediciones geodésicas las desviaciones de la vertical que ha sufrido, lo cual permite, a tiempo, tomar las medidas necesarias para la corrección de la desviación.
- Ayuda a crear condiciones favorables para el empleo del elevador de aire (*airlift*).

Cuando la perforación del pozo se hace en varias fases, el equipo de perforación va a sufrir tensiones mucho menores que cuando se perfora el

pozo de una sola vez a sección completa; debido a esto se puede dirigir la construcción del equipo de perforación y disminuir su potencia.

Sin embargo, al aumentarse el número de fases se reduce la velocidad de laboreo del pozo. Por todas estas razones el número de fases se elige teniendo en cuenta todos los factores señalados.

Cuando se tienen datos suficientemente exactos de las características geológicas de las rocas en las que se perfora y cuando las condiciones son favorables se puede perforar el pozo en dos fases; inicialmente se perfora un pozo de 2 m de diámetro y en la segunda fase se amplía en 2,5 a 4,0 m, o sea, hasta un diámetro de 4,5 a 6,0 m. De no ser así, se recomienda hacer inicialmente el taladro inicial (de 1,0 a 1,2 m de diámetro) y después hacer 2 o 3 fases de ampliación.

La perforación del pozo se da por terminada, cuando él ha sido laboreado a diámetro completo por todo el espesor de roca inestable e incluso profundizando complementariamente de 5 a 10 m en roca dura impermeable.

Un esquema característico de trabajo durante la perforación por rotación se da en la Fig. IX.3. Según este esquema la roca se destruye con el trépano y, después, esta roca destruida se saca del pozo por la solución arcillosa a través de la tubería de ventilación con la ayuda del elevador de aire.

A la solución arcillosa con el contenido de partículas de roca destruida se le denomina pulpa. Durante la perforación del pozo tiene lugar la constante circulación de la solución arcillosa, la cual además de la función antes mencionada (sacar del pozo la roca destruida) protege a las paredes del pozo de la destrucción y sirve como medio para enfriar los instrumentos de trabajo.

Debido a la alta densidad de la solución arcillosa y a la gran velocidad con que ella se mueve; es posible que esta eleve hasta la superficie las partículas de las rocas destruidas, esta solución arcillosa debe prepararse con agua limpia y debe poseer una densidad de 1,20 a 1,25 g/cm³.

Durante la perforación de los pozos la calidad de la solución arcillosa puede variar en dependencia de las características de la roca que se atraviese; por ejemplo, al perforarse por roca arcillosa esta solución se enriquece e incluso se ha logrado en tales casos formar una solución natural inyectando sólo agua limpia en el pozo.

Por otra parte tenemos que el cuarzo y los silicatos prácticamente no influyen en la calidad de la solución arcillosa, en tanto que los carbonatos y rocas sufrosas tienden a empeorar la calidad de dicha solución.

Un rol importante durante la perforación rotatoria de los pozos, ya que de su trabajo depende significativamente la velocidad de perforación, lo tiene el elevador de aire (*airlift*).

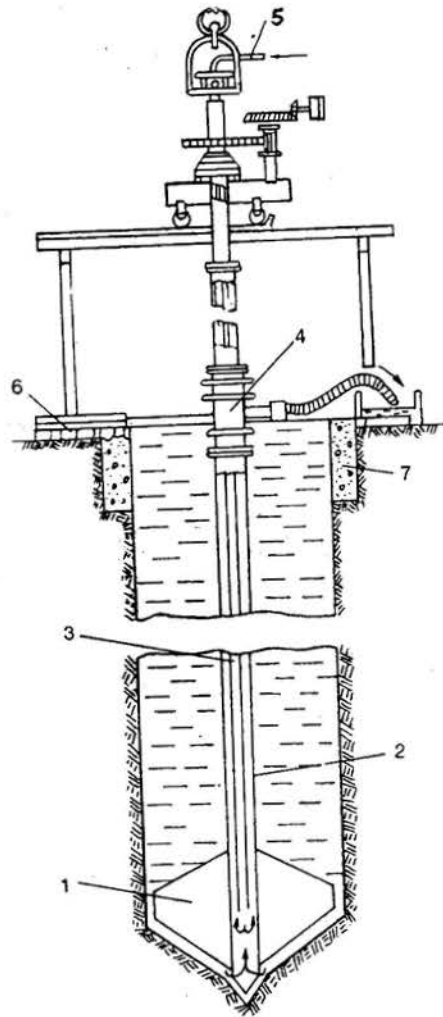


FIGURA IX.3. Esquema de trabajo de la perforación rotatoria. 1-amplificador, 2-tubería de perforación, 3-tubería del elevador de aire, 4-tubería recolectora de polvo, 5-tubería para aire comprimido, 6-acumulación de solución arcillosa, 7-boca del pozo.

Este "equipo" consta de 2 tuberías: una exterior de 120-150 mm y otra interior de 25 a 50 mm de diámetro por la que se inyecta aire comprimido. Este aire más tarde se eleva por el espacio comprendido entre las 2 tuberías mezclándose con la solución arcillosa formando una especie de emulsión. Debido a esto la densidad de la mezcla arcillosa disminuye y tiende a elevarse arrastrando consigo las partículas destruidas de roca.

