



CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL

**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

# Universidad Politécnica de Madrid

## SOSTENIMIENTO EN MINERÍA Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

**Jorge Castilla Gómez - Juan Herrera Herbert**

**Department of Mining and Underground Excavations.  
Madrid School of Mines  
Technical University of Madrid**

Oct - 2015





**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



# INTRODUCCIÓN



## Índice

- Introducción
- Caracterización del macizo rocoso
- Estructura del macizo rocoso
- Bulones y anclajes
- Cerchas
- Hormigón proyectado
- Entibación hidráulica



**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



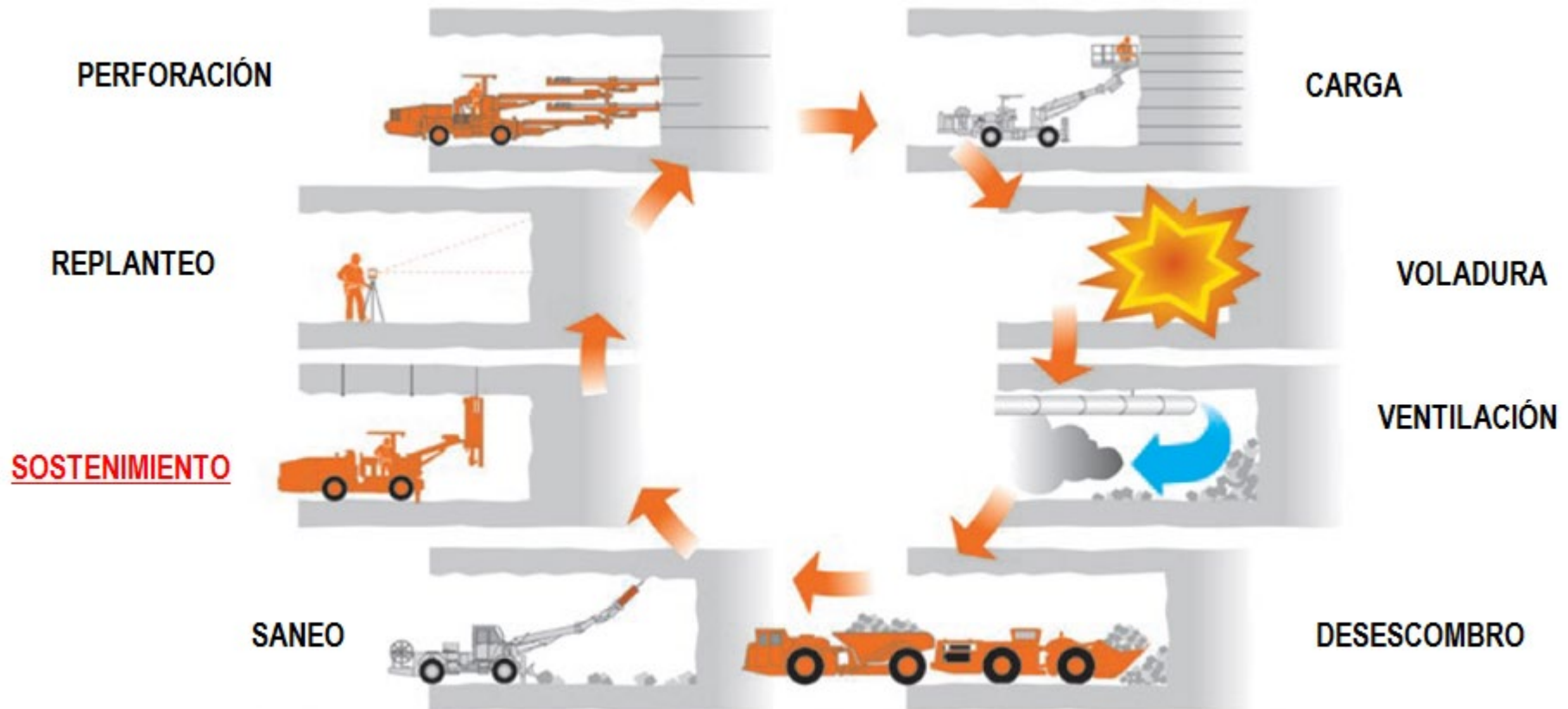
Universidad Politécnica de Madrid



# CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

## Introducción

### Ciclo de túnel (Excavación convencional por perforación y voladura)





## Caracterización del macizo rocoso

- Caracterizaciones descriptivas:
  - Terzaghi (1946)
  - Stini y Lauffer (1958)
  
- Caracterizaciones numéricas
  - Deere (1964)
  - Bienawski (1974, 1989)
  - Barton (1976)

## Caracterización del macizo rocoso

### ■ Índice RQD - Rock Quality Designation Index (Deere)

- El **índice RQD** se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud.
- Este valor se obtiene para sondeos extraídos con tubo testiguero doble y diámetro de testigo > 50mm

RQD	<25	25-50	50-75	75-90	90-100
Calidad	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena

## Caracterización del macizo rocoso

### ■ RMR - Rock Mass Rating (Bienawski)

- Se calcula el índice de calidad **RMR** a partir de seis parámetros:
  - Resistencia de la roca intacta (0-15 puntos)
  - R.Q.D. Rock Quality Designation (3-20 puntos)
  - Espaciado de las discontinuidades (5-20 puntos)
  - Condición de las discontinuidades (0-30 puntos)
  - Condiciones hidrológicas (0-15 puntos)
  - Ajuste por orientación de las juntas ((-60) – (0) puntos)
  
