
Curso MINERÍA

Profesor: Dr. Julián M. Ortiz

04 – Desarrollo Minero



Desarrollo y explotación



Resumen

- Desarrollo y explotación son las etapas que siguen a la prospección y exploración
- Desarrollo permite acceder al mineral para asegurar la producción
- Explotación es el proceso de extracción de mineral para cumplir con un plan de producción
- En ambos casos, se construye la infraestructura que permite producir
 - Operaciones unitarias (perforación, tronadura, carguío, transporte y otras)
 - Selección de métodos (criterios)
 - Métodos de explotación (detalles)
 - Diseño y secuencia de extracción

Operaciones unitarias...

Explotación de Minas

- Dos etapas
 - Arranque de material
 - Manejo de material
- Arranque:
 - Perforación para colocar explosivos
 - Tronadura



Métodos de perforación

- Perforación tiene diferentes objetivos:
 - **Exploración y reconocimiento** de yacimientos o depósitos minerales → *cantidad y calidad*.
 - **Estudios geotécnicos** → propiedades de la roca.
 - **Inserción y detonación de cargas explosivas** con fines de *fragmentación*.
 - Colocación de elementos de **refuerzo**
- Nos concentramos en los dos últimos

Métodos de perforación

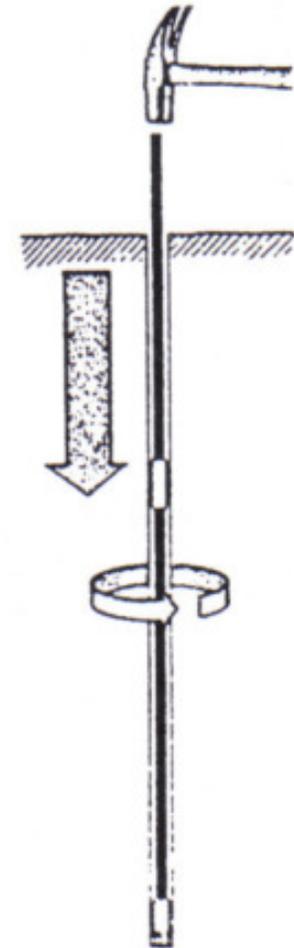
- Crear **hueco cilíndrico** en la roca → es necesario aplicar energía.
- Métodos de perforación:
 - Mecánicos
 - Térmicos
 - Hidráulicos
 - Ondas (sonoras o luminosas)
 - Otros



- En excavación de rocas, se utilizan exclusivamente sistemas de perforación que se basan en la aplicación de energía mediante métodos mecánicos.

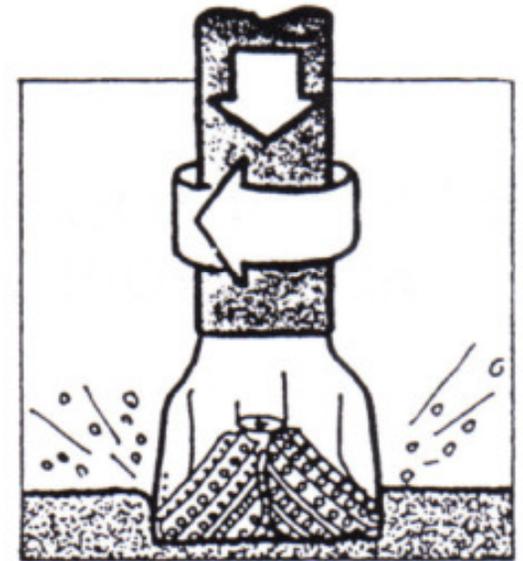
Sistemas mecánicos de perforación

- **PERCUSIÓN**
- La herramienta horada la roca por efecto de impactos sucesivos
 - alta frecuencia
 - gran energía
 - rotación entre golpe y golpe
- La rotación, en este caso, no contribuye mayormente al proceso de fracturamiento de la roca.



Sistemas mecánicos de perforación

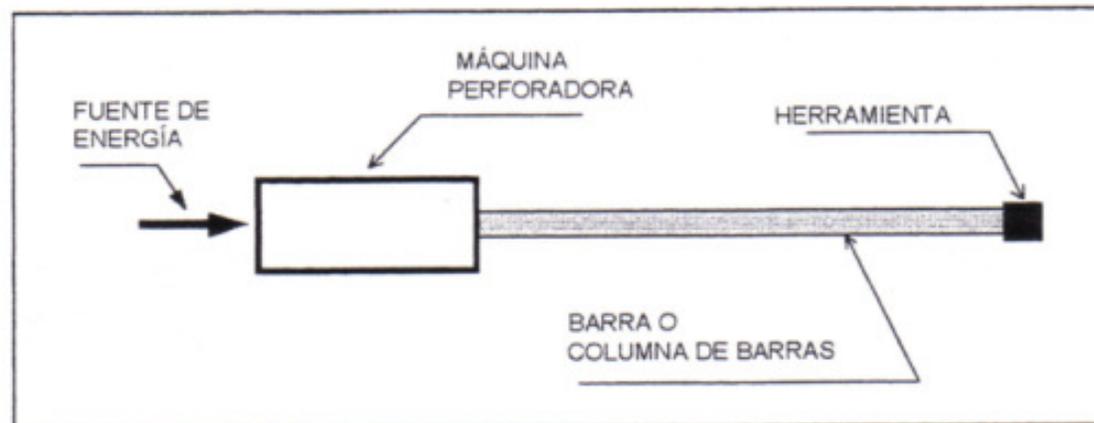
- ROTACIÓN
- La herramienta penetra la roca por la acción conjunta de:
 - torque de rotación
 - fuerza de empuje aplicada sobre la superficie rocosa.



Perforación por percusión

Componentes

- **MAQUINA PERFORADORA:** La máquina perforadora es la que genera las fuerzas de penetración; vale decir, convierte la energía original que alimenta a la máquina en energía mecánica de impacto.
- **BARRA O COLUMNA DE BARRAS:** Transmite la energía de impacto desde la máquina perforadora al macizo rocoso.
- **HERRAMIENTA DE PERFORACIÓN:** Es el elemento o componente que aplica la energía a la roca. En la terminología minera se le denomina BROCA o BIT.

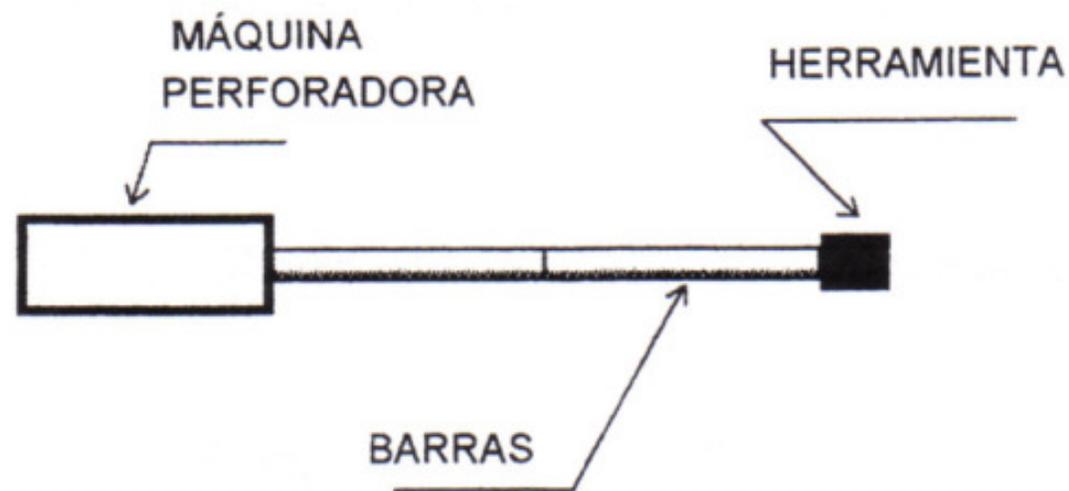


Sistemas Neumáticos

- Fuente de energía: aire comprimido para el accionamiento de la máquina perforadora.
- Dos sistemas según cómo se acoplan las componentes del sistema:
 - Sistema convencional o top-hammer
 - Sistema DTH o down-the-hole

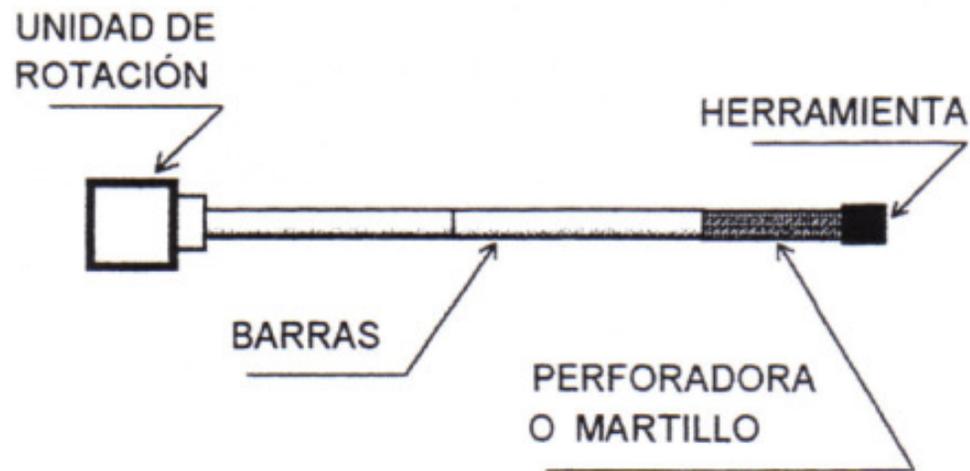
Top-Hammer

- Sus componentes se acoplan en el orden siguiente:
 - Máquina perforadora
 - Columna de barras
 - Herramienta



DTH

- Sus componentes se acoplan en el orden siguiente:
 - Unidad de rotación
 - Columna de barras
 - Máquina perforadora o martillo
 - Herramienta



Sistemas Hidráulicos

- Fuente de energía: fluido hidráulico (aceite a presión) para el accionamiento de la máquina perforadora.
- Su modalidad funcional es exclusivamente del tipo CONVENCIONAL O TOP-HAMMER
- Se la llama **rotopercusión**, dado que combina:
 - Efecto de impactos → Efecto predominante
 - Torque de rotación más energético → contribuye parcialmente en el proceso mismo de ruptura y penetración de la roca

Perforación rotativa

Sistema de perforación

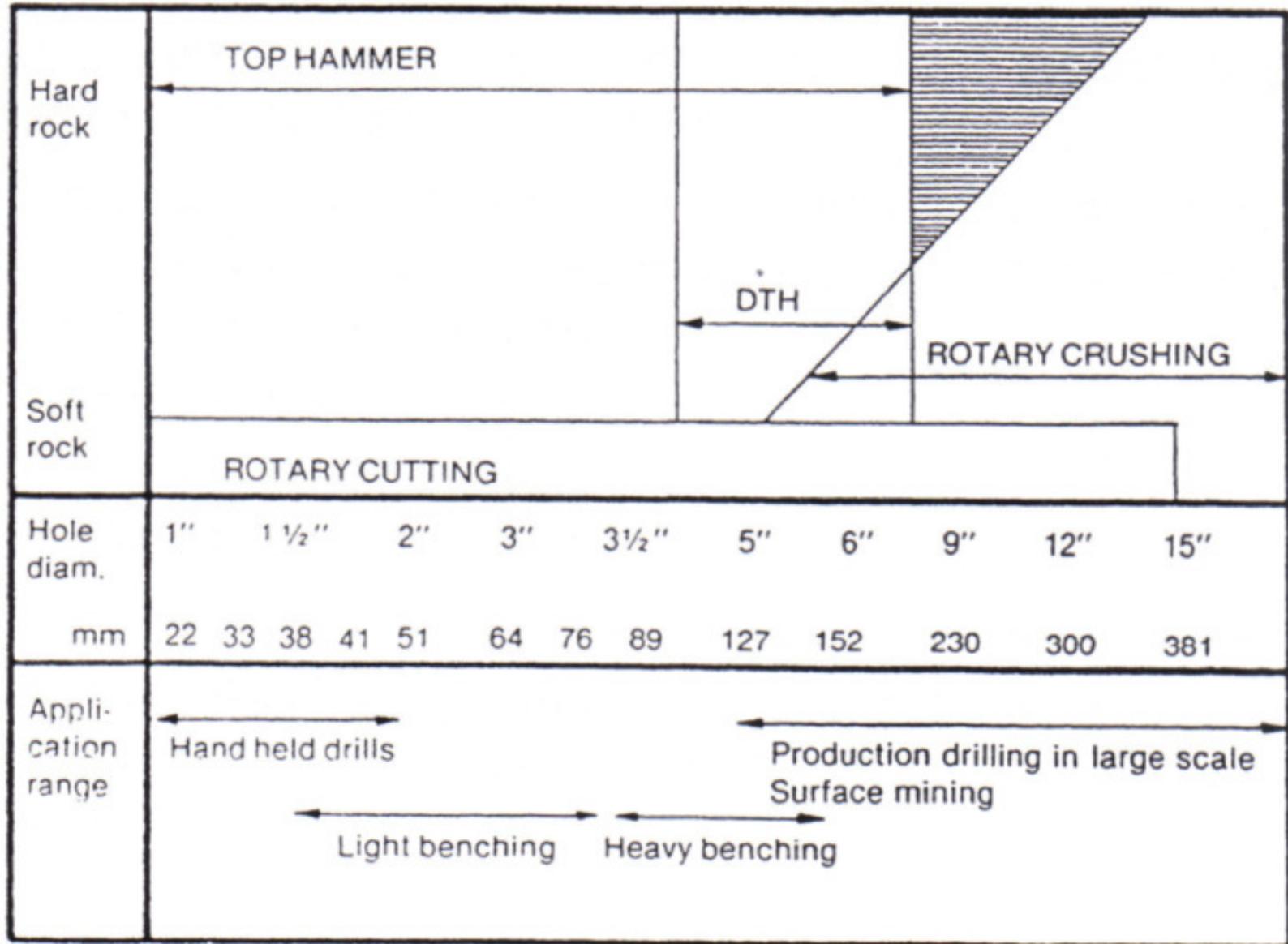
- Los sistemas rotativos no poseen una MÁQUINA PERFORADORA propiamente tal
- Utilizan directamente la energía eléctrica (motores) o combinaciones electro-hidráulicas para: **rotación, fuerza de empuje y otros.**
- También es frecuente el uso de un motor diesel como unidad de potencia en combinaciones diesel-hidráulico y diesel-eléctrico.