El elevador de aire y el pozo representan un sistema de vasos comunicantes que contiene 2 líquidos de diferentes densidades (Fig. IX.4)

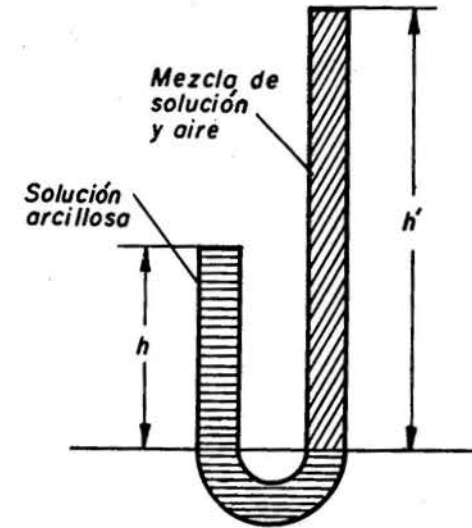


FIGURA IX.4. Sistema de vasos comunicantes.

El equilibrio entre las dos columnas de estos líquidos se puede dar por la expresión:

$$h\gamma = h_1 \gamma_1 \quad (IX.1)$$

donde:

h : altura de la columna de la solución arcillosa

γ : densidad de la solución arcillosa

h_1 : altura de la columna de la emulsión

γ_1 : densidad de la emulsión

La densidad de la emulsión es aproximadamente de 0,5, en tanto que la de la solución oscila de 1,1 a 1,2. Si sustituimos estos valores en la expresión (XI.1) se obtiene:

$$h_1 = 2,2 \text{ a } 2,4 \text{ h} \quad (\text{IX.2})$$

IX.2. PERFORACION ROTATORIA CON PERFORADORAS DE ROTOR

Se emplea desde la década de los años 30 del presente siglo para el laboreo de pozos en rocas débiles y medianamente fuerte.

Para la perforación de pozos por este método se emplea el equipamiento habitual conocido de los pozos de petróleo; en este caso en la superficie nos encontraremos con las siguientes construcciones: torre de perforación, edificio de compresores, calderas, taller mecánico, depósitos de materiales y otros.

Antes de comenzarse los trabajos de perforación se construye la boca del pozo hasta una profundidad de 15 a 30 m; después de esto se procede a instalar el equipamiento necesario.

En dependencia de la fortaleza de la roca y del diámetro previsto el pozo puede laborearse en varias fases. Por ejemplo, para el caso en que se emplea la instalación soviética UZTM-6,2 el pozo se perforará en 2 fases si la roca es débil (a 1,2 y 6,2 m de diámetro); si la roca es fuerte (1,2 - 3,6 a 6,2 m).

En la Fig. IX.5 se ofrece un esquema de una instalación de perforación de ese tipo.

El taladro inicial se perfora utilizando un trépano de 3 fresas, con el lavado directo. El proceso de llevar hasta el frente el trépano de perforación o el ensanchador (7) se realiza con una velocidad de 0,1 a 6 cm/min y se hace con el empleo del winche de la perforadora (3).

Durante la ampliación del taladro inicial se utiliza el lavado en retroceso o en paralelo.

En el primero de los casos la solución arcillosa llega al pozo por gravedad o mediante el bombeo y gradualmente desciende hasta el frente del pozo al ligarse con la roca destruida (en el proceso de ampliación del taladro) se forma la pulpa que se envía a la superficie con el empleo del elevador de aire (*airlift*).

El empleo del lavado invertido garantiza una limpieza buena y continua del frente de trabajo debido a la gran velocidad que adquiere en su movimiento la solución arcillosa, motivado esto por la pequeña área de circulación. Esto garantiza, para pequeños gastos de solución arcillosa, una disminución de la energía necesaria para la destrucción de la roca del frente y aumento de la velocidad de perforación como resultado de lo cual se disminuye el costo de construcción.