- Los resultados obtenidos son:
  - El valor del RMR,
  - Clase y descripción del macizo rocoso y
  - Guía para la excavación y sostenimiento de túneles dependiendo del RMR

RMR	<20	21-40	41-60	61-80	81-100
Calidad	Muy mala	Mala	Regular	Buena	Muy buena

## Caracterización del macizo rocoso

**TABLA 2.1. RECOMENDACIONES INDICATIVAS PARA LA EXCAVACIÓN Y EL SOSTENIMIENTO DE TÚNELES EXCAVADOS EN ROCA (BIENIAWSKI, 1989)**

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	50-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 5 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ligeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galerías múltiples. (0.5-1.5 en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con forro y longarinas donde sea necesario. Contrabóveda

## Caracterización del macizo rocoso

### ■ **Parámetro Q** (Barton)

- Se catalogan los macizos rocosos según el denominado índice de calidad Q, basado en los seis parámetros siguientes:
  - Rock Quality Designation (RQD)
  - Numero de familias de juntas ( $J_n$ )
  - Rugosidad de las juntas ( $J_r$ )
  - Meteorización de las juntas ( $J_a$ )
  - Presencia de agua ( $J_w$ )
  - Stress Reduction Factor (SRF)
- Mediante los parámetros indicados, se define la calidad del macizo rocoso mediante la formula:

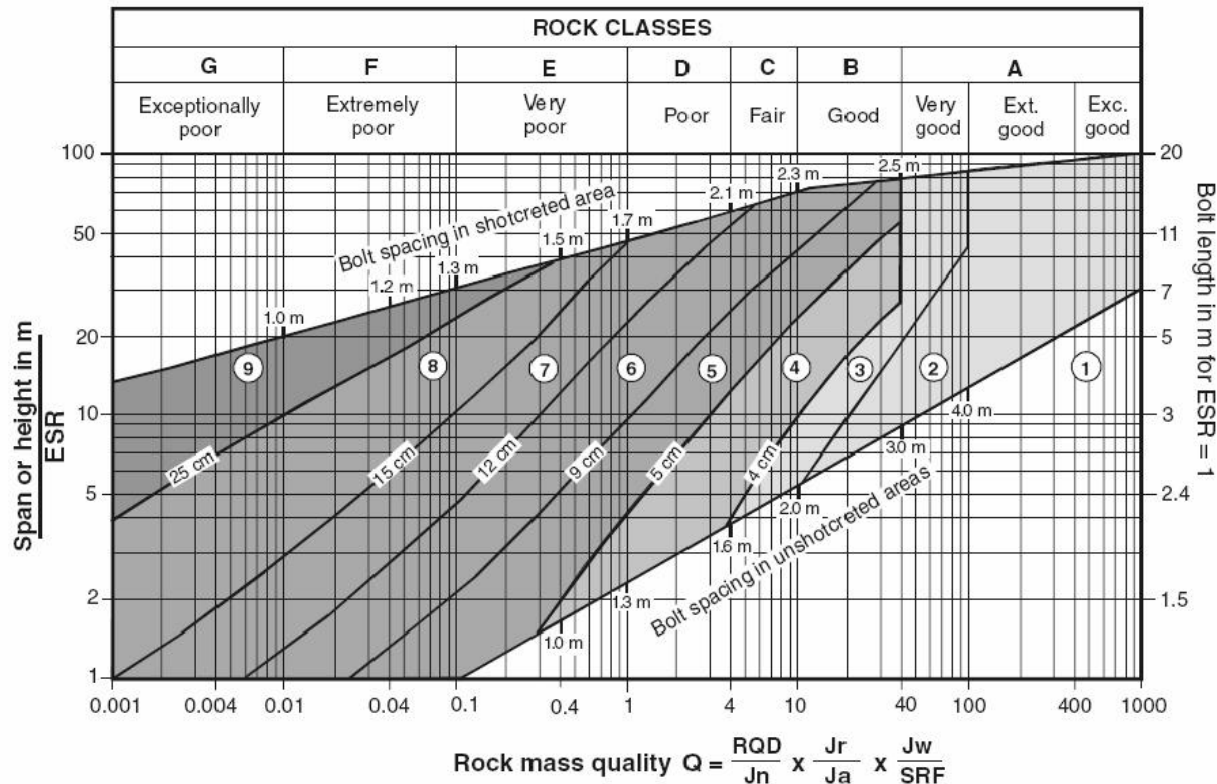
$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

## Caracterización del macizo rocoso

### ■ Parámetro Q (Barton)

Q	Clasificación
0,001-0,01	Excepcionalmente mala
0,01-0,1	Extremadamente mala
0,1-1	Muy mala
1-4	Mala
4-10	Media
10-40	Buena
40-100	Muy buena
100-400	Extremadamente buena
400-1000	Excepcionalmente buena