Campos de aplicación

Campo de Aplicación

SISTEMA DE PERFORACIÓN	TIPO DE ACCIONAMIENTO	MODALIDAD FUNCIONAL	CAMPO DE APLICACIÓN
PERCUSIÓN	Neumático	Convencional (Top-hammer)	Minería subterránea Diám = 27 a 41 mm Minería a rajo abierto Diám = 35 a 127 mm
		Down-the-hole	Minería a rajo abierto Diám = 89 a 200 mm Minería subterránea Diám = 89 a 165 mm
	Hidráulico	Convencional (Top-hammer)	Minería subterránea Diám = 35 a 89 mm Minería a rajo abierto Diám = 51 a 127 mm
ROTACIÓN	Eléctrico Diesel - hidráulico Diesel - eléctrico		Minería a rajo abierto Diám = 150 a 381 mm

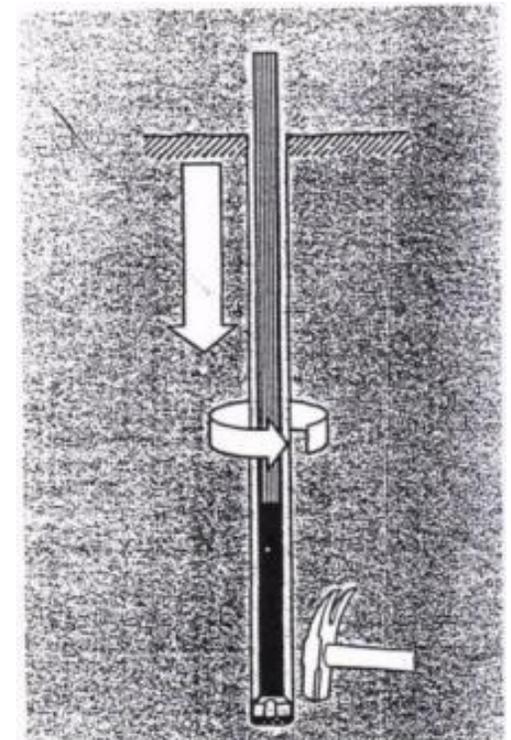
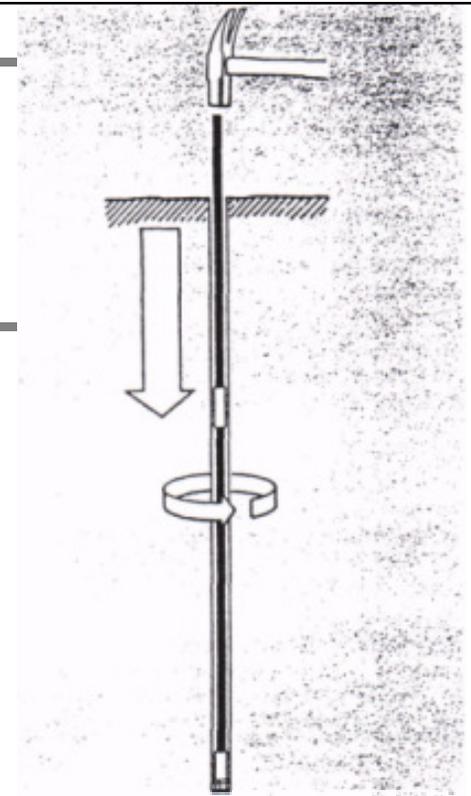
Campo de Aplicación



Perforación por percusión

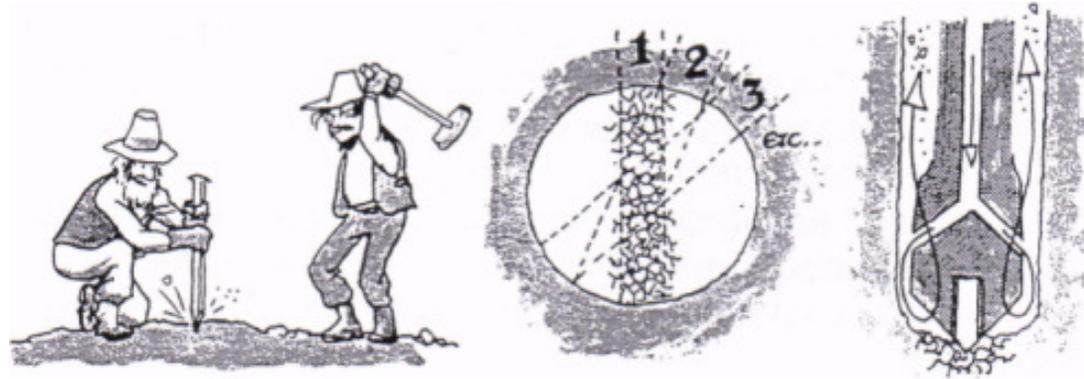
Introducción

- Tres sistemas posibles:
 - Accionamiento neumático convencional o top-hammer.
 - Accionamiento neumático down-the-hole (DTH)
 - Accionamiento hidráulico, sólo top-hammer
- Top-Hammer
 - Energía se transmite por la barra
 - Energía se transfiere a través de la herramienta (bit)
 - A mayor longitud de barras, menor la energía que se transmite eficientemente
- DTH
 - Martillo al fondo de la perforación
 - Eficiencia independiente del largo de barras



Sistemas neumáticos Top-Hammer

- Concepto:

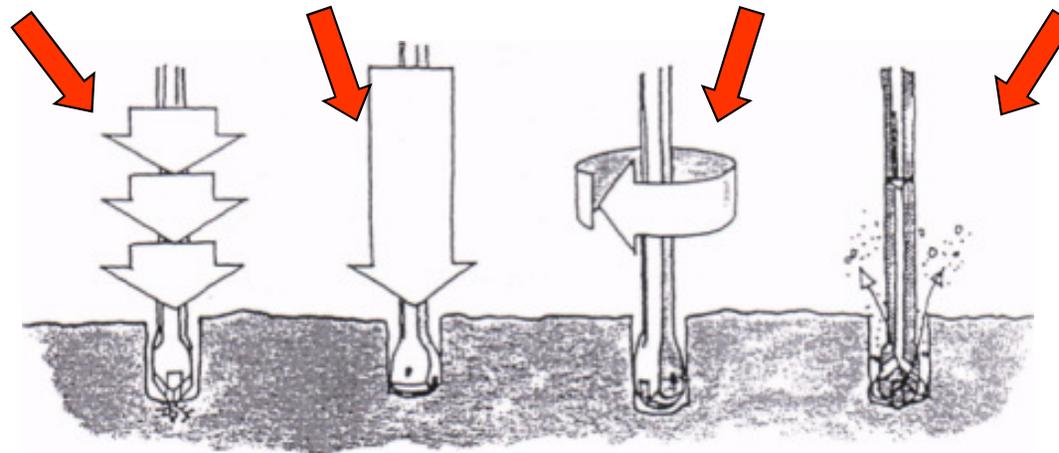


Impacto

Fuerza de avance

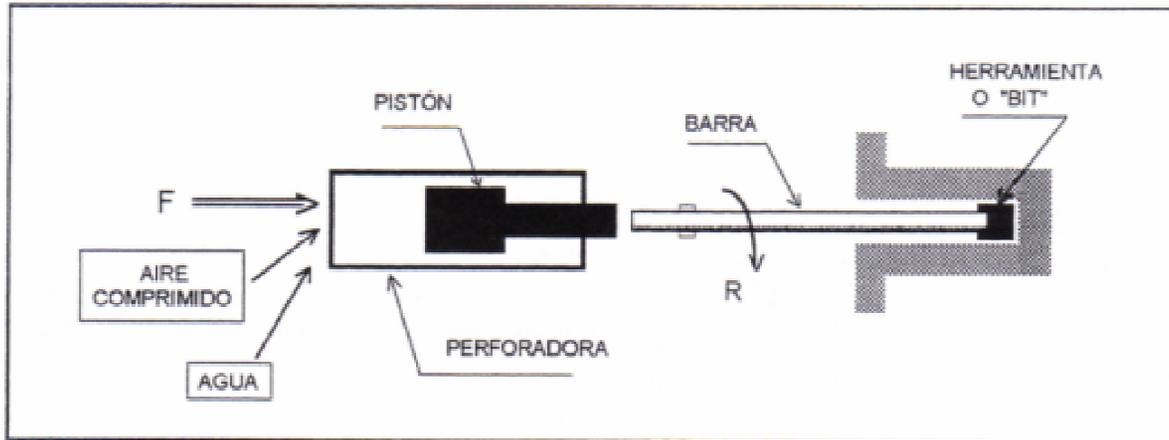
Rotación

Barrido



Sistemas neumáticos Top-Hammer

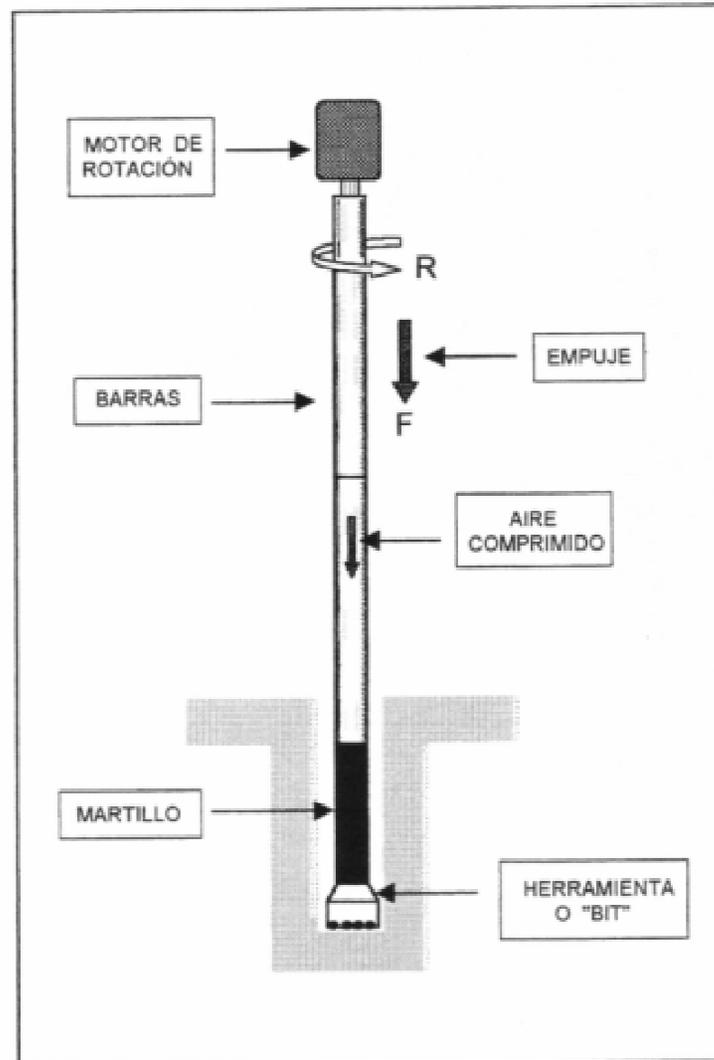
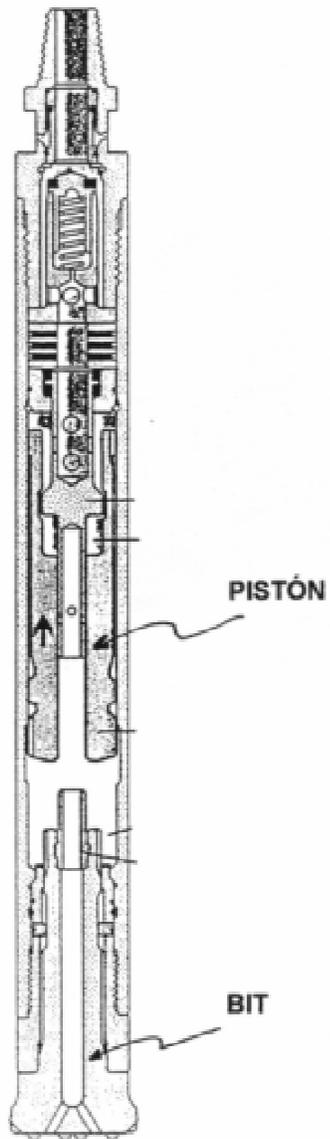
- Funcionamiento:



- Mecanismo de percusión
- Dispositivo de distribución del aire
- Mecanismo de rotación
- Mecanismo de empuje o avance
- Dispositivo de barrido del detritus
- Dispositivo de lubricación

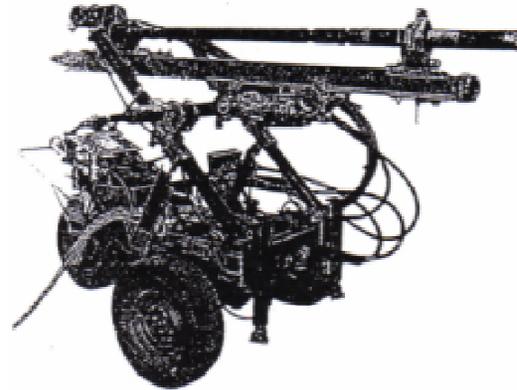


Sistemas Neumáticos DTH



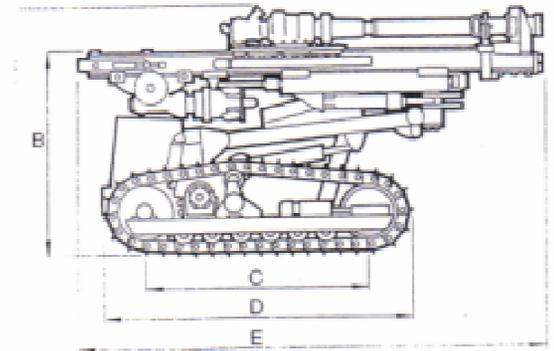
Sistemas Neumáticos DTH

- Equipos minería subterránea



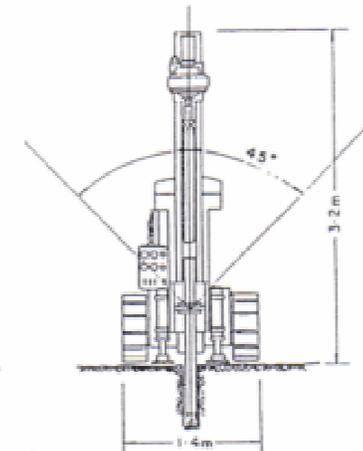
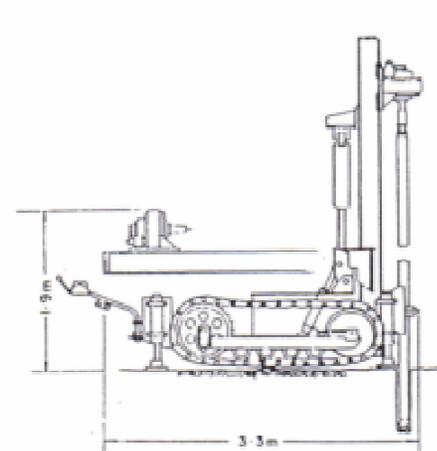
WAGON DRILL

Diámetro de perforación: 105 a 125 mm
Longitud de los tiros : hasta 40 m



TRACK DRILL

Diámetro de perforación: 105 a 165 mm
Longitud de los tiros : hasta 80 m



Equipo subterráneo de perforación con martillo en fondo (Ingersoll Rand).