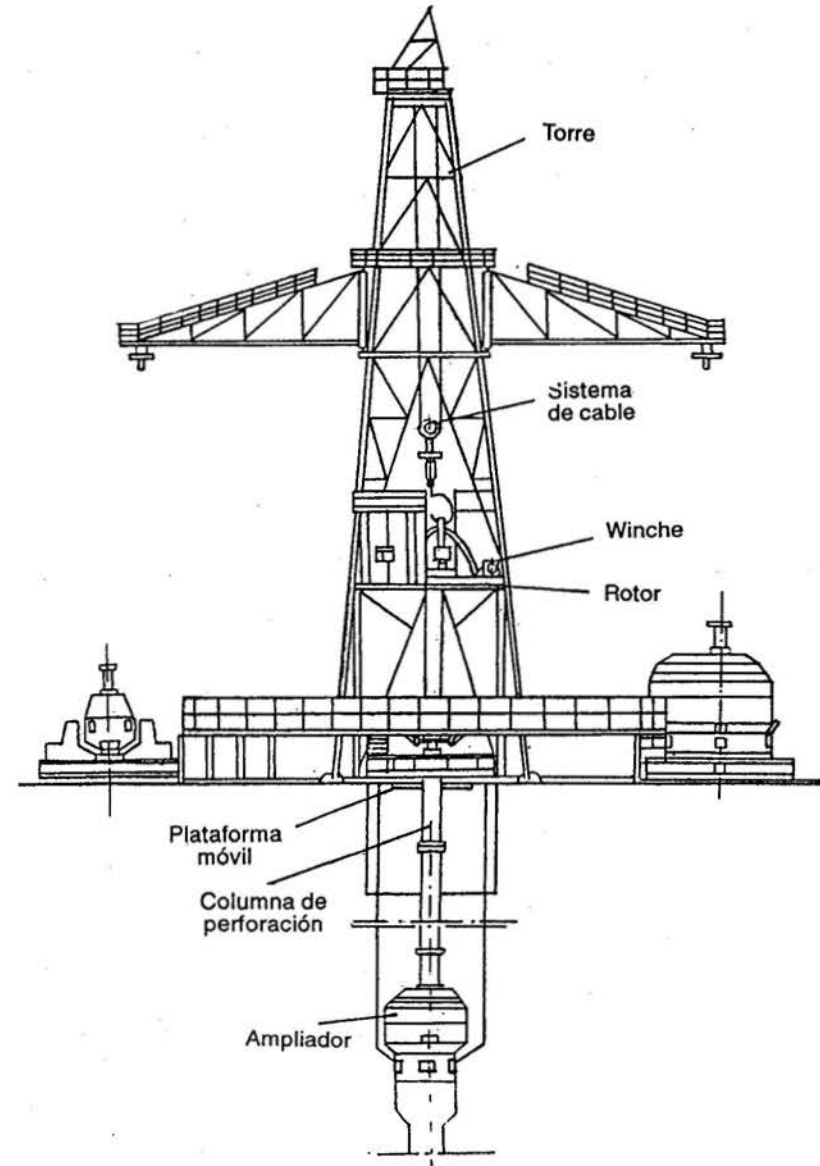


FIGURA IX.5. Instalación de perforación del tipo UZTM.

Como desventaja del lavado invertido se puede señalar que con su empleo el trépano se lava y enfría poco. Esta deficiencia se puede eliminar con el empleo del esquema de lavado simultáneo, cuando se conjuga el lavado directo y el invertido.

Para fortificar los pozos perforados se emplea más frecuentemente blinda de hierro fundido, el hormigón armado y un doble anillo de metal con el relleno del espacio entre ellas con hormigón.

Se considera más útil la metálica, ya que su instalación es mucho más rápida que las otras y necesita menos fuerza de trabajo.

Se conocen 2 variantes para la instalación de la fortificación en los pozos perforados:

Primera variante: de carga (Fig. IX.6), que consiste en ir añadiendo secciones a la fortificación por su parte superior y debido al peso ésta va descendiendo.

Segunda variante: aquí a la fortificación se le va añadiendo secciones de fortificación (Fig. IX.7)

Como se aprecia de las figuras, en la primera variante la fortificación se instala de arriba hacia abajo, en tanto que según la segunda variante se hace a la inversa.

La fortificación de carga se puede representar como un cilindro vacío en cuya base se construye una zapata de hormigón armado.

Este cilindro "nada" dentro de la solución arcillosa y se va introduciendo en el pozo a medida que se va alargando la fortificación.

De ser necesario, en la parte inicial del proceso y mientras la fortificación no alcanza el peso necesario, su desplazamiento hacia abajo puede ser ayudado por cables movidos por el winche de perforación, otra variante que se puede utilizar cuando el peso de la fortificación no es suficiente es echar dentro del cilindro una solución arcillosa u otro líquido.

Esta variante de carga de instalación de la fortificación tiene como desventajas el hecho de que durante su realización surgen tensiones y la necesidad de perforar un pozo con un diámetro un poco mayor que el necesario (de 25 a 40 cm) con el objetivo de poder solucionar cualquier desviación que tenga la fortificación de la vertical.

Durante el proceso de carga de la fortificación sobre ella actúan las siguientes fuerzas (Fig. IX.8):