## Caracterización del macizo rocoso



### REINFORCEMENT CATEGORIES:

- |  |  |
|--|--|
| <p>1) Unsupported</p> <p>2) Spot bolting</p> <p>3) Systematic bolting</p> <p>4) Systematic bolting, (and unreinforced shotcrete, 4 - 10 cm)</p> <p>5) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 5 - 9 cm</p> | <p>6) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 9 - 12 cm</p> <p>7) Fibre reinforced shotcrete and bolting, 12 - 15 cm</p> <p>8) Fibre reinforced shotcrete, &gt; 15 cm, reinforced ribs of shotcrete and bolting</p> <p>9) Cast concrete lining</p> |
|--|--|



**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid

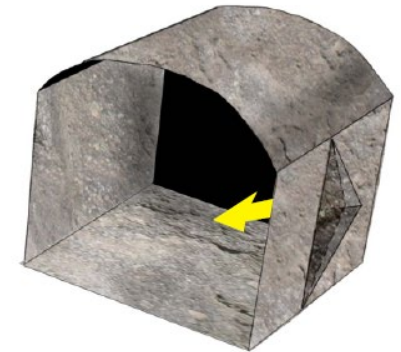
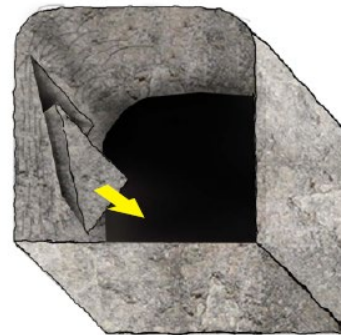
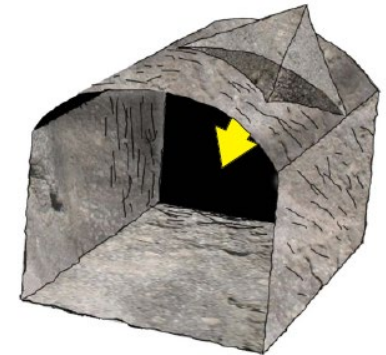
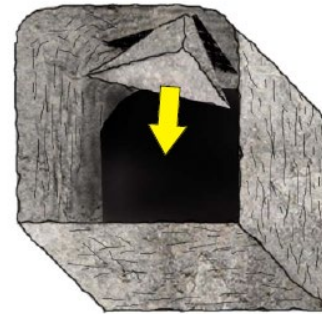


# ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO

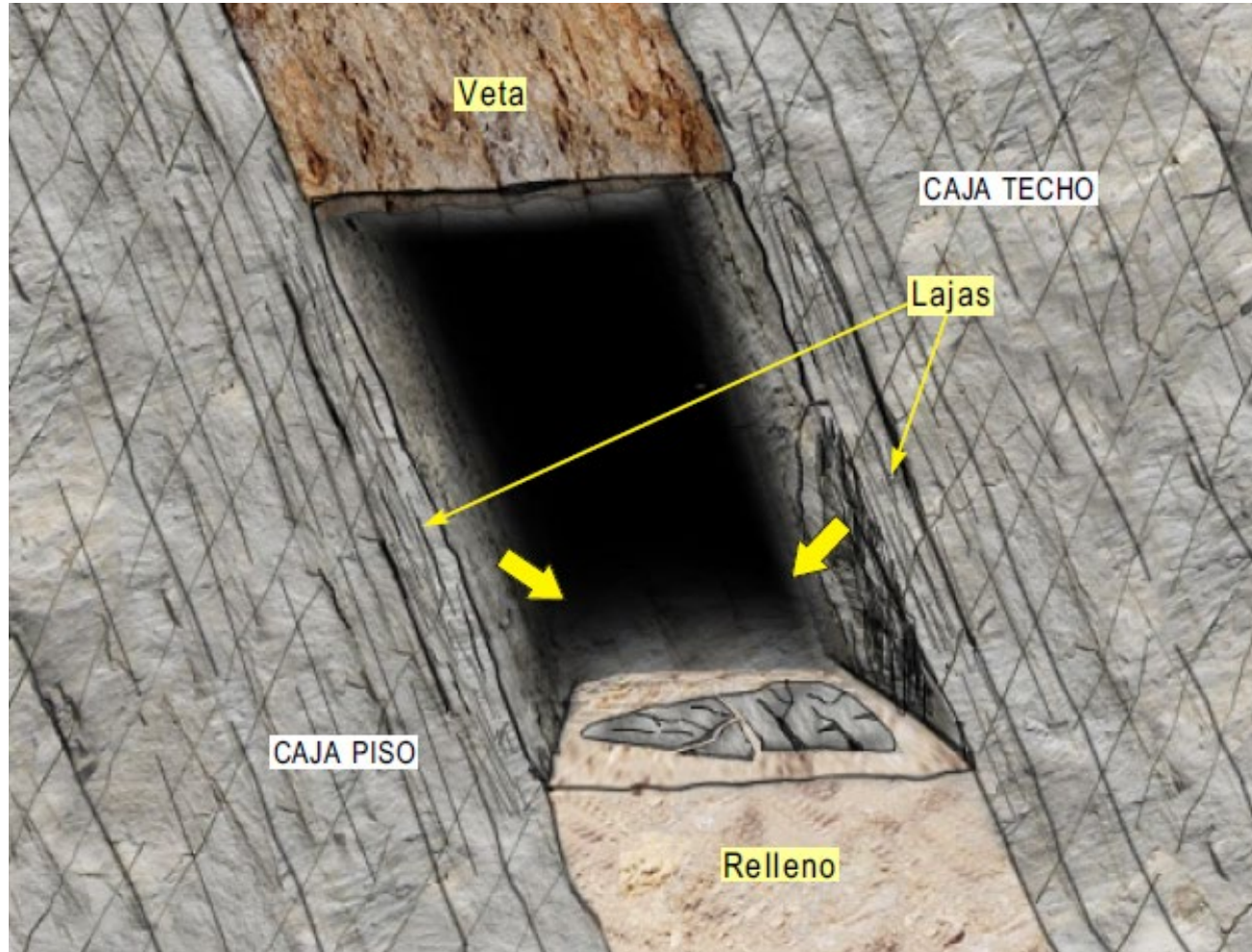
## Estructura del macizo rocoso



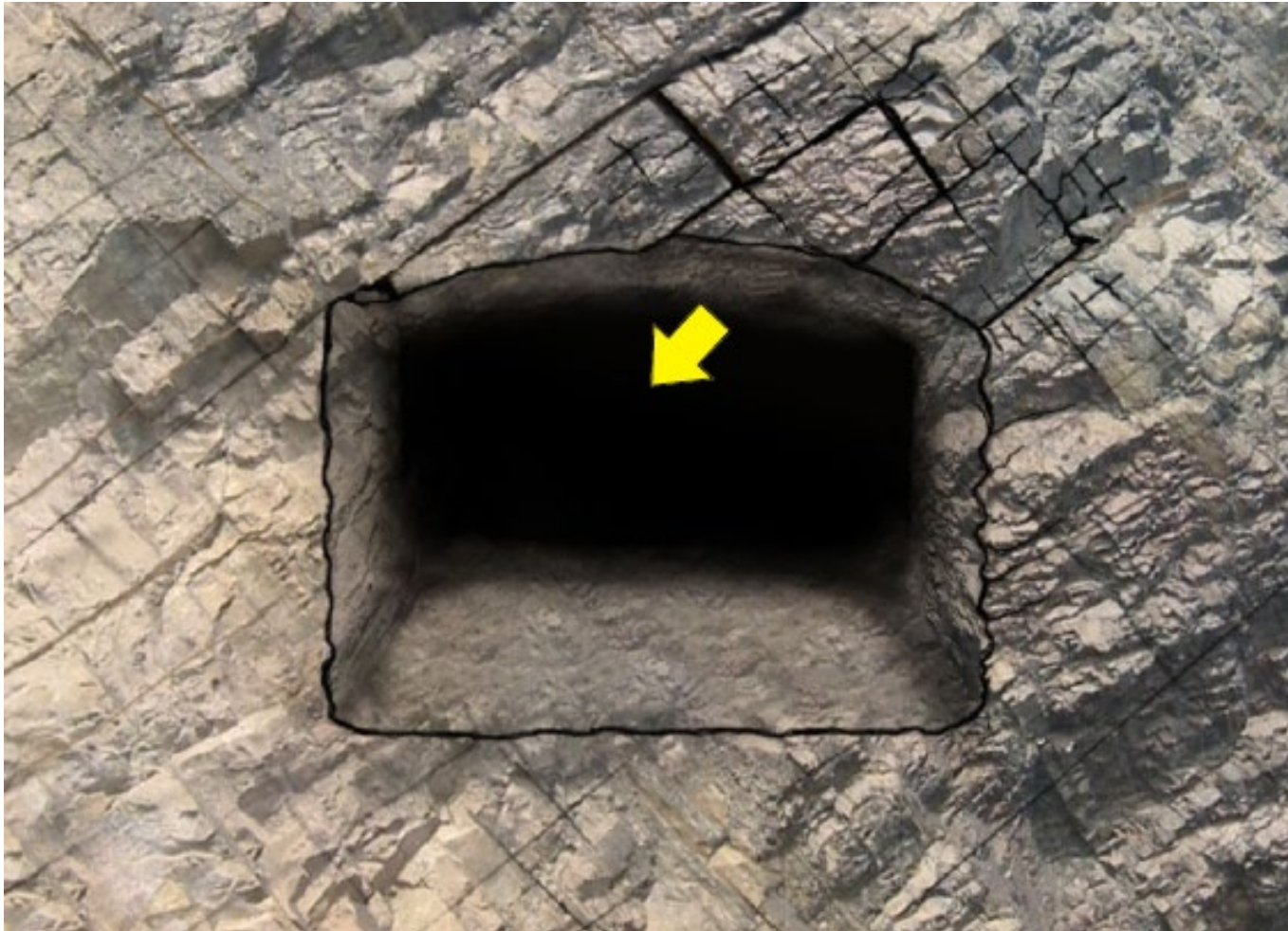
## Estructura del macizo rocoso



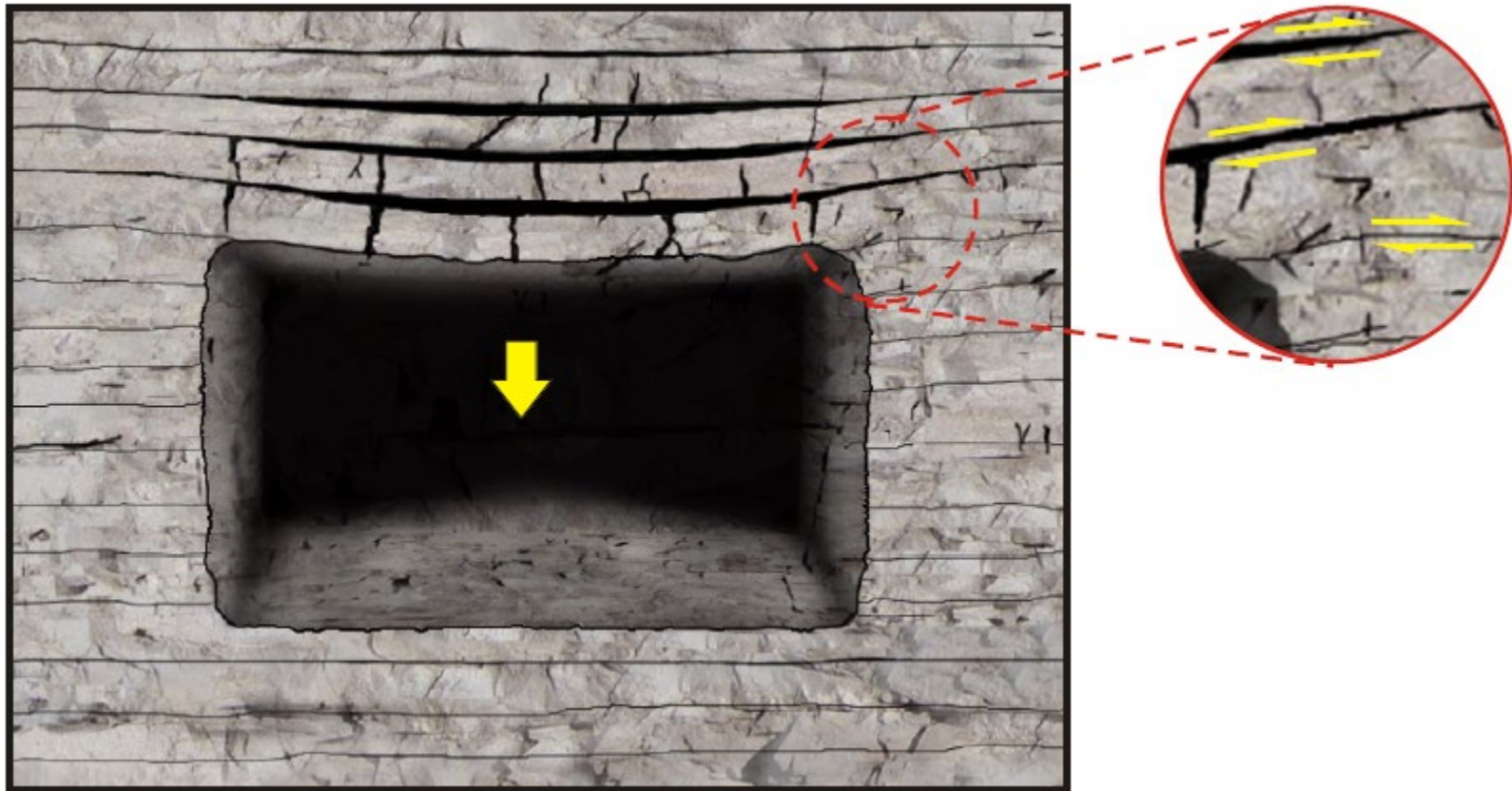