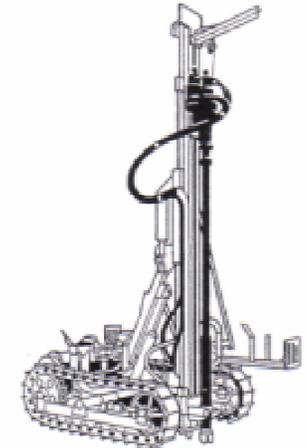
Sistemas Neumáticos DTH

- Equipos minería a rajo abierto



WAGON DRILL

Diámetro de perforación: 105 a 155 mm



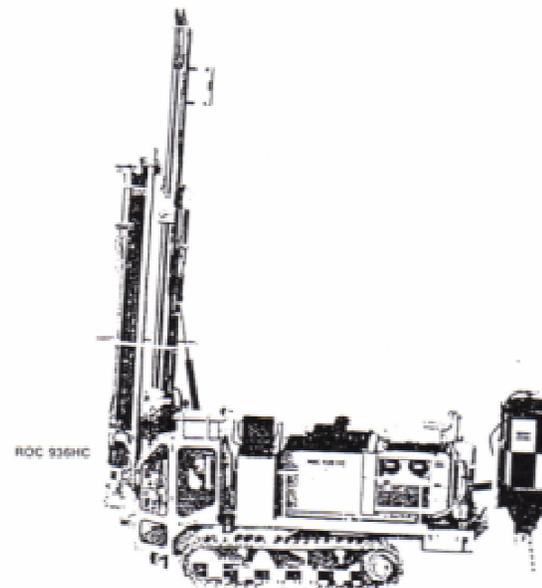
ROC 601-01

TRACK DRILL

Diámetro de perforación: 115 a 165 mm

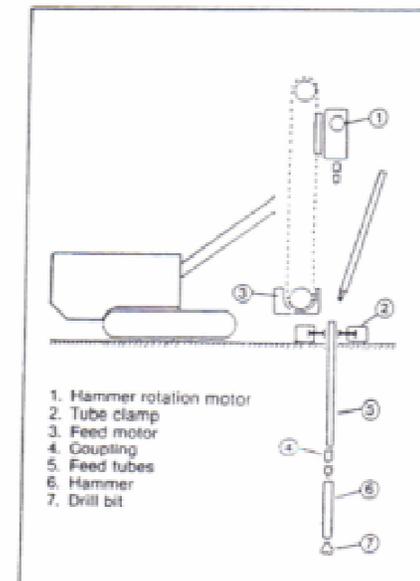


Foto 2



ROC 930HC

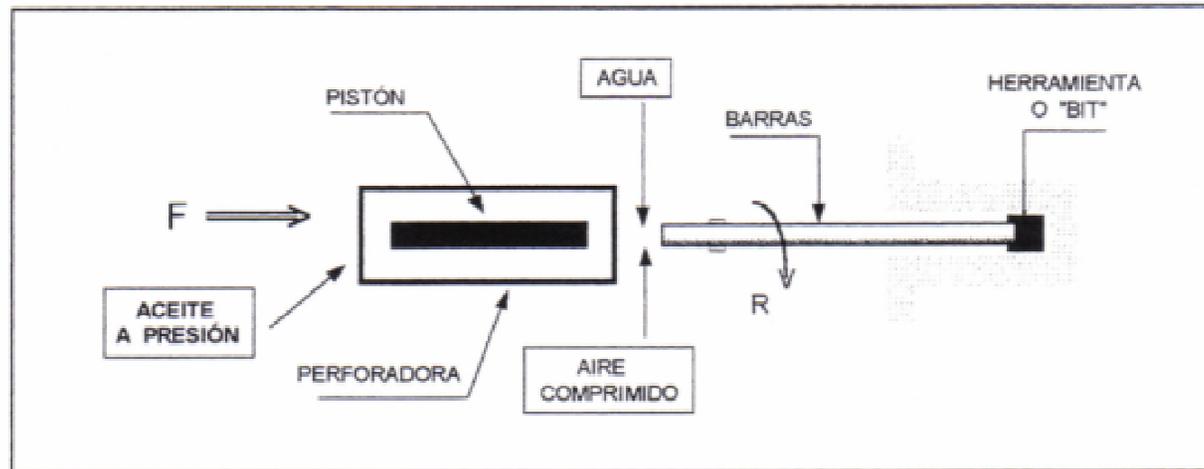
Diámetro de perforación: 115 a 165 mm



Principales componentes

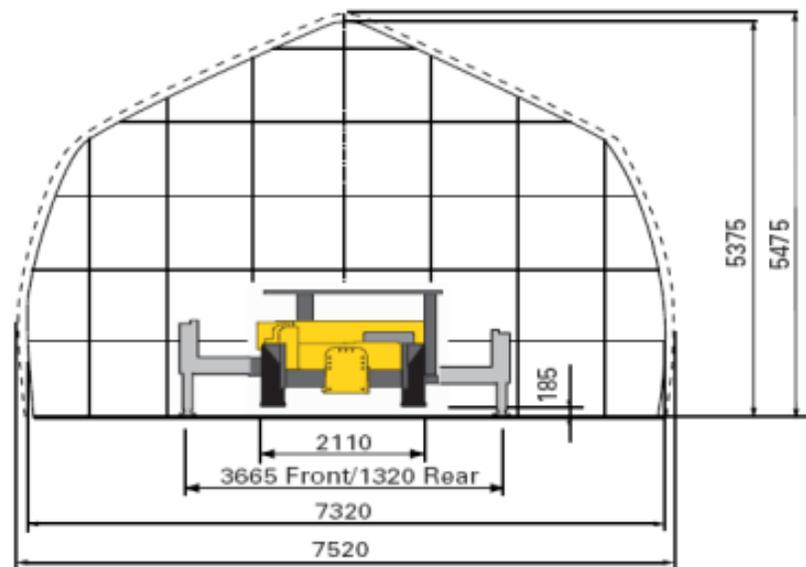
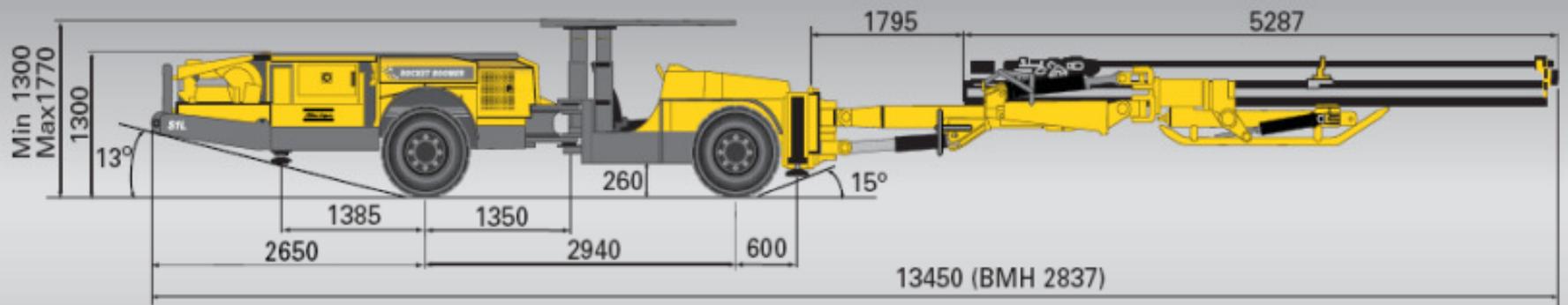
Sistemas hidráulicos

- Solo Top-Hammer

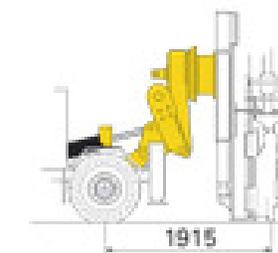
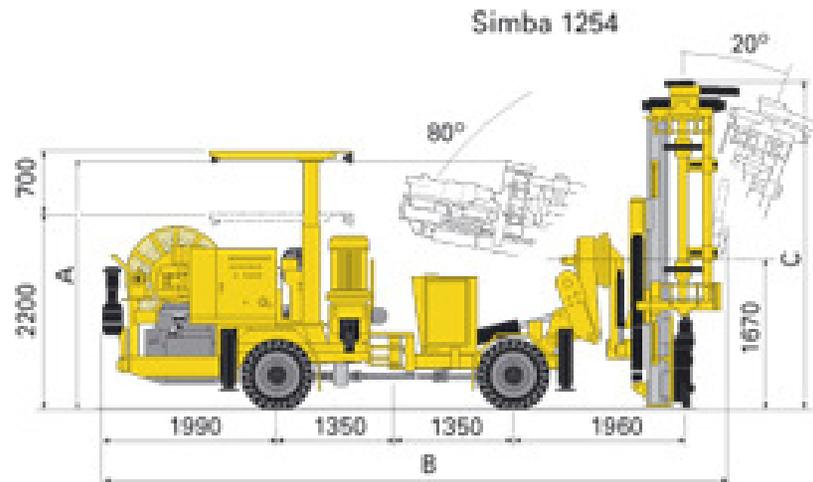


Sistemas hidráulicos - avance

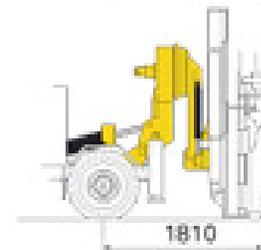
For cross section up to 29 m²



Sistemas hidráulicos - producción



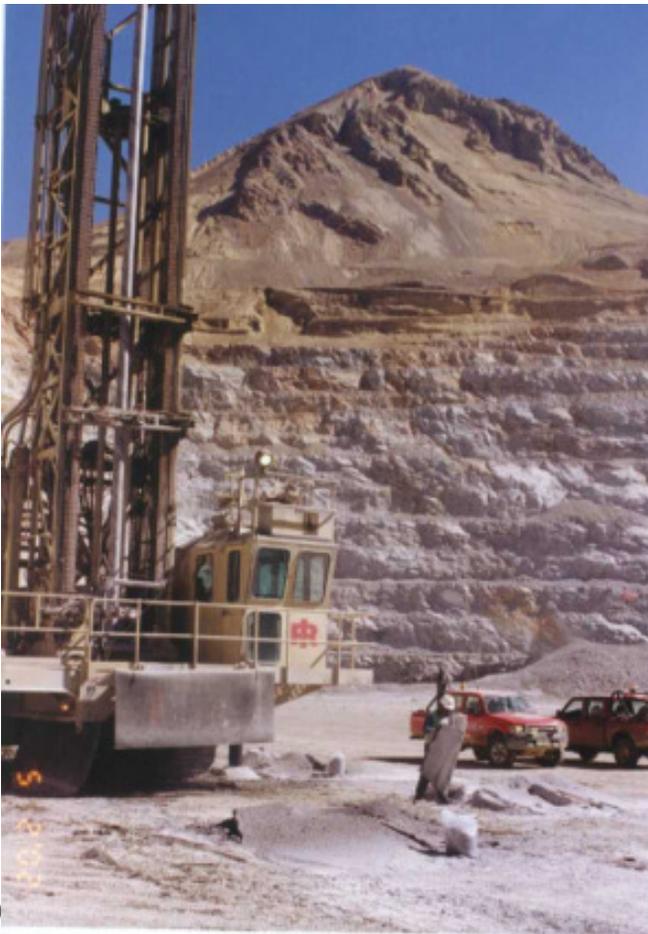
Simba 1253



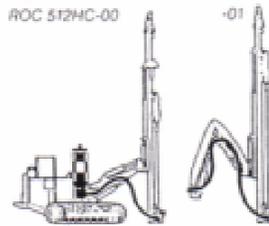
Simba 1252

Sistemas hidráulicos – Rajo Abierto

- Actualmente se llega a equipos que perforan grandes diámetros: 12”

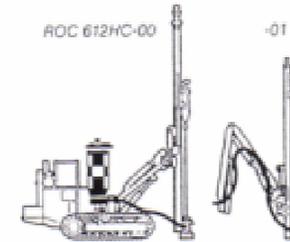


ROC 512HC-00



-01

ROC 612HC-00



-01

ROC 722HC-00



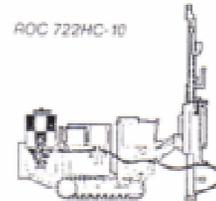
-01

-02



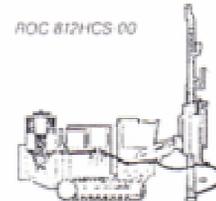
-03

ROC 722HC-10

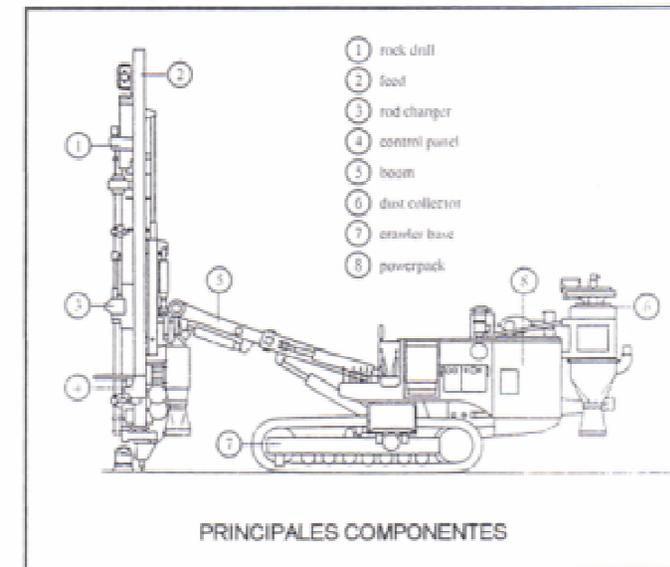


-11

ROC 812HCS 00



-02

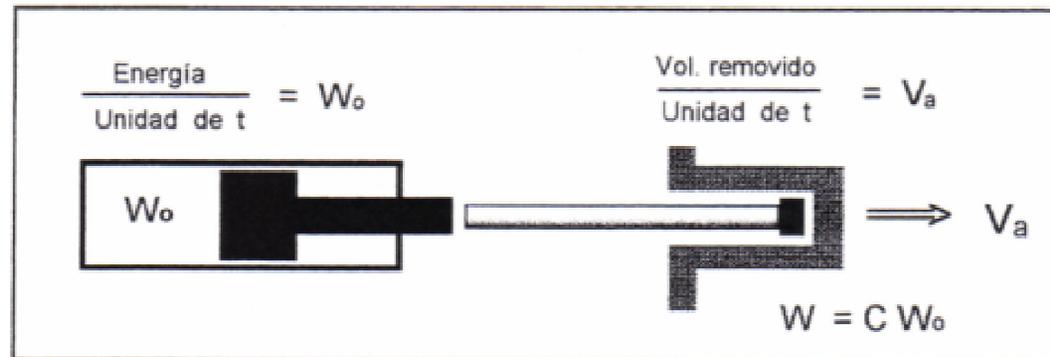


HOLE DIAMETER (MM)