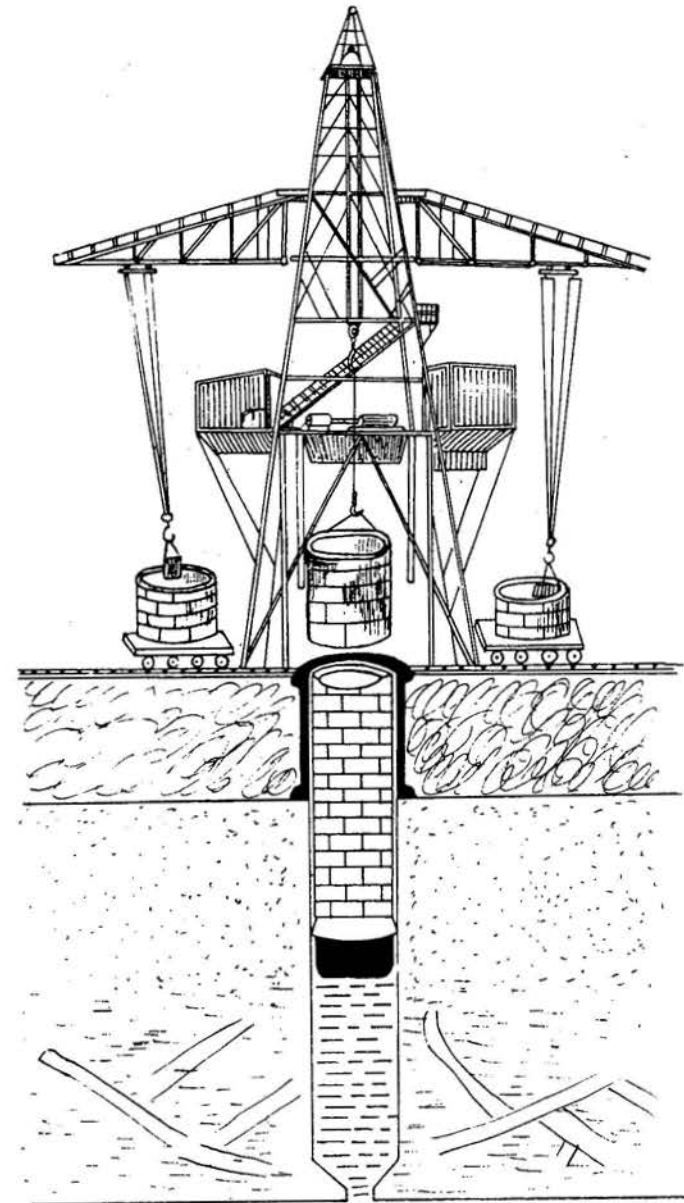


FIGURA IX.6. Fortificación de pozos con el esquema de carga

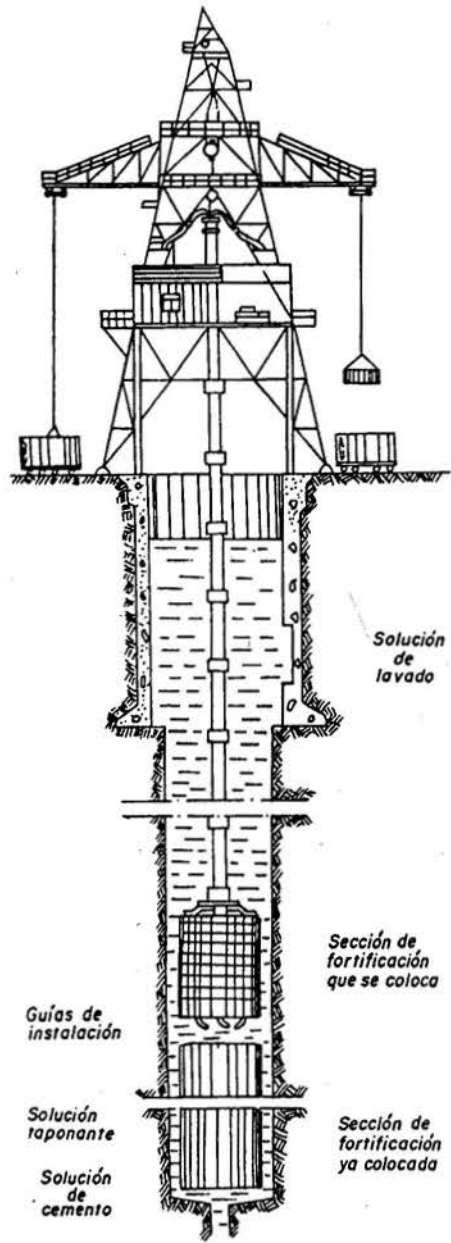


FIGURA IX.7. Fortificación de pozos con el empleo de la fortificación de sección.