## Estructura del macizo rocoso



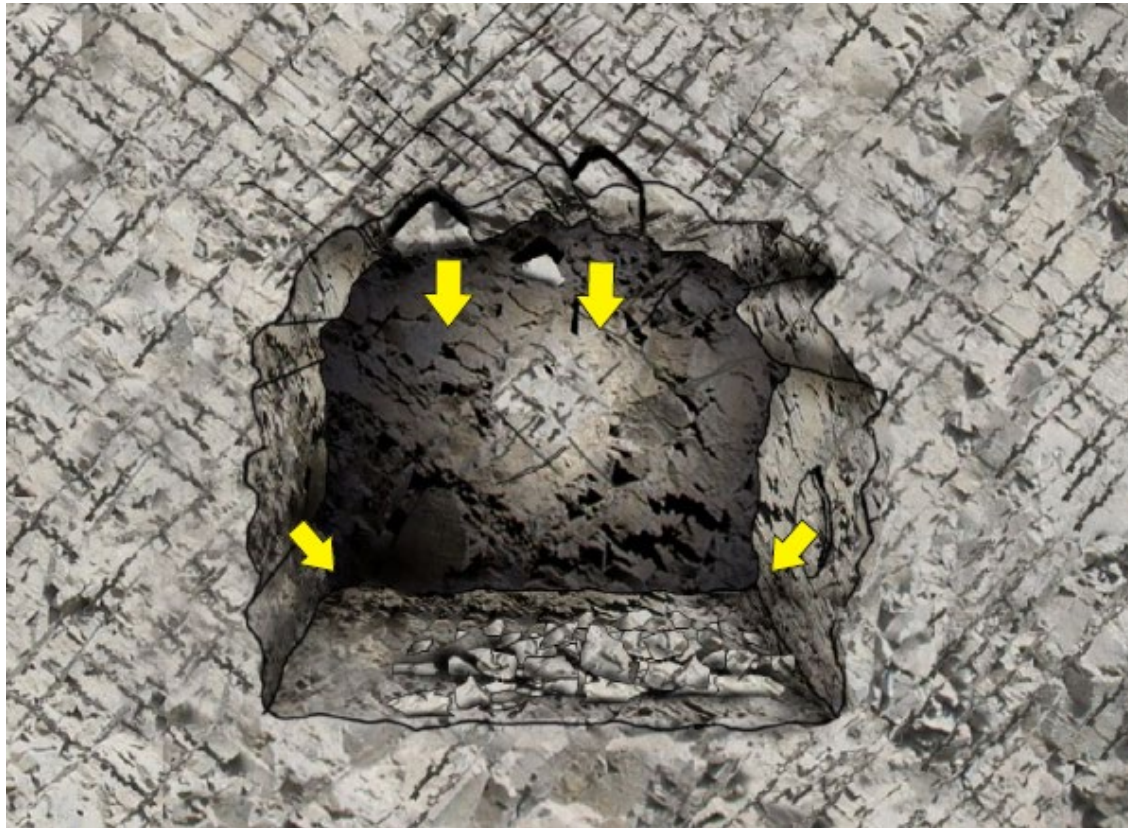
## Estructura del macizo rocoso



## ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO



## ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO





**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid

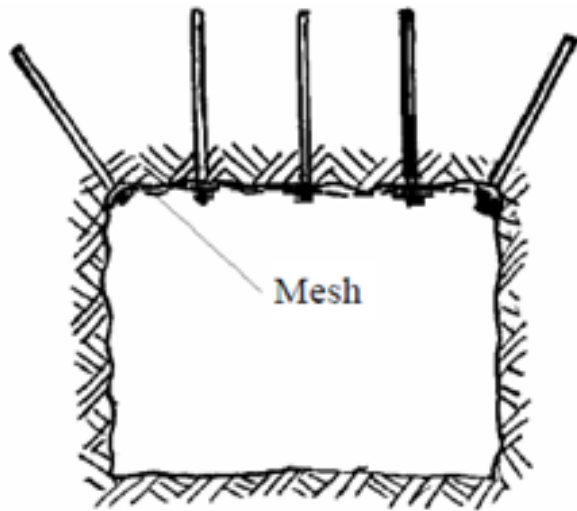