64 76 89 102 115 127

Eficiencia y rendimientos

- Velocidad instantánea
- Rendimiento
- Factores relevantes:
 - Características de potencia de la máquina perforadora
 - Transmisión de la energía a la roca
 - Aplicación de la energía a la roca



$$V_a = K W_0 \text{ [cm/min]}$$

PRESIÓN DEL FLUÍDO \Rightarrow FUERZA \Rightarrow ENERGÍA CINÉTICA DEL PISTÓN \Rightarrow ENERGÍA DE IMPACTO

Eficiencia y rendimientos

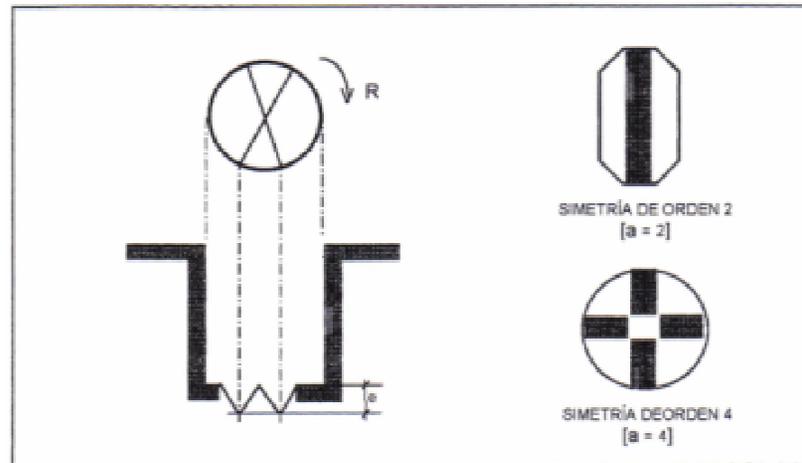
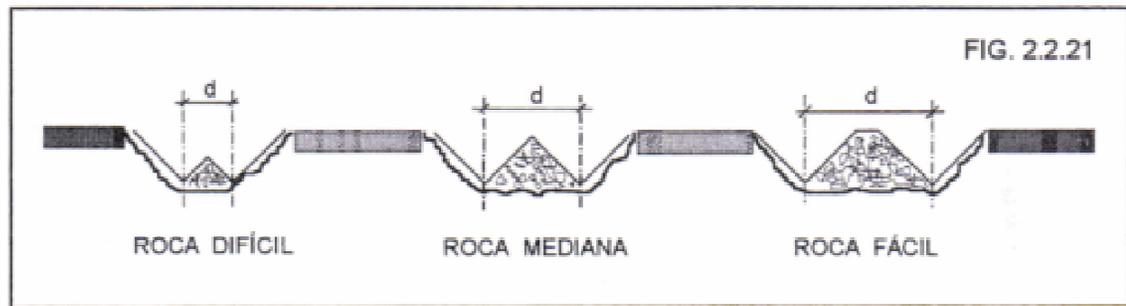
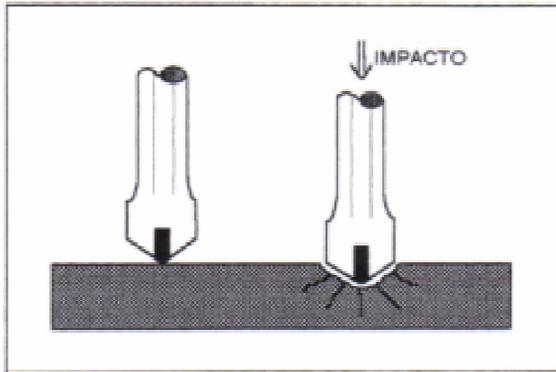
- La potencia en un equipo neumático es:

$$W_o = 0,5 P A L N \quad [\text{kgm/min}]$$

- Donde:
 - P es la presión manométrica del aire a la entrada del cilindro, equivalente δ [kgp/cm²]
 - A es el área de la cara frontal del pistón o área del cilindro de la máquina [cm²]
 - L es la carrera del pistón [m]
 - N es la frecuencia de impactos [golpes/min]
- Diámetro, carrera y frecuencia en manual del equipo

Aplicación de la energía

- Indentación

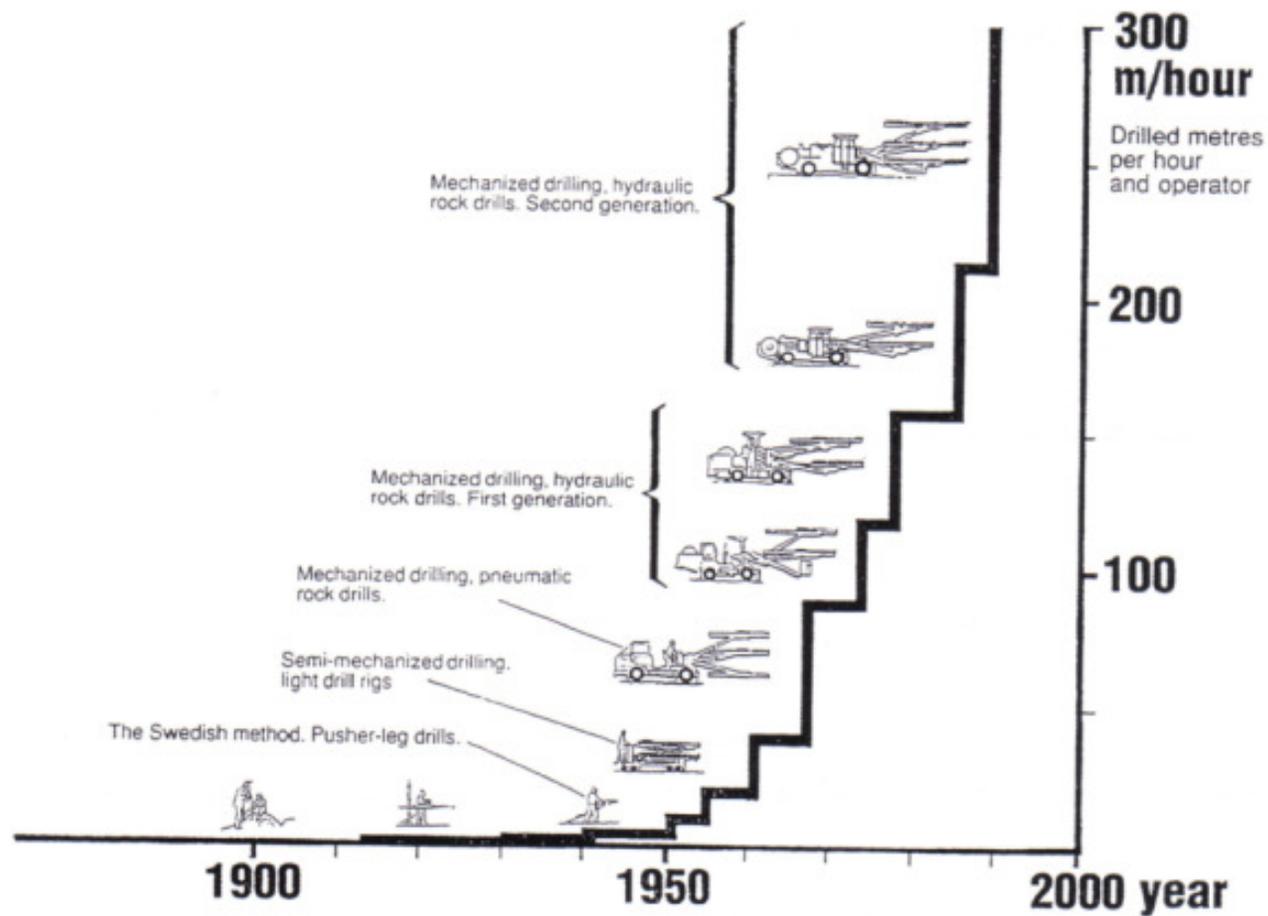


Aplicación de la energía

- Fuerza de empuje. Cumple 3 funciones:
 - Contrarrestar la fuerza que ejerce el fluido a presión en la parte posterior del cilindro de la máquina
 - Contrarrestar la fuerza de reacción de la roca, de acuerdo con el principio acción-reacción
 - Optimizar el proceso de aplicación de la energía

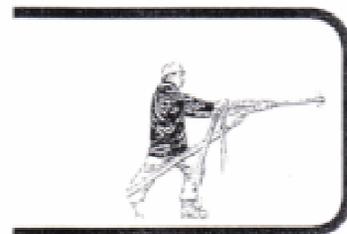
Perforación por percusión: prácticas de perforación

Progreso de la perforación



Desarrollos

GALERÍAS DE SECCIÓN PEQUEÑA

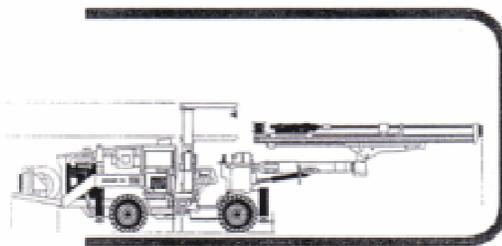


∅ → 27 a 41 mm



L → 800 a 2.400 mm

GALERÍAS O TÚNELES DE SECCIÓN PEQUEÑA A MEDIANA

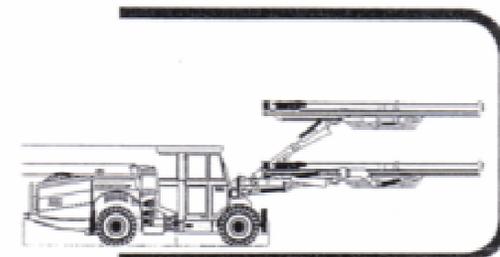


∅ → 38 a 45 mm

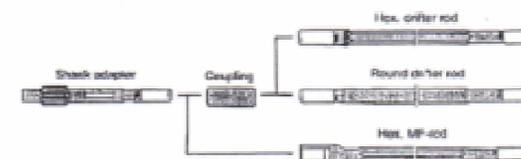


L → 2.500 a 4.300 mm

GALERÍAS O TÚNELES DE SECCIÓN GRANDE



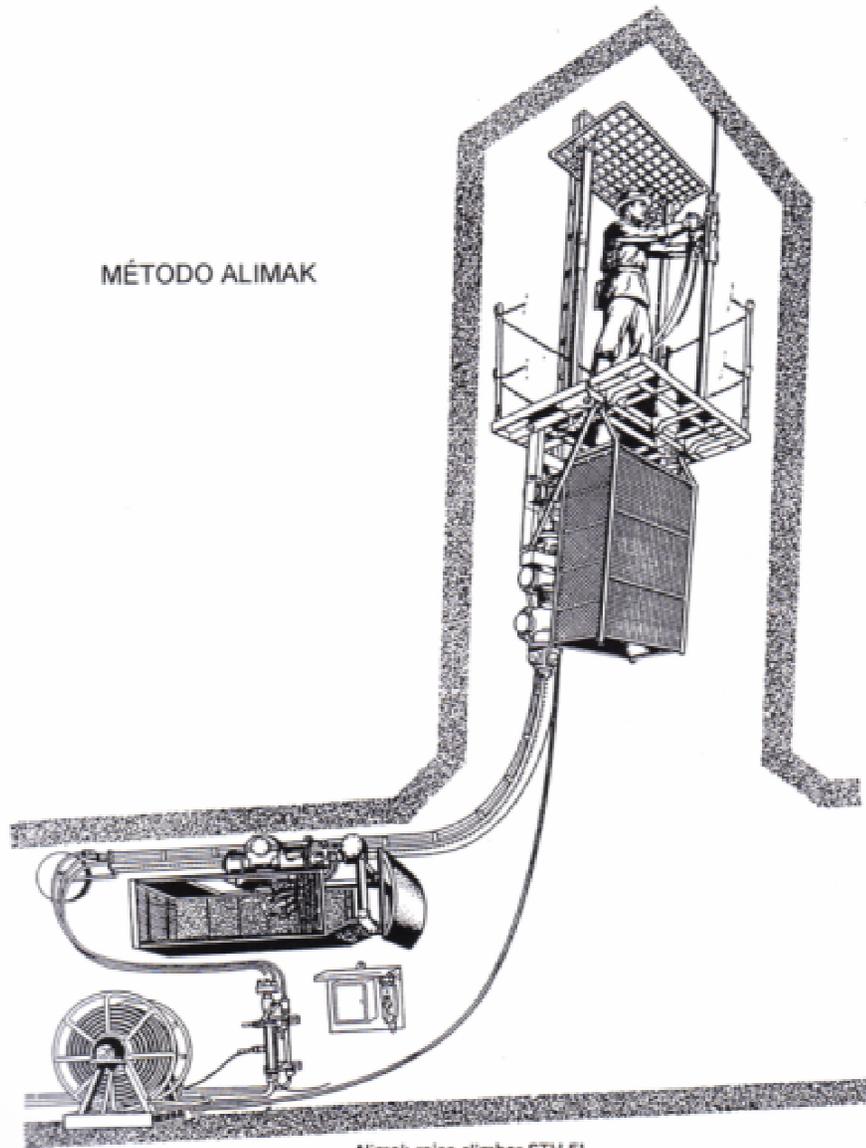
∅ → 45 a 51 mm



L → 2.500 a 6.100 mm

Chimeneas - Alimak

MÉTODO ALIMAK

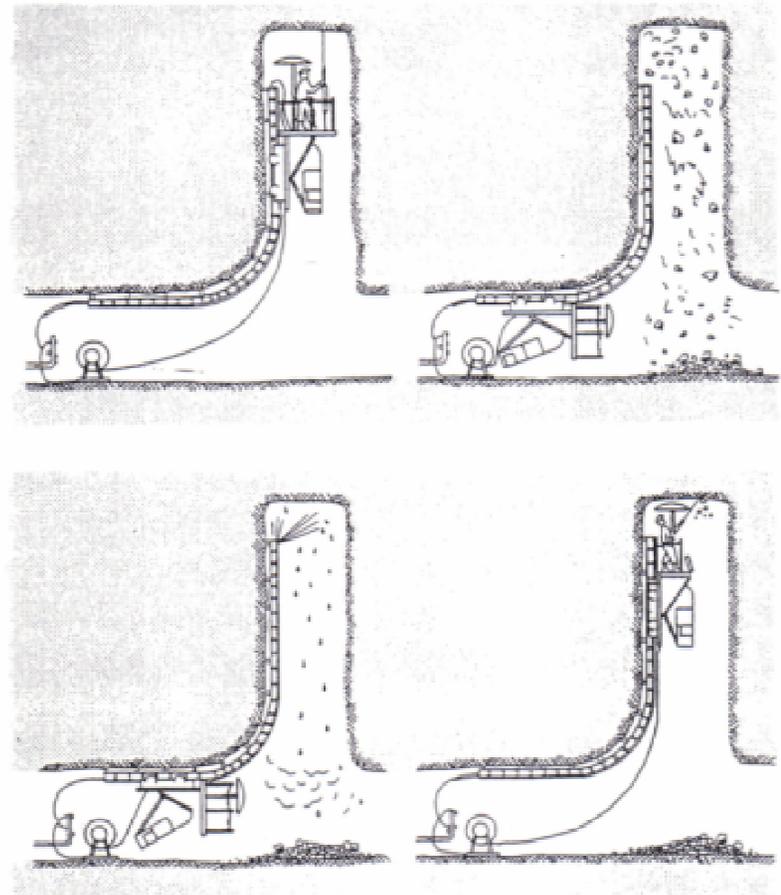


Alimak raise climber STH-5L

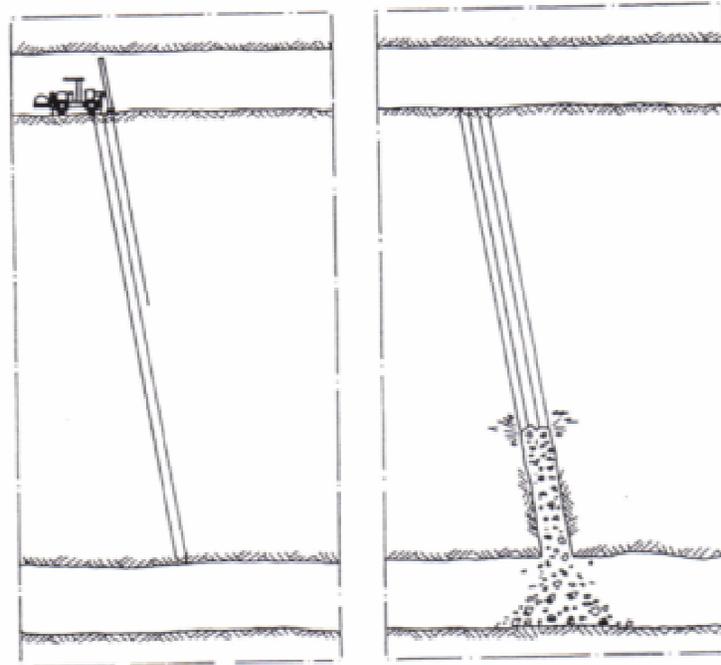
Alimak method

This is a method suitable for fissured or unhomogeneous rock conditions. The Alimak raise climber includes a safety canopy, working platform, lift basket, drive motor, and rack-and-pinion rail. The working platform can be inclined to conform to the raise, so the method suits all raise inclinations.