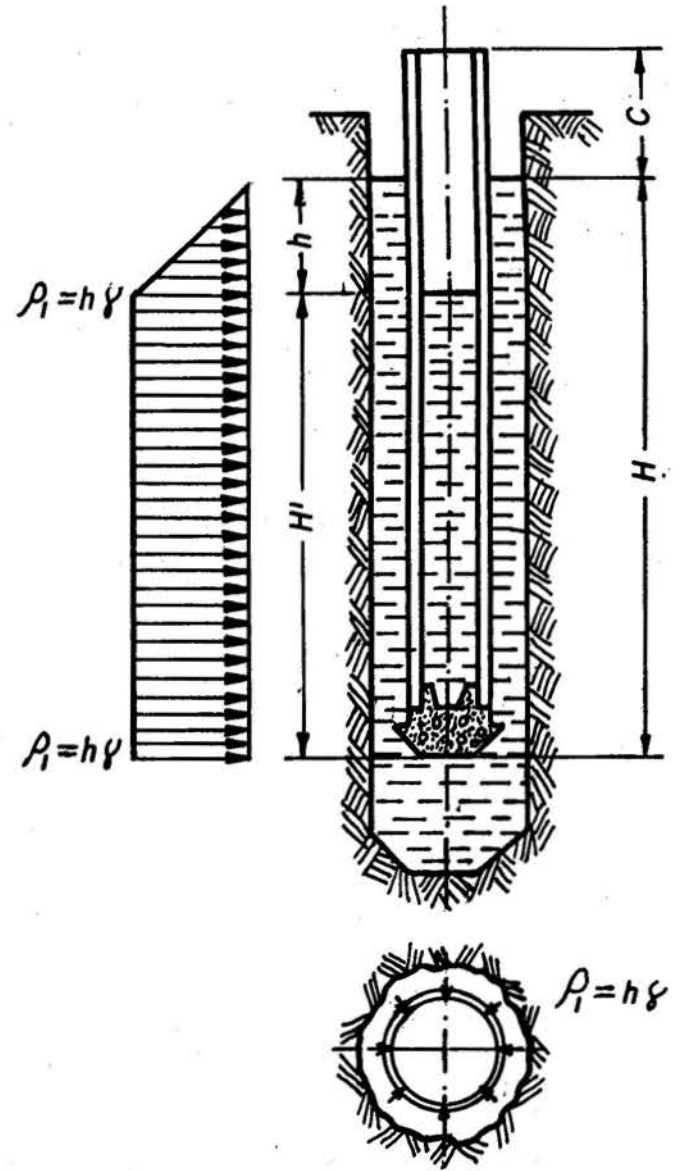


FIGURA IX.8. Esquema de cálculo de las fuerzas de montaje de la fortificación.

G_1 : peso de la fortificación con su zapata. Esta fuerza actúa verticalmente de arriba hacia abajo y por su acción la fortificación tiende a descender

G_2 : fuerza de ascenso de la solución arcillosa, actúa también verticalmente pero de abajo hacia arriba tendiendo a levantar la fortificación

R : fuerza de fricción que surge entre las paredes de la fortificación que desciende y la solución arcillosa actúa verticalmente de arriba hacia abajo

Para que la fortificación pueda descender debe cumplirse la siguiente expresión:

$$G_1 + R > G_2 \quad (IX.3)$$

La fuerza de fricción R se puede determinar por la expresión:

$$R = P \tan \rho \quad (IX.4)$$

La fuerza de ascenso G_2 por la expresión:

$$G_2 = SH \gamma_a \quad (IX.5)$$

Y el peso de (G_1) de la fortificación por la expresión:

$$G_1 = (H + C) q + g_z \quad (IX.6)$$

donde:

P : fuerza que ejerce la solución arcillosa sobre la pared de la fortificación

ρ : ángulo de fricción, grados

S : área de la base de la fortificación (zapata) por su diámetro exterior, m^2

H : profundidad de hundimiento de la fortificación en la solución arcillosa

γ_a : densidad de la solución arcillosa, t/m^3

C : altura que sobresale la fortificación por sobre la solución arcillosa, m

q : peso de 1m de fortificación, t

g_z : peso de la zapata, t

Debido a su magnitud no muy grande la fuerza de fricción R habitualmente se desprecia en el cálculo dejándose de reserva.

Analizando la expresión (IX.3) se ve que con el aumento de la profundidad (H) puede llegar un momento en que:

$$G_1 = G_2 \quad (IX.7)$$

O sea:

$$(H + C) q + g_z = SH \gamma_a \quad (IX.8)$$

El peso de la carga adicional (G_o) que se debe añadir para que la fortificación baje a la profundidad deseada se halla por la expresión:

$$G_o = G_2 - G_1 = SH \gamma_a - [(H + C) q + g_z] \quad (IX.9)$$

El valor de G_o se puede hallar también por la expresión:

$$G_o = H_1 \gamma_c S_o \quad (IX.10)$$

donde:

S_o : área de la sección útil del pozo, m^2

γ_c : densidad del líquido utilizado, t/m^3

H_1 : altura a la cual se llena el cilindro con el líquido, m

Sustituyendo el valor de G_o obtenido en la expresión (IX.10) en la expresión (IX.9) se obtuvo:

$$S_o H_1 \gamma_c = SH \gamma_a - [(H + C) q + g_z] \quad (IX.11)$$

Considerando que la densidad del líquido de carga es igual a la solución arcillosa ($\gamma_c = \gamma_a$) (muchas veces se usa esta misma solución para producir la carga) se obtiene:

$$SH \gamma - S_o H_1 \gamma = [(H + C) q + g_z] \quad (IX.12)$$

pero:

$$H_1 = H - h$$

se obtiene:

$$SH \gamma - S_o \gamma (H - h) = [(H + C) q + g_z] \quad (IX.13)$$

Y finalmente después de resolver y despejar se obtiene:

$$h = \frac{(H + C) q - H \gamma (S - S_0) + g_z}{S_0 \gamma}, \text{ m} \quad (\text{IX.14})$$

Conocido el valor de h se puede calcular el valor de la carga de montaje (P_c) por la expresión:

$$P_c = h \gamma, \text{ t/m}^2 \quad (\text{IX.15})$$

La carga del montaje para profundidades del pozo superiores a los 200 m puede sobrepasar las de cálculo de la fortificación, lo cual exigiría el reforzamiento de ésta de usarse esta forma (de carga) para su instalación.