# BULONES Y ANCLAJES

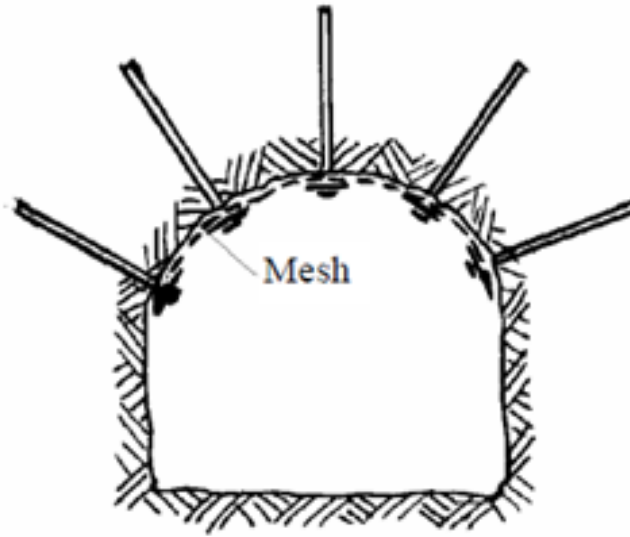
## BULONES Y ANCLAJES

### ■ FUNDAMENTO:

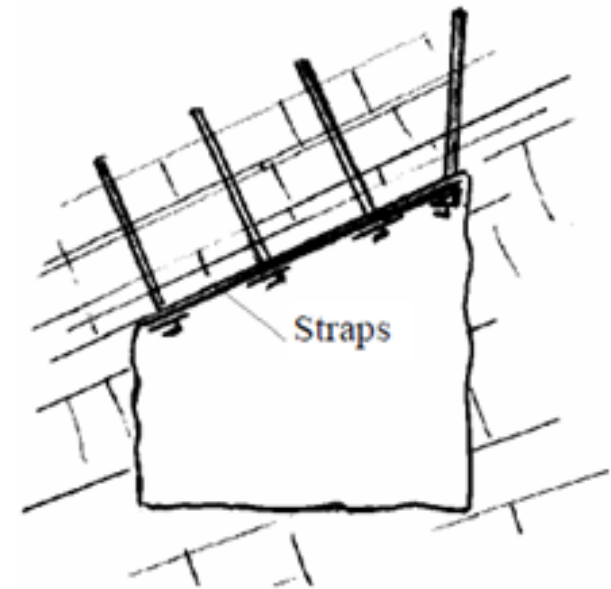
- Suspender un nivel rocoso poco competente de otro más resistente.
- Consolidar terrenos descomprimidos.