The lift is driven along the rail either by an air motor, electric motor or diesel engine. Rail sections are attached to the wall or roof by expansion shell bolts. The compressed air and water lines required for drilling and ventilation are installed inside the rail sections for protection. The drillers travel up the raise protected in the raise lift and carry out drilling, charging and scaling under the safety canopy.



Chimeneas - VCR

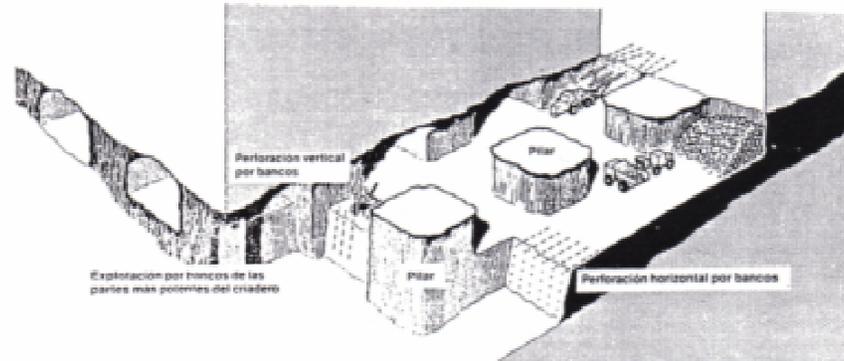


EQUIPO DE PERFORACIÓN "DTH"

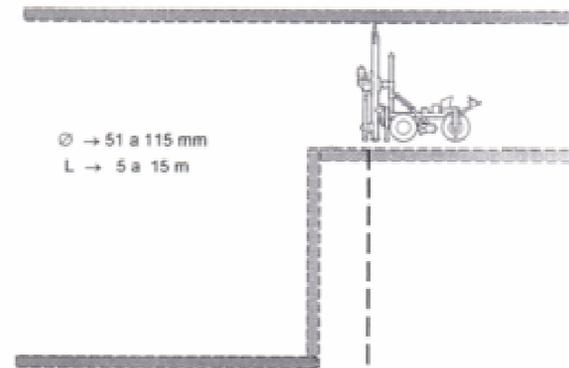
[$\varnothing \rightarrow 4 \frac{1}{2}''$ a $6 \frac{1}{2}''$]

Arranque en minas subterráneas

MÉTODO DE EXPLOTACIÓN POR ROOM AND PILLAR



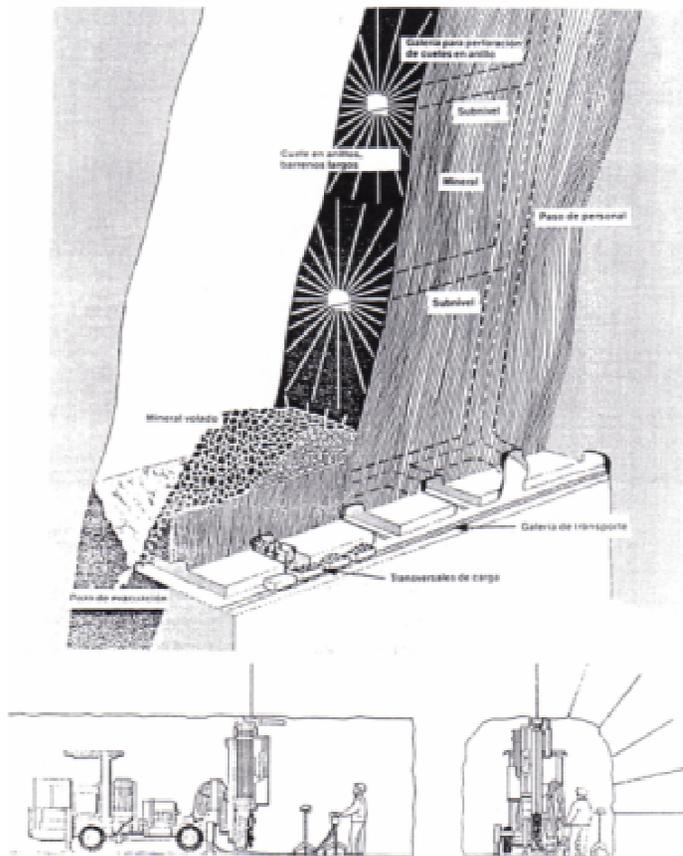
BANQUEO



EQUIPO : Wagon-drill o Track-drill
Top-hammer o DTH

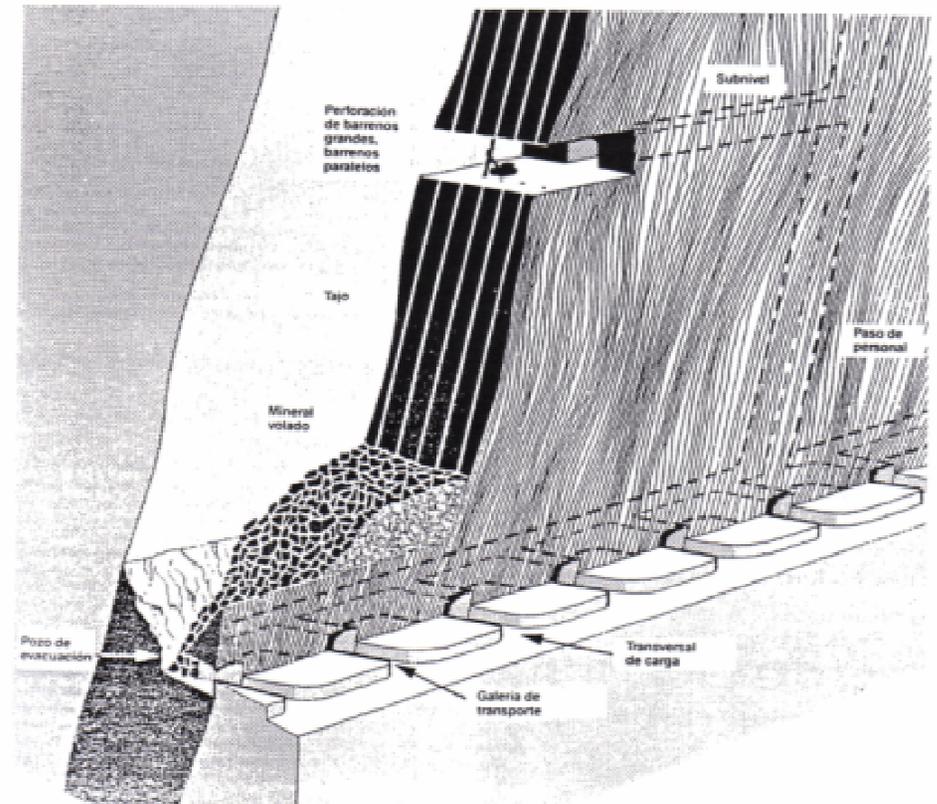
Arranque en minas subterráneas

MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUB-LEVEL STOPING (SLS)

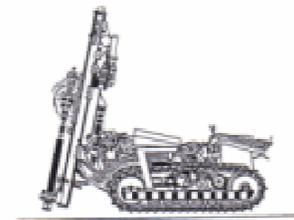


EQUIPO : Jumbo radial electro-hidráulico
 $\varnothing \rightarrow 48$ a 76 mm
 L \rightarrow hasta 40 m

MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUB-LEVEL STOPING
 VERSIÓN LONG-BLAST-HOLE (LBH)

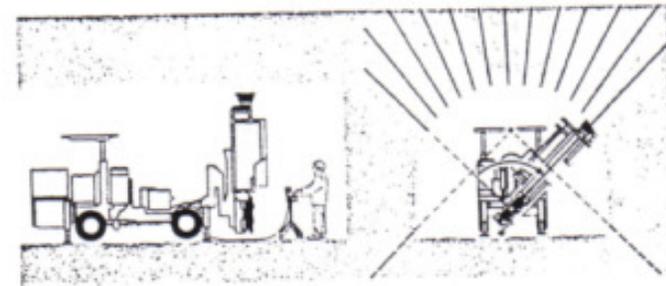
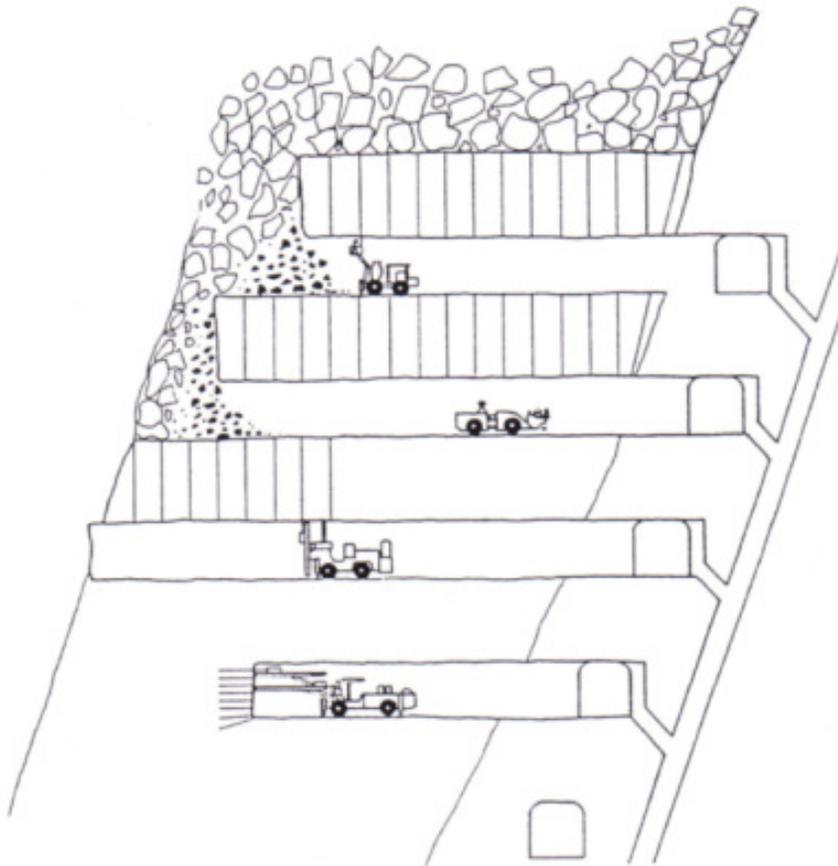


EQUIPO : Track-drill (u otro) DTH
 $\varnothing \rightarrow 115$ a 165 mm
 L $\rightarrow 30$ a 80 m



Arranque en minas subterráneas

MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUB-LEVEL CAVING (SLC)



Simba H252/H1252 In drilling position. Tilt angle 20° forward (45° optional) and 80° backwards.

Simba H250, H1250, H350, H1350, H4350 Fan-drilling in 90° section; feed beam re-positioned at 20° intervals.

EQUIPO : Jumbo radial electro-hidráulico

Ø → 48 a 76 mm

L → hasta 40 m

ARRANQUE EN MINAS SUBTERRÁNEAS

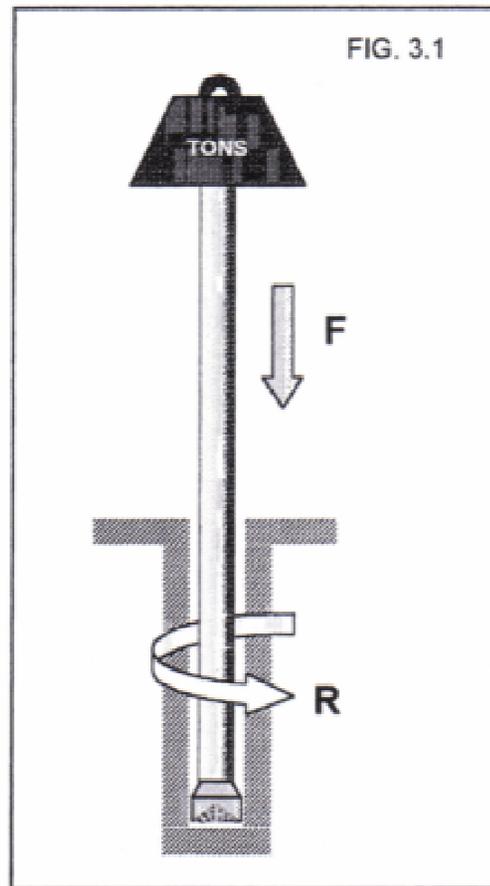
Mining Method	Room- and -Pillar Mining		Cut- and -Fill Stopping		Shrinkage Stopping	
Drilling and Blasting Technique	 Drifting and slashing Frontal benching	 Vertical or downward benching	 Roof-drilling or overhand stopping	 Frontal stopping, breasting	 Overhand stopping	 Frontal stopping, breasting
Applicable Drilling Equipment	 Mechanized Drifting Jumbo	 Mechanized Airtrack drill	 Mechanized Light Wagon Drill	 Mechanized Drifting Jumbo	 Hand-held Stoper Drill	 Hand-held Airleg Drill
Drilling Data	 38 – 48 3.0 – 5.5	 64 – 76 as required	 33 – 38 3.0 – 4.0	 38 – 48 3.0 – 4.0	 29 – 33 2.0 – 2.5	 29 – 33 2.0 – 3.5
Drilling Equipment Performance:						
With pneumatic rock drill m/h	60 – 75	15 – 25	20 – 40	60 – 70	8 – 12	10 – 15
With hydraulic rock drill m/h	90 – 110	(25 – 35)	na	90 – 110	na	na
Drilling – blasting						
Production, m ³ rock per drilled metre	1.5 – 2.0	3.0 – 4.0	0.9 – 1.2	1.0 – 1.4	0.7 – 0.9	0.7 – 0.9