Durante el descenso de la fortificación hacia el frente se procede al taponamiento de la zona por debajo de su zapata y por los laterales. Con ese fin, en la parte central de la zapata se coloca una tubería que se va alargando a medida que la fortificación baja.

Cuando se emplea la variante de fortificación por secciones (Fig. IX.7) utilizando el equipo de perforar se baja al pozo inicialmente una primera sección de fortificación (habitualmente de 4,0 a 5,0 m de longitud). Esta sección de fortificación debe colocarse completamente vertical, de tal forma que su superficie superior tenga una posición horizontal.

Después que se coloca esta primera sección de la fortificación se procede al taponamiento del espacio de detrás de la fortificación, simultáneamente a esto en la superficie se va preparando la próxima sección de fortificación (de igual longitud que la primera).

La ventaja que ofrece esta forma de instalación de la fortificación en los pozos es la ausencia de las cargas de montaje y el hecho de tener que dejar menos holgura que en el caso anterior (10 a 15 cm) entre la pared del pozo y la fortificación.

La desventaja esencial de esta variante de instalación de la fortificación estriba en lo difícil que es alcanzar una buena hermeticidad en la unión de las diferentes secciones de fortificación.

IX.3. PERFORACION ROTATORIA REACTIVA DE TURBINA

Esta variante de perforación rotatoria ha recibido alguna difusión durante el laboreo de pozos de pequeño diámetro laboreados en roca fuerte (hasta 12 según la escala de fortaleza de Protodiakonov).

En este caso la destrucción de la roca en el frente de trabajo se lleva a cabo en forma continua por toda la sección del pozo mediante el uso de

un agregado de perforación que puede tener de 2 a 4 turbinas de perforación unidas rígidamente entre sí, provistas de sus respectivos trépanos.

El principio de accionamiento de esta perforadora se basa en la utilización de la energía hidráulica. La solución arcillosa que se envía al frente por la tubería (columna de perforación) produce el movimiento de los trépanos que giran todos en un mismo sentido (a favor de las agujas del reloj) (Fig. IX.9).

Como consecuencia de las fuerzas reactivas que surgen, el agregado de perforación en su conjunto gira en sentido contrario a las agujas del reloj.

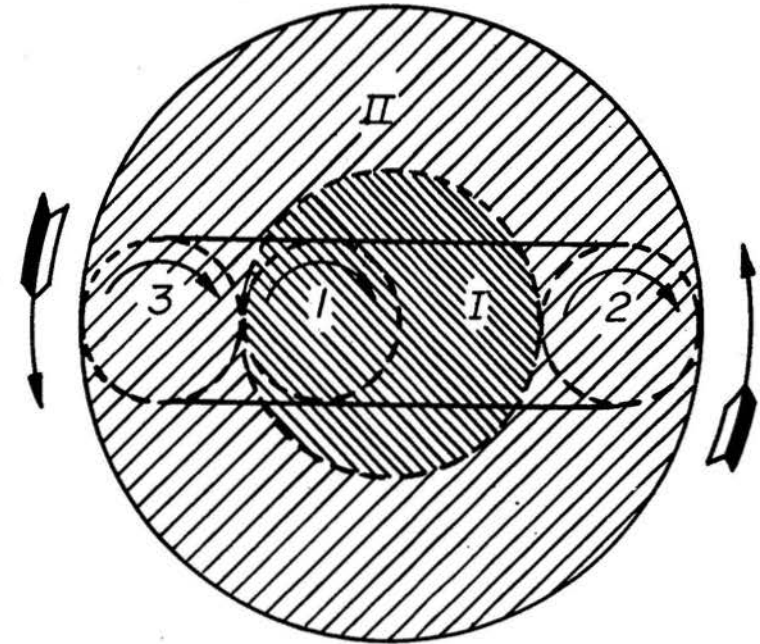


FIGURA IX.9. Esquema de destrucción de la roca con perforación reactiva de turbina.

Como resultado de ello se produce la distribución de la roca a todo el frente.

La solución arcillosa con partículas de roca destruida sube por el espacio comprendido entre la tubería y la pared del pozo hasta la superficie, en donde la solución se limpia para enviar de nuevo al pozo.

IX.4. PERFORACION ROTATORIA DE COLUMNA

Este método se empezó a utilizar en la década de los años 30 del presente siglo para la perforación de taladros de gran diámetro en rocas estables, que no necesitan de la fortificación, y en los casos en que el flujo de agua no es grande.