a) Conventional rectangular excavation



b) Arched roof excavation

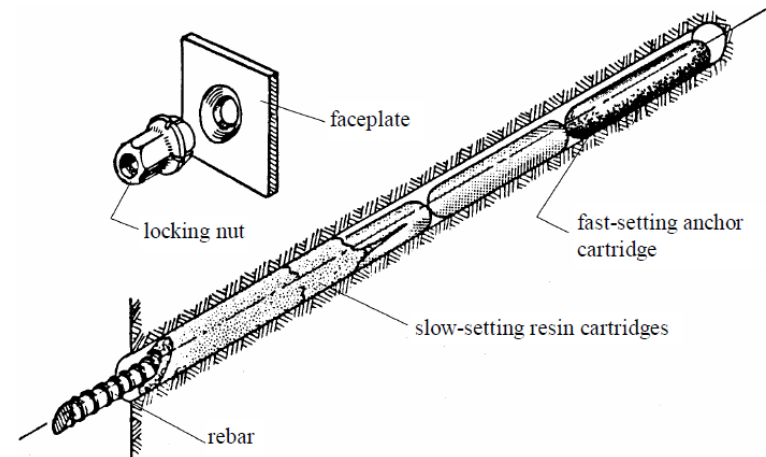
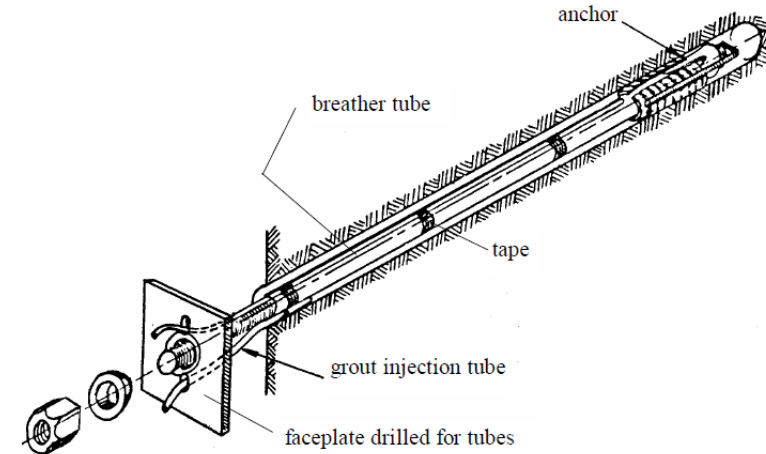