ARRANQUE EN MINAS SUBTERRÁNEAS

Mining Method	Sublevel Caving	Sublevel Stopping		Sublevel Stopping	
Drilling and Blasting Technique	 Fan drilling	 Ring drilling		 Parallel drilling	
Applicable Drilling Equipment	 Mechanized Fandril	 Bar-and-arm rigging	 Mechanized Ring drill rig	 Mechanized Airtrack with DTH hammer and high pressure	
Drilling data	 48 – 51 (64) 12 – 15	 48 – 51 15 – 20	 48 – 51 (64) 15 – 25	 105 – 115 50 – 60	 152 – 165 50 – 60
Drilling Equipment Performance:					
With pneumatic rock drill m/shift	200 – 240	50 – 60	100 – 120	50	50
With hydraulic rock drill m/shift	240 – 300	na	120 – 180	na	na
Drilling – Blasting					
Production, m ³ rock per drilled metre	1.8 – 2.3	1.5 – 2.5	1.5 – 2.5	8 – 10	14 – 18

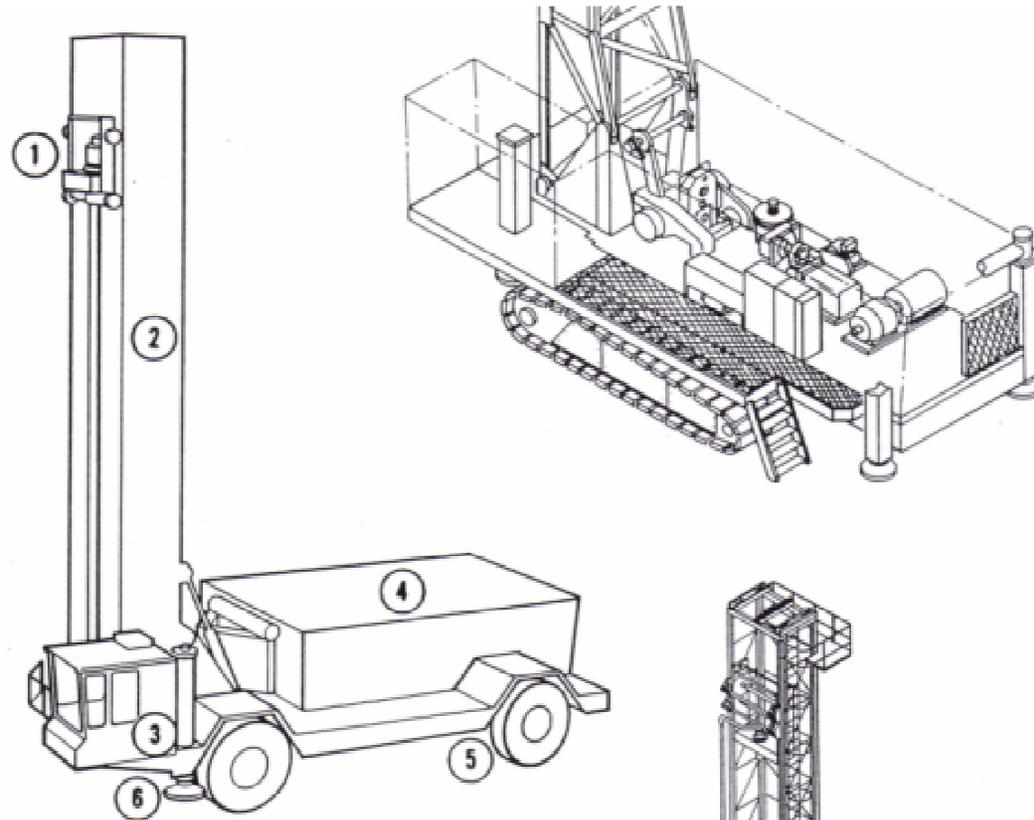
Perforación por rotación

Principio

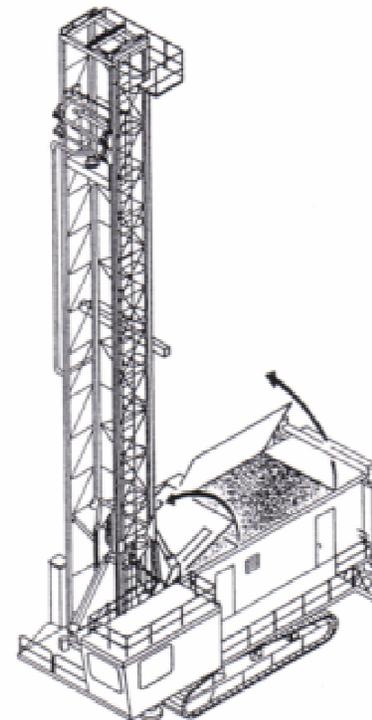


- Aplicar energía a la roca haciendo rotar una herramienta (trépano) conjuntamente con la acción de una gran fuerza de empuje
- Tres variantes:
 - Rotación con trépano cortante (roca blanda, perforación para petróleo)
 - Rotación con trépano triturante (rocas medianas a duras, diámetro mínimo de 150 mm)
 - Rotación con herramienta abrasiva (exclusivamente para sondajes)

Descripción del equipo

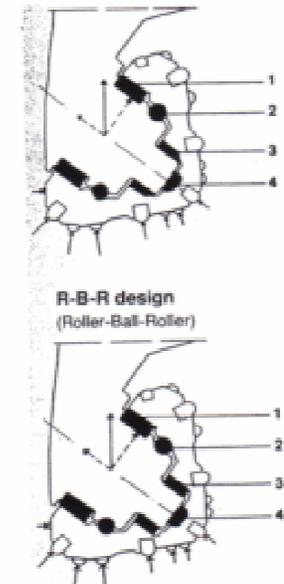
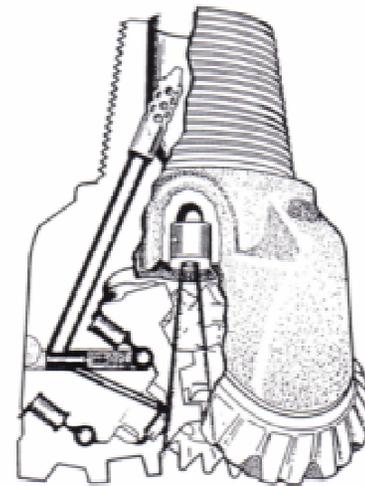
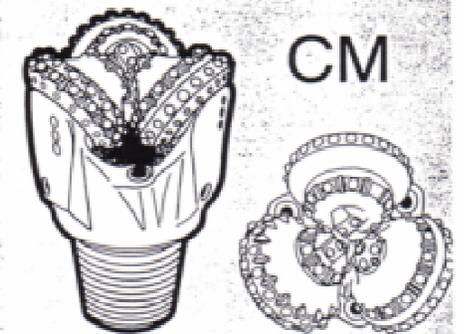
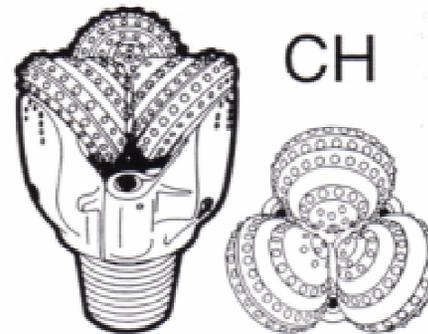


- 1 Cabezal deslizante y motor de rotación
- 2 Mástil abatible y columna de barras
- 3 Cabina del operador
- 4 Sala de máquinas
 - Unidad de potencia
 - Compresores de aire
 - Bombas
 - Tableros eléctricos
- 5 Chassis
- 6 Patas hidráulicas de nivelación y apoyo



Herramientas de perforación

- Trépanos cortantes:
 - Roca blanda
- Trépanos triturantes:
 - Tres rodillos cónicos con dientes → triconos



Variables de operación

- Velocidad de rotación (rpm)
- Fuerza de empuje → depende dureza de la roca
- Diámetro de perforación
- Velocidad y caudal del aire de barrido
 - Remoción o barrido del detritus desde el fondo del tiro.
 - Extracción del detritus hacia afuera.
 - Refrigeración y lubricación de los rodamientos del tricono.
- Desgaste de los trépanos
- Consumos de energía:
 - Rotación
 - Empuje
 - Aire de barrido

Explosivos

Tipos de explosivos

- Según velocidad de propagación de la reacción:
 - **DEFLAGRANTES**: Reacción química es una combustión muy violenta llamada deflagración, que se propaga a velocidades del orden de 400 a 800 m/seg. Se les denomina también explosivos propelentes o bajos explosivos. El ejemplo más conocido es la Pólvora Negra
 - **DETONANTES**: Reacción química muy violenta llamada detonación, que se propaga a través de la columna explosiva acompañada de una onda de choque a una velocidad del orden 2.000 a 8.000 m/seg. Se habla así de explosivos detonantes o altos explosivos. El ejemplo más popular y conocido son las Dinamitas.

Tipos de explosivos

- Según la energía de iniciación requerida
 - **PRIMARIOS**: Son aquellos que sólo requieren de una mínima cantidad de energía para alcanzar el estado de detonación; por ejemplo, una llama, chispa o golpe.
 - **SECUNDARIOS**: Son aquellos que requieren de una gran energía de iniciación, proporcionada generalmente por el impacto de la onda de choque de un explosivo primario.
- En arranque, se usan explosivos detonantes secundarios.
- Para iniciarlos, se usan explosivos detonantes primarios.

Tipos de explosivos

- Según composición química:
 - **Compuestos químicos**, orgánicos o inorgánicos, que son explosivos propiamente tales. Por ejemplo, la Nitroglicerina (NG) o el Trinitrotolueno (TNT).
 - **Mezclas entre compuestos químicos explosivos propiamente tales con otros que no lo son**. Por ejemplo, los conocidos con el nombre de Dinamitas.
 - **Mezclas de compuestos químicos reductores con compuestos oxidantes**, en que individualmente ninguno de ellos puede catalogarse como un explosivo propiamente tal. La terminología americana los denomina Agentes Explosivos, y el ejemplo más conocido y representativo es el ANFO.

Detonación



- Proceso físico-químico mediante el cual el explosivo experimenta una reacción química muy violenta que lo descompone en gases a alta presión y temperatura, con una gran liberación de calor.
- Gran velocidad de propagación, superior a la velocidad de las ondas sonoras (~ 1.500 m/seg) en la columna explosiva \rightarrow onda de choque (compresión)
 - Reacción química proporciona la energía en forma de calor para acelerar y mantener el proceso
 - Onda de choque aporta la energía de impacto que permite desencadenar el proceso

Detonación - Explosión

- Teoría Termohidrodinámica de la Detonación...

ESTADO ORIGINAL	P_1	→ Presión atmosférica	1	[Atm]
	T_1	→ Temperatura ambiente	298	[°K]
	δ_1	→ Densidad del explosivo	0,8 a 1,6	[gr/cm ³]
ESTADO DE DETONACIÓN	P_2	→ Presión de detonación	20 a 300	[K-atm]
	T_2	→ Temp. de detonación	2.000 a 6.000	[°K]
	D	→ Veloc. de detonación	2.000 a 8.000	[m/seg]
	W	→ Velocidad de flujo	$\approx \frac{1}{4} D$	[m/seg]
	δ_2	→ Densidad	$> \delta_1 (\approx \frac{4}{3} \delta_1)$	[gr/cm ³]
	Q_2	→ Calor	600 a 1.600	[Kcal/kg]
ESTADO DE EXPLOSIÓN	P_3	→ Presión de explosión	$\approx \frac{1}{2} P_2$	[Atm]
	T_3	→ Temp. de explosión	$< T_2$	[°K]
	Q_3	→ Calor (proc. Adiabático)	$= Q_2$	[kcal/kg]
	δ_3	→ Densidad (proc. Isócoro)	$= \delta_1$	[gr/cm ³]

Características de los explosivos

- La detonación produce dos efectos:
 - **Fracturamiento de la roca** (onda de choque) → Estado de detonación
 - **Empuje** (expansión de gases) → Estado de explosión
- También importan algunas características prácticas
- Los explosivos se caracterizan por:
 - Características rompedoras
 - Características energéticas
 - Características prácticas



Características rompedoras

- Relacionadas con el fracturamiento de la roca → Estado de detonación

- Presión de detonación

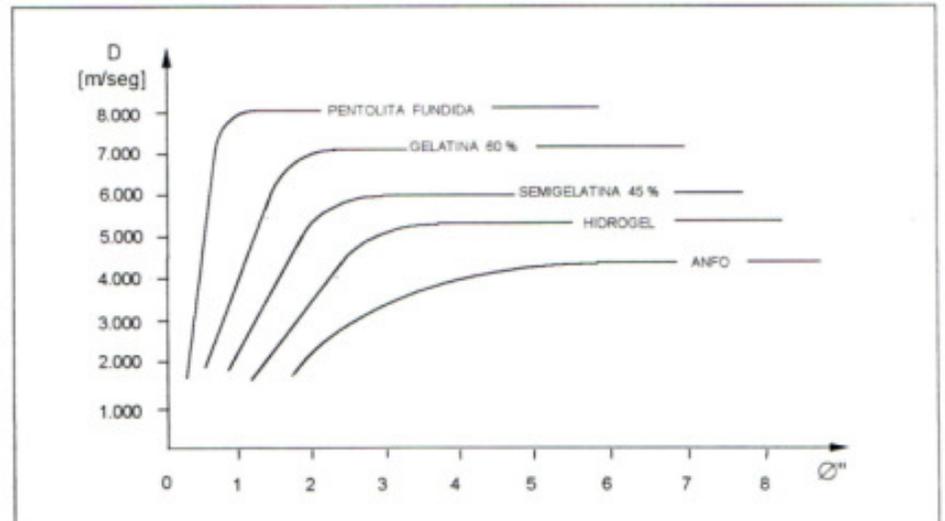
$$P_2 \approx \frac{1}{4} \frac{\gamma D^2}{G \times 10^4} \quad [\text{kgp/cm}^2]$$

donde:

γ	→	peso específico del explosivo	[kgp/m ³]
D	→	velocidad de detonación	[m/seg]
G	→	aceleración de gravedad	[9,8 m/seg ²]

- Velocidad de detonación

- Densidad



Características energéticas

- Relacionadas con la acción expansiva de los gases
→ estado de explosión
 - Trabajo máximo disponible (calor de formación de los productos, menos calor de formación de los reactantes)

- Volumen de gases:

- Estequiometría: 22,4 lt por mol de gas
- Varía entre 700 a 1000 lt/kg de explosivo

- Presión de los gases:

$$A_o \approx Q_3 \quad [\text{Kcal/kg}]$$

$$P_b = P_3 (\Delta)^n$$

$$P_3 = \frac{\sum n_i R T_3}{V_3 - \alpha}$$

$$\Delta = \frac{\text{Volumen del explosivo}}{\text{Volumen de la cámara de explosión}} \leq 1$$

n → exponente empírico (2 a 3)

Características prácticas

- Relacionadas con el manejo operacional y restricciones de seguridad:
 - **Sensibilidad**
 - Sensibilidad al impacto
 - Sensibilidad a la iniciación primaria: explosivos sensibles o insensibles a un Detonador N° 8
 - Sensibilidad a la detonación por simpatía: Es una medida de la distancia máxima a la cual la detonación de una carga explosiva induce la detonación de otra similar, al aire libre. Varía entre 2 a 8 veces el diámetro del cartucho.
 - **Fuerza o potencia** (comparación del trabajo disponible de gases + poder rompedor)
 - **Gases tóxicos:**
 - Monóxido de Carbono (CO) y Óxidos de Nitrógeno (N₂O, NO, NO₂ y NO₃)
 - Producidos por:
 - Energía de iniciación insuficiente
 - Mezclas explosivas defectuosas
 - Explosivo alterado en su composición original por manejo descuidado
 - Presencia de agentes extraños al explosivo mismo
 - **Resistencia al agua:**
 - Depende de la cantidad de AN
 - Se expresa en horas
 - **Estabilidad química**

Explosivos industriales

- Se diseñan de modo que su reacción no genere gases tóxicos → balance de oxígeno
- Ingredientes en tabla →

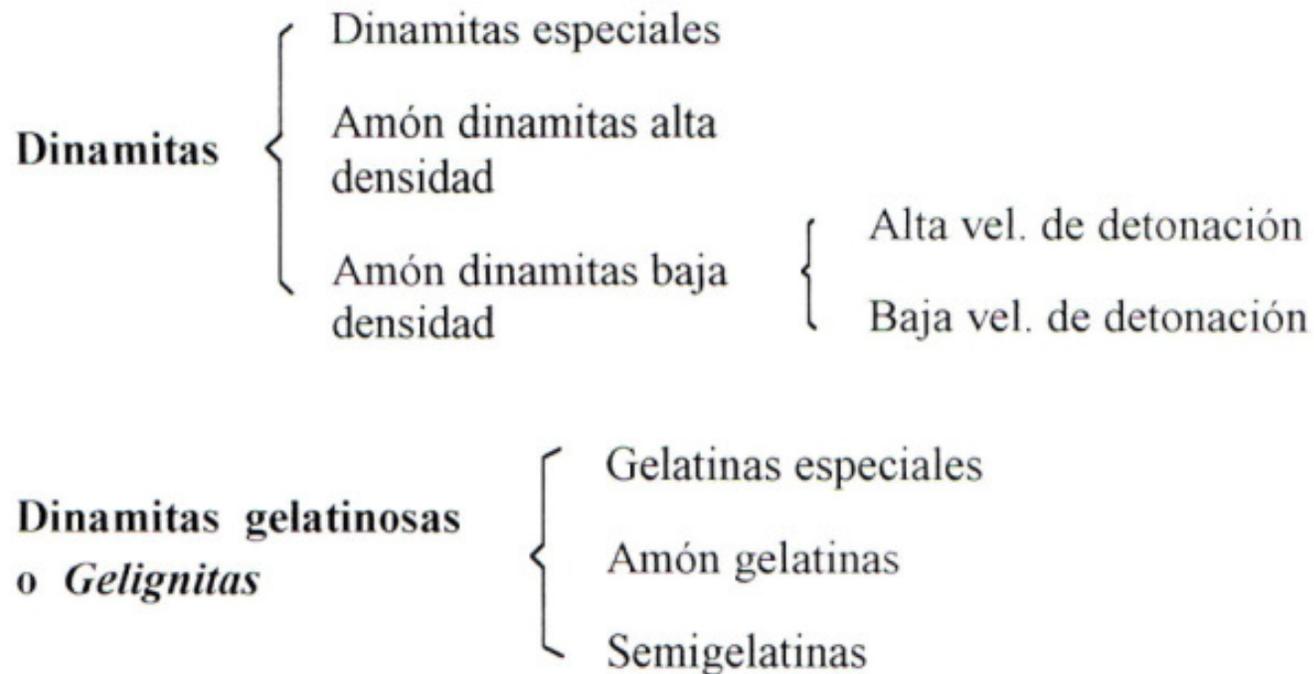
EXPLOSIVOS BASES	:	Nitroglicerina (NG)	$C_3 H_5 (NO_3)_3$
		Trinitrotolueno (TNT)	$C_7 H_5 (NO_2)_3$
		Nitrocelulosa (NC)	$C_6 H_7 O_2 (ONO_2)_3$
		P E T N	$C_5 H_8 N_4 O_{12}$
OXIDANTES	:	Nitrato de Amonio (AN)	$NH_4 NO_3$
		Nitrato de Sodio (SN)	$Na NO_3$
REDUCTORES	:	Carbón vegetal	C
		Petróleo (FO)	$\approx CH_2$
		Parafina	CH_2
		Celulosa	$C_6 H_7 O_2 (OH)_3$
		Azufre	S
		Aluminio pulverizado	Al
OTROS	:	Estabilizadores	$Ca CO_3$ y $Ca SO_4$
		Sales incombustibles	Na Cl
		Gomas espesadoras	
		Emulsificantes	
		Desdensificadores	

Explosivos industriales

- Explosivos en base a nitroglicerina o *dinamitas*
- Explosivos secos granulados o *nitrocarbonitratos*
- Explosivos acuosos (slurries) o *hidrogeles*
- Explosivos emulsionados o *emulsiones*

Dinamitas

CLASIFICACIÓN



Nitrocarbonitratos

ANFO	:	%	AN + FO				
			94,5 - 5,5				
ANFOS ALUMINIZADOS	:	%	AN	+	FO	+	Al
			93,0 - 86,0		5,0 - 2,0		2,0 - 12,0
ANFOS LIVIANOS	:	%	ANFO	+	RELLENO		
			80 - 60		20 - 40		
SANFO	:	%	[AN + FO]	+	[SN + C]		
			94,5 - 5,5		85,0 - 15,0		
SANFOS ALUMINIZADOS	:	%	[AN + FO]	+	[SN + C]	+	Al
			94,5 - 5,5		85,0 - 15,0		2,0 - 8,0

Hidrogel

- Fase líquida o medio de dispersión (~15 %): solución saturada de nitratos inorgánicos: AN y/o SN
- Fase sólida dispersa en forma coloidal:
 - Oxidantes: nitratos
 - Combustibles o reductores: carbón, azufre, aluminio
 - Sensibilizadores: TNT, NC, MMAN
 - Espesadores: gomas

Emulsiones

- Fase acuosa o discontinua: Solución saturada de nitratos inorgánicos (AN y/o SN) suspendida en forma de gotas microscópicas en la fase continua.
- Fase aceitosa o continua: Hidrocarburos: petróleo, parafina u otro aceite
- Fase gaseosa y/o sólida dispersa: Pequeñas burbujas de aire naturales o de vidrio, polvo de aluminio y microesferas de plástico o resinas. Su función es controlar la sensibilidad y la densidad explosivo.
- Agentes emulsificantes

ANFOS pesados

PRODUCTO	DENSIDAD [gr/cc]	VEL. DE DETONACIÓN [m/seg]	PRESION DE DETONACIÓN [kbar]	CALOR [kcal/kg]	VOLUMEN DE GASES [lt/kg]
HIDROMITE 1100/1800	1,37-1.34	3.620-4.130	44-56	632 - 865	1.120-1.045
HEET 910/960	0,90 - 1,34	3.740-4.200	30-47	900 - 750	1.060 - 1.090
HEET 930/950 AI	1.33- 1,35	3.980-3.660	49. -38	830 - 870	1.080-1.070

Tronadura

Iniciación de una tronadura

- Funciones de accesorios de voladura:
 - INICIACIÓN PROPIAMENTE TAL: Corresponde a la acción o efecto que inicia la detonación de la columna explosiva en cada uno de los tiros.
 - CONEXIÓN: Se refiere a la necesidad de conectar todos los tiros entre sí de modo de transmitir o propagar la detonación a cada uno de ellos.
 - SECUENCIA: Corresponde al efecto de imprimir un orden de salida al conjunto de cargas explosivas que conforman el diseño o diagrama de disparo.
 - ACTIVACIÓN O ENCENDIDO: Se refiere a la fuente de energía inicial que activa el proceso de detonación de todo el conjunto de cargas explosivas involucradas en la tronadura.

Accesorios

- Guía corriente: combustión a 0,75 cm/seg; activación o encendido a fuego
- Guía conectora: combustión a 1,5 a 10 cm/seg; activación o encendido a fuego, conexión y secuencia; conecta guías corrientes
- Guía detonante: detonación a 6000-7000 m/seg; conexión e iniciación
- Detonadores corrientes: cápsula con explosivo primario y secundario para iniciación, activados por guía corriente
- Detonadores eléctricos: iniciación, conexión y secuencia
 - Instantáneos: igual a det. Corrientes pero se activan con carga eléctrica
 - De retardo largo o corto
- Detonadores no eléctricos: más recientes; iniciación y secuencia, se conectan con guía detonante
- Microconectores: para intercalar retardo en milisegundos; secuencia
- Amplificadores: activados por cualquier detonador o por guía detonante; iniciación

- Ver MODALIDADES DE INICIACIÓN para ejemplos

Tronadura

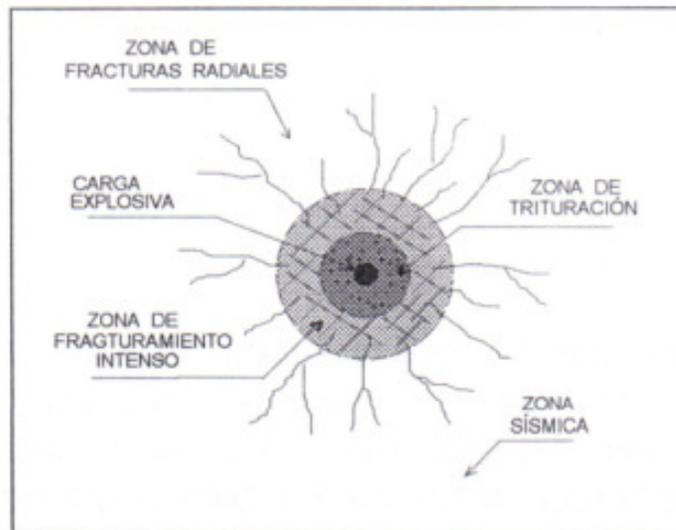
Introducción

- Tronadura (o voladura): operación elemental de hacer detonar cargas explosivas insertas en un macizo rocoso.
- Cantidad de energía (o cantidad de explosivos) requerida para una determinada tronadura, depende de las propiedades geomecánicas de la roca y de la granulometría del producto que se desea obtener
- La energía se utiliza en:
 - Creación de nuevas superficies o fragmentación propiamente tal
 - Deformaciones plásticas y/o fricción entre superficies
 - Desplazamiento y proyección del material fragmentado
 - Deformaciones elásticas u ondas sísmicas que se propagan por el medio rocoso

Principios de fragmentación

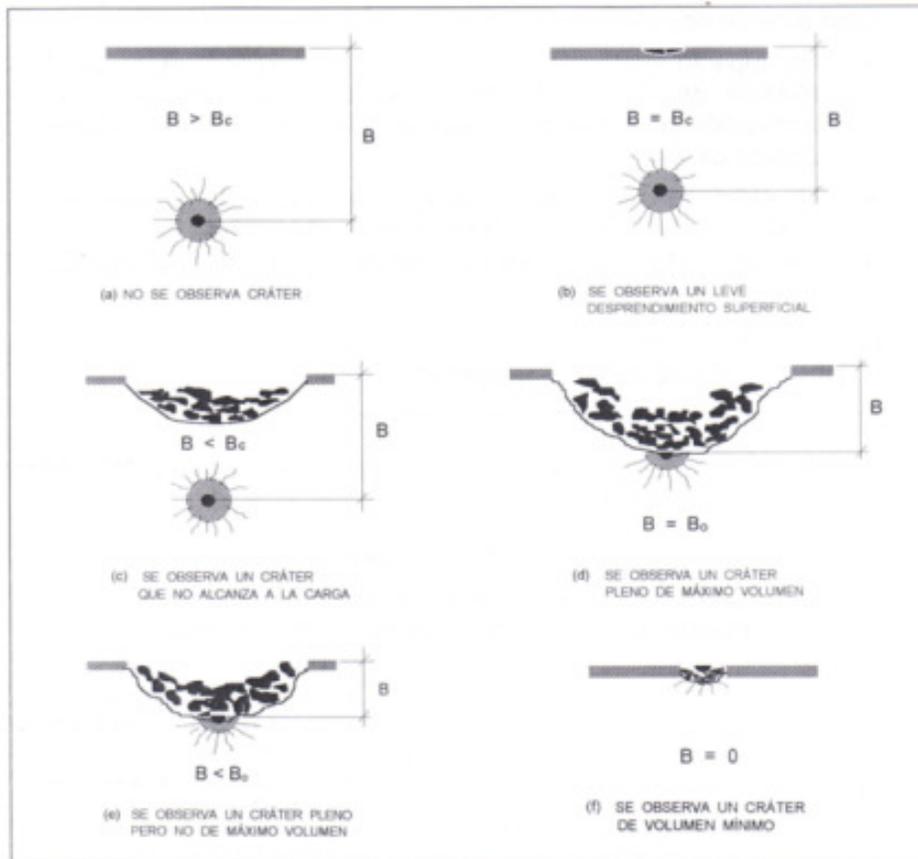
- Al hacer detonar una carga explosiva, se producen dos efectos:
 - Impacto muy violento provocado por la repentina aplicación de la Presión de Detonación (P_2) asociada a la onda de choque que acompaña a la reacción química. Depende de los parámetros del Estado de Detonación.
 - Empuje resultante de la expansión de los gases a alta presión y temperatura presentes en la cámara de explosión. Depende de los parámetros del Estado de Explosión.
- Suposición: La roca es un sólido continuo, homogéneo, isótropo y elástico

Principios de fragmentación



- Carga explosiva concentrada (esférica), inserta en un macizo rocoso infinitamente extendido
 - Primera aureola de roca triturada, inmediatamente vecina a la carga.
 - Segunda aureola intensamente fragmentada → fracturas entrecruzadas de cizalle.
 - Periferia: zona donde se observan fracturas radiales, que se extiende 4 - 12 veces el diámetro de la carga.
 - Finalmente, una zona donde no se observan fracturas, denominada zona sísmica.