En la actualidad el método se destina a la perforación de pozos de pequeña sección (hasta de 3,0 m de diámetro) laboreados en rocas fuertes (hasta $f \approx 10$ a 12) y para pozos de poca y mediana profundidad.

En los casos de grandes afluencias de agua y macizos agrietados, este método sólo se puede utilizar con el taponamiento preliminar del macizo.

Según este método sólo se perfora la roca por la periferia de la sección del pozo. La masa fundamental de roca en forma de cilindro (testigo) se separa del resto del macizo sin destruirse y posteriormente se saca a la superficie.

Una vista general de una instalación de perforación de columna se ofrece en la Fig. IX.10.

Esta instalación consta de la torre metálica que tiene una altura aproximada de 20 m (1), de los winches (3 y 5) para ascenso de los testigos y para la subida y bajada del personal, poleas directrices (2) y del agregado de perforación (4). Este agregado consiste en un cilindro vacío en cuyas bases por su periferia están situadas las coronas de perforación.

Durante el proceso de perforación, al girar las coronas, se produce el corte por una ranura de 0,2 a 0,3 m, produciéndose la separación del testigo. Este testigo, en dependencia del tipo de instalación de perforación utilizada puede tener hasta 6,0 m de altura.

La limpieza de la ranura circular que se forma se realiza mediante la solución arcillosa que llega bombeada al frente a través de la columna de perforación. Los pedazos de roca destruida más grandes se precipitan al reposadero de cieno, ubicado en la parte superior de la perforadora, y se envían a la superficie junto al testigo, en tanto que los más finos se llevan a la superficie junto a la solución arcillosa.

El aumento del diámetro (más de 3 o 4 m) de los pozos perforados por esta vía va a producir grandes dificultades debido a que se necesitaría utilizar perforadora de columna de más de 500 t de peso.

Por tal causa en tales situaciones se recomienda pasar a la perforación del pozo en varias fases (2 o 3) con el empleo del ensanchador.

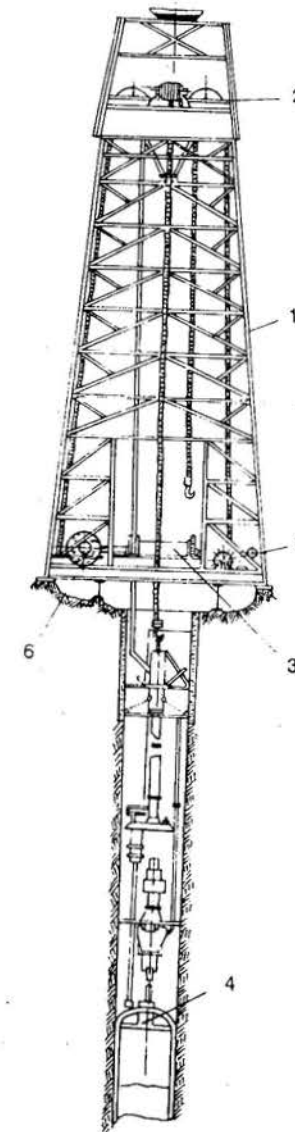


FIGURA IX.10. Vista general de una instalación de perforación de columna. 1-torre de perforación, 2-poleas directrices, 3-winche para el instrumento de perforación, 4-trépano, 5-winche para el ascenso y descenso del personal, 6-winche para los cables