Principios de fragmentación



- Carga explosiva concentrada (esférica), inserta en un macizo rocoso con una cara libre en las cercanías
 - Cargas con igual cantidad de explosivo y misma combinación explosivo-roca → los efectos no sólo dependen de las características del explosivo y de las propiedades de la roca, sino que también de parámetros geométricos

Principios de fragmentación

- Mecanismos simples de fragmentación
 - Modelo antiguo
 - Teoría de la *Onda de Choque*
 - Fracturas radiales
 - Teoría de Melvin Cook
- Modelos muy simplificados
 - Suponen carga esférica única
 - Asocian roca a un sólido continuo, homogéneo, isótropo y elástico
 - Onda de choque genera diversos tipos de fracturas:
 - Trituración en las vecindades de la carga
 - Fracturas entrecruzadas de cizalle
 - Fracturas radiales de tracción en el entorno más alejado
 - Fracturas de tracción por reflexión de la *onda de fatiga* en una eventual *cara libre* cercana a la carga
 - Acción de los gases:
 - Penetran en las fracturas radiales creadas previamente y las expanden
 - Su fuerza de empuje remueve todo el volumen de roca comprometido entre la carga explosiva y la *cara libre*

Criterios de diseño

- Metodologías empíricas para resolver el problema:
 - Observación de los resultados de la práctica operacional
 - Intuición
 - Experiencia práctica
 - Aproximaciones sucesivas: pruebas y errores
 - Investigaciones y ensayos
 - Intuición
 - Ensayos a escala de laboratorio
 - Ensayos a escala real: experiencias en terreno
 - Modelamientos
 - Físico-matemáticos
 - Digitales

Criterios de diseño

- Metodología:
 - Primero, se deben conocer y evaluar las **propiedades de la roca**.
 - Segundo, en función de las propiedades de la roca se **selecciona el explosivo** a utilizar, incorporando también al análisis las restricciones operacionales inherentes a la faena y/o al tipo de excavación.
 - Finalmente, se procede al **diseño** propiamente tal, aplicando la metodología o formulismo que se estime conveniente, en función de los parámetros geométricos de la tronadura y de la granulometría esperada.

Criterios de diseño

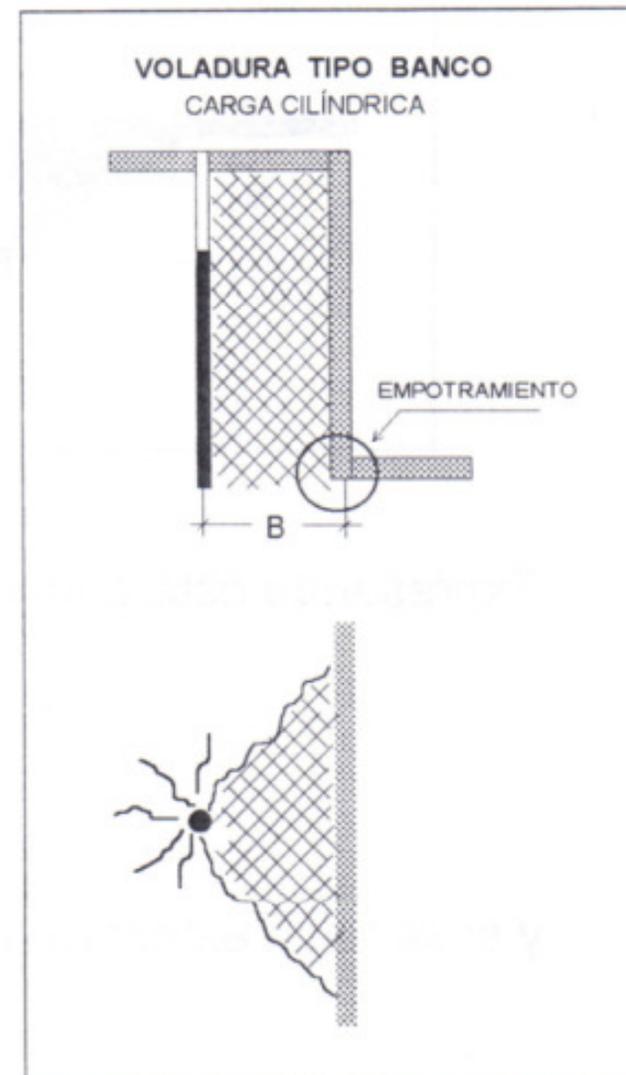
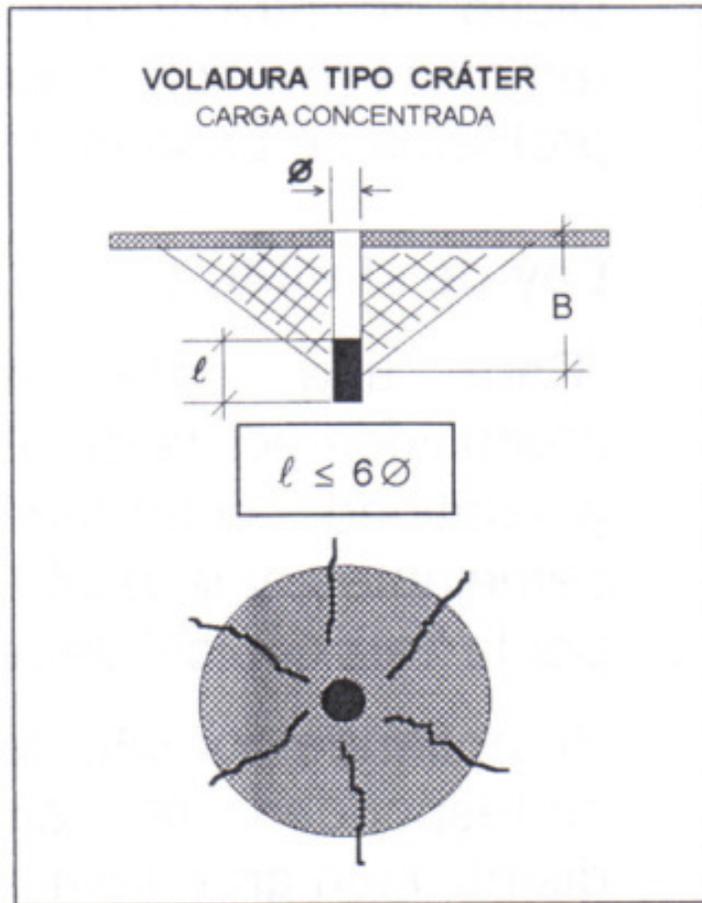
- Propiedades de la roca
 - Características físico-mecánicas: densidad; resistencias a la compresión, tracción y cizalle; módulos elásticos (Módulo de Young y Módulo Poisson); velocidad de propagación de las ondas de fatiga.
 - Características geotécnicas: estratificación, sistemas de fracturas pre-existentes, frecuencia y orientación de las fracturas, condición de las fracturas.
- Restricciones operacionales
 - Granulometría esperada
 - Control de daño por vibraciones
 - Presencia de agua
 - Usos y costumbres de la faena

Criterios de diseño

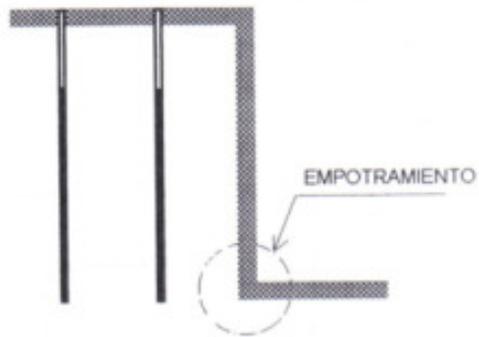
- Características del explosivo
 - Características rompedoras: densidad de carguío (D), velocidad de detonación (D), presión de detonación (P2).
 - Características energéticas: calor liberado por la reacción química (Q), volumen de gases (V), presión de los gases (Pb).
 - Características prácticas: sensibilidad, fuerza o potencia relativa, resistencia al agua.
- Parámetros geométricos de la tronadura
 - Diámetro de perforación (\emptyset)
 - Longitud de los tiros (L)
 - Longitud de la carga explosiva (l)
 - Distancia de la carga a la cara libre (Burden)
 - Espaciamiento entre los tiros (E)
 - Secuencia de salida y retardos entre cargas
 - Ubicación del artefacto iniciador
 - Acoplamiento entre el explosivo y la roca: relación entre el \emptyset de la columna explosiva y el \emptyset de perforación

Configuraciones básicas

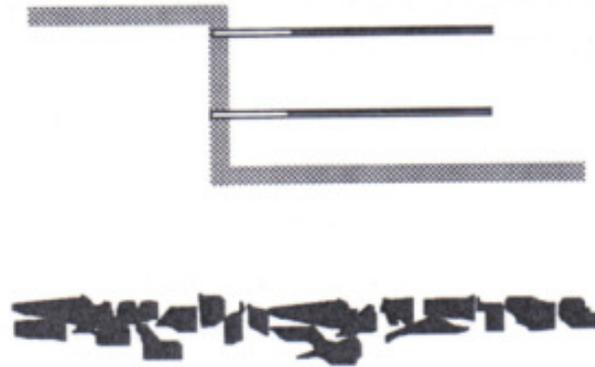
- Voladura tipo cráter y tipo banco



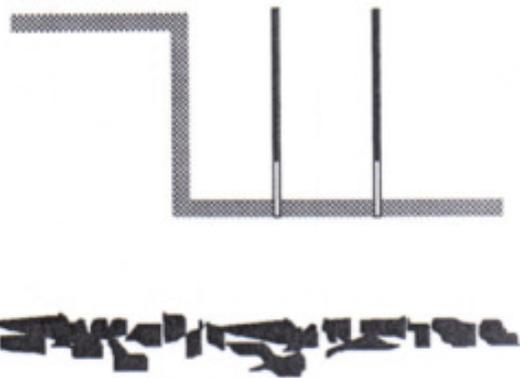
Voladura tipo banco



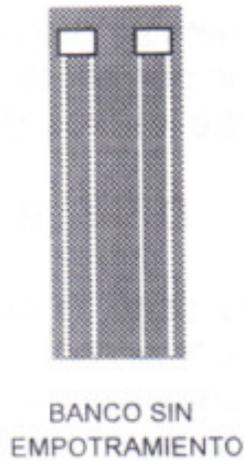
BANCO NORMAL



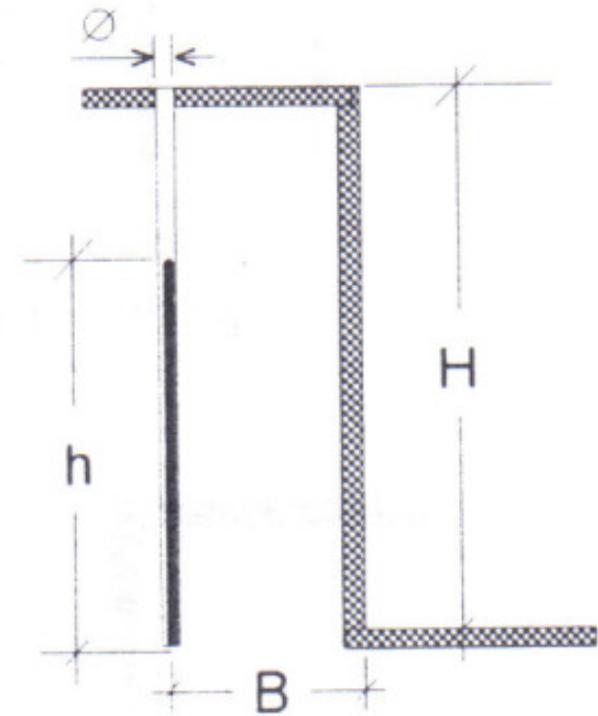
BANCO HORIZONTAL



BANCO INVERTIDO

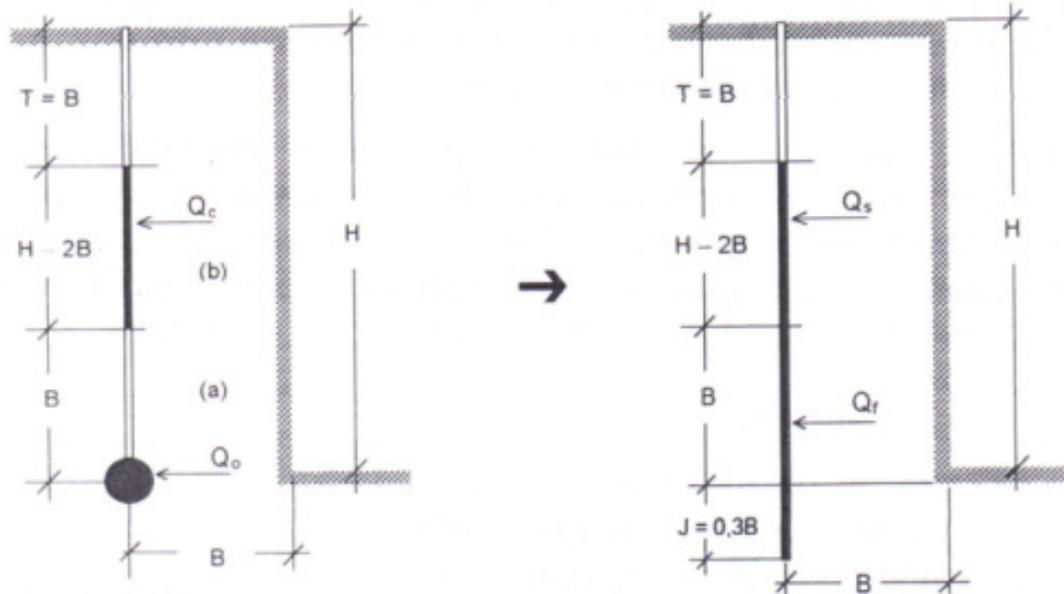


BANCO SIN EMPOTRAMIENTO



Voladura tipo banco

- Metodología de U. Langefors



$$B = \frac{\varnothing}{2} \sqrt{\frac{\pi \Delta FC}{1,11 a_3^3 E/B}} \quad [m]$$

donde :

B	→	Burden	[m]
\varnothing	→	Diámetro de perforación	[m]
Δ	→	Densidad de carguío	[kg/m ³]
FC	→	Factor de corrección por explosivo	
a_3	→	Constante de Langefors	[kg/m ³]
E/B	→	Factor de corrección por espaciamento	

Voladura tipo banco

- Metodología de R. Ash

$$B = \frac{K_B \varnothing''}{12} \quad [\text{piés}]$$

Altura de banco	→	$H = K_H B$	K_H	→	1,5 a 4,0
Espaciamiento	→	$E = K_S B$	K_S	→	1,0 a 2,0
Taco	→	$T = K_T B$	K_T	→	0,7 a 1,3
Pasadura	→	$J = K_J B$	K_J	→	0,2 a 0,4

K_B 

EXPLOSIVO	ROCA		
	Blanda	Mediana	Dura
Baja densidad (0,8 a 1,0 gr/cm ³)	30	25	20
Densidad media (1,0 a 1,2 gr/cm ³)	35	30	25
Alta densidad (1,2 a 1,4 gr/cm ³)	40	35	30