BIBLIOGRAFIA

- BELFERMAN, M.U.: "Sobre la reducción de los gastos de energía en el congelamiento de la roca durante el laboreo de pozos", revista *Construcción de Minas*, No. 2, año 1984, pp. 17-19, Moscú, 1984.
- BELIAEV, V.F. y otros: *Fortalecimiento de las rocas*, Ed. Nedra, Moscú, 1973.
- BLANCO TORRENS, R.: *Mecánica de rocas*, Ed. Oriente, Santiago de Cuba, 1981.
- : *Laboreo de excavaciones subterráneas*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1984.
- BODNIA, I.V.: "Cálculo de los parámetros óptimos de la cortina de aislamiento", revista *Construcción de Minas*, No. 10, año 1984, pp. 19-21, Moscú, 1984.
- BOKI, V.V. y otros: *Tecnología y mecanización integral del laboreo de excavaciones mineras*, Ed. Nedra, Moscú, 1972.
- BOKI, V.V. y otros: *Tecnología y mecanización de la construcción de obras subterráneas y minas*, Ed. Nedra, Moscú, 1971.
- CKUMS, I.N.: "Experiencias del laboreo de pozos por el método de congelamiento con las filas de taladros", revista *Trabajos especiales de la industria constructiva*, No. 5, año 1969, pp. 1-7, Moscú, 1969.
- CHUPRUNOV, G.D.: *Tecnología y mecanización integral del laboreo de las excavaciones mineras*, Ed. Nedra, Moscú, 1970.
- DOLGOV, O.A. y V.N. ROMANOV: "Esquema tecnológico de formación de la protección hielo-roca durante el laboreo de excavaciones mineras inclinadas", revista *Trabajos especiales de la industria constructiva*, No. 11, año 1971, pp. 1-4, Moscú, 1971.
- DRUSJKO, E.B.: *Estabilidad de las excavaciones mineras fundamentales*, Ed. Don Bas, Donetsk, 1975.
- FEDIUNKIN, V.A.: *Laboreo de pozos de minas por el método de congelación*, Ed. Nedra, Moscú, 1968.
- FEDIUNKIN, V.A. y A.V. KORCHAK: "Perfeccionamiento y desarrollo de la perforación de pozos", revista *Construcción de Minas*, No. 8, año 1985, pp. 6-10, Moscú, 1985.
- IVACHEV, L.M.: *Líquido para el lavado y solución de taponamiento*, Ed. Nedra, Moscú, 1987.
- KIPKO, E.Y. y otros: "Taponamiento electroquímico de rocas porosas y acuíferas", revista *Construcción de Minas*, No. 9, año 88, pp. 9-13, Moscú, 1988.
- KIPKO, E.Y. y otros: "Nuevas soluciones técnicas en el campo del taponamiento de rocas acuíferas durante el laboreo de excavaciones", revista *Construcción de Minas*, No. 1, año 86, pp. 18-19, Moscú, 1986.
- KIPKO, E.Y. y otros: *Método integral de taponamiento de las rocas acuíferas durante la construcción de minas*, Nobocherkasok, 1985.
- KIPKO, E.Y.: *Método integral de taponamiento durante la construcción de minas*, Ed. Nedra, Moscú, 1986.
- KONAKOV, E.G.: "Variación de las propiedades de los terrenos durante su fortalecimiento térmico", revista *Trabajos especiales de la industria constructiva*, No. 3, 1972, pp. 19-24, Moscú, 1972.
- LOMTADZE, V.D.: *Métodos de investigación de laboratorio de las propiedades físico-mecánicas de las rocas*, Ed. Nedra, Leningrado, 1972.
- MARKOVSKY, G.I.: *Perfeccionamiento técnico de los métodos especiales de laboreo de excavaciones mineras*, Ed. Técnica, Moscú, 1955.
- MAKSIMOV, A.P. y V.V. EVTUSHENKO: *Taponamiento de las rocas*, Ed. Nedra, Moscú, 1978.
- MELNIKOV, N.I.: *Laboreo y fortificación de excavaciones mineras*, 2da ed, Ed. Nedra, Moscú, 1979.
- : *Laboreo y fortificación de excavaciones subterráneas*, Ed. Nedra, Moscú, 1970.
- NIKOLAENKO, A.T. y otros: *Instalaciones de perforación para el laboreo de taladros y pozos*, 3ra ed., Ed. Nedra, Moscú, 1985.
- ONIKA, D.G.: *Laboreo de excavaciones mineras*, Ed. Nedra, Moscú, 1969.
- ORLOV, V.V. y otros: *Manual de ejemplos y tareas de laboreo de excavaciones mineras*, Ed. Universidad de Jarkov, Jarkov, 1961.
- POKROVSKI, N.M.: *Laboreo de excavaciones mineras*, Ed. Técnica, Moscú, 1954.
- POKROVSKI, N.M. y otros: *Manual enciclopédico de asuntos mineros*, t. 4; *Laboreo y fortificación de excavaciones*, Ed. Técnica, Moscú, 1958.
- ROMANOV, V.N.: "Perfeccionamiento de la tecnología de congelación de las rocas durante el laboreo de excavaciones horizontales e inclinadas", revista *Trabajos especiales de la industria constructiva*, No. 2, año 1971, pp. 1-5.
- SEDOI, B.Y.: *Manual del ingeniero constructor de minas*, t. II, Ed. Nedra, Moscú, 1972.

- SHEJURDIN, V.K.: *Asuntos mineros*, Ed. Nedra, Moscú, 1987.
- SHIRAY, G.T.: *Laboreo de pozos de minas con el empleo de la fortificación de descenso*, Ed. Nedra, Moscú, 1984.
- SHPARBER, P.A.: "Direcciones principales del perfeccionamiento prospectivo del método de congelación", revista *Construcción de Minas*, No. 5, año 88, pp. 9-10, Moscú, 1988.
- SMIRNIAKOV, V.V.: *Laboreo y fortificación de excavaciones*, Ed. Universidad Oriente, Stgo. de Cuba, 1966.
- TRUPAK, N.G.: *Laboreo de excavaciones por métodos especiales*, Ed. Técnica, Moscú, 1958.
- : *Métodos especiales de laboreo de excavaciones mineras*, 1ra ed., Ed. Técnica, Moscú, 1951.
- : *Métodos especiales de laboreo de excavaciones mineras*, 3ra ed., Ed. Nedra, Moscú, 1976.
- : *Congelamiento del terreno durante la construcción de obras subterráneas*, Ed. Nedra, Moscú, 1979.

Este libro ha sido impreso
Combinado Poligráfico
«Evelio Rodríguez Curbelo
se terminó de imprimir
en el mes Julio del 1995
«Año del Centenario de la caída
de José Martí»