c) Shanty back excavation in bedded rock

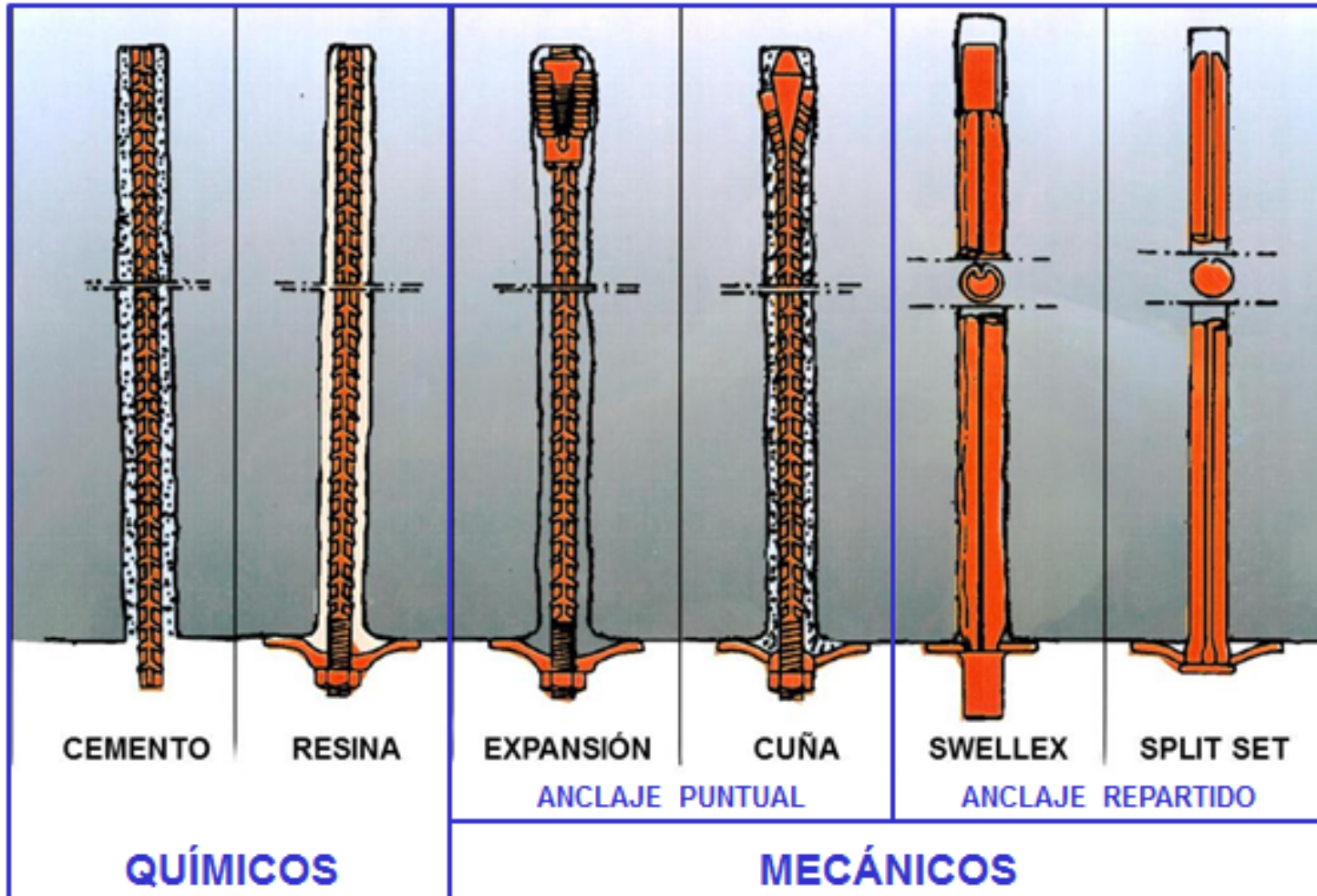
## Bulones y anclajes

### TIPOS DE BULONES

- **Mecánicos** (pueden ser recubiertos)
  - De anclaje puntual
    - de expansión
    - de cuña
  - De fricción (de anclaje repartido)
- **De adherencia** (Químicos)
  - Cemento
  - Resina
- **Especiales**
  - Bulones CT: Recubiertos por una lámina de polietileno



## Bulones y anclajes

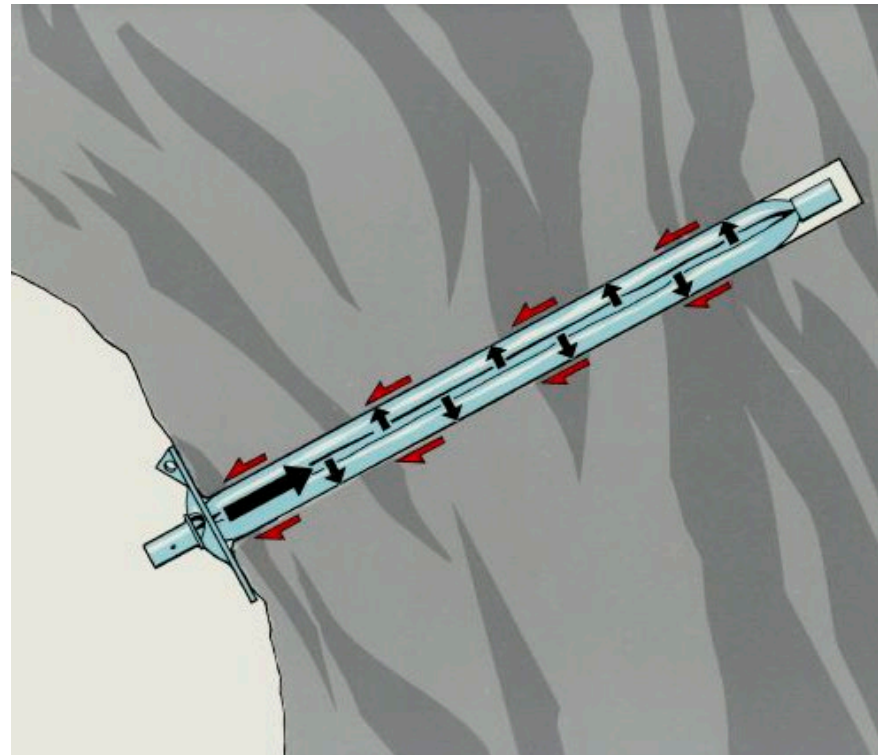
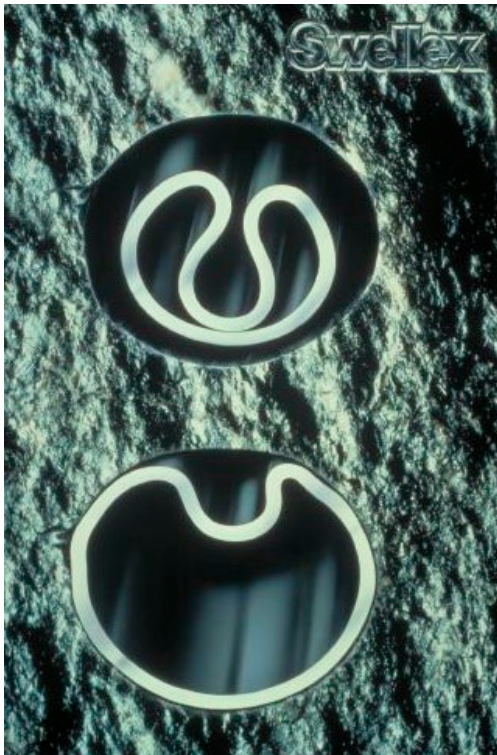


## Bulones y anclajes

- MECÁNICOS:
  - **De anclaje puntual:** Activos (se tensan a una carga de 5-15 t que la placa transmite a la roca)
    - **Bulones de expansión o de cuña.**
      - (-) Sensibles al diámetro del taladro y la calidad de la roca.
  - **De anclaje repartido:** Pasivos (sólo entran en carga cuando la roca se deforma)
    - Placa sólo para sujetar el mallazo.
    - Utilizan la capacidad autoportante de la roca.
  - **Bulones tipo Split-Set (I.R.)**
    - (-) Sensibles al diámetro de taladro y calidad de la roca.
  - **Bulones tipo Swellex (A.C.)**
    - Tubo que se expande al inyectar agua a presión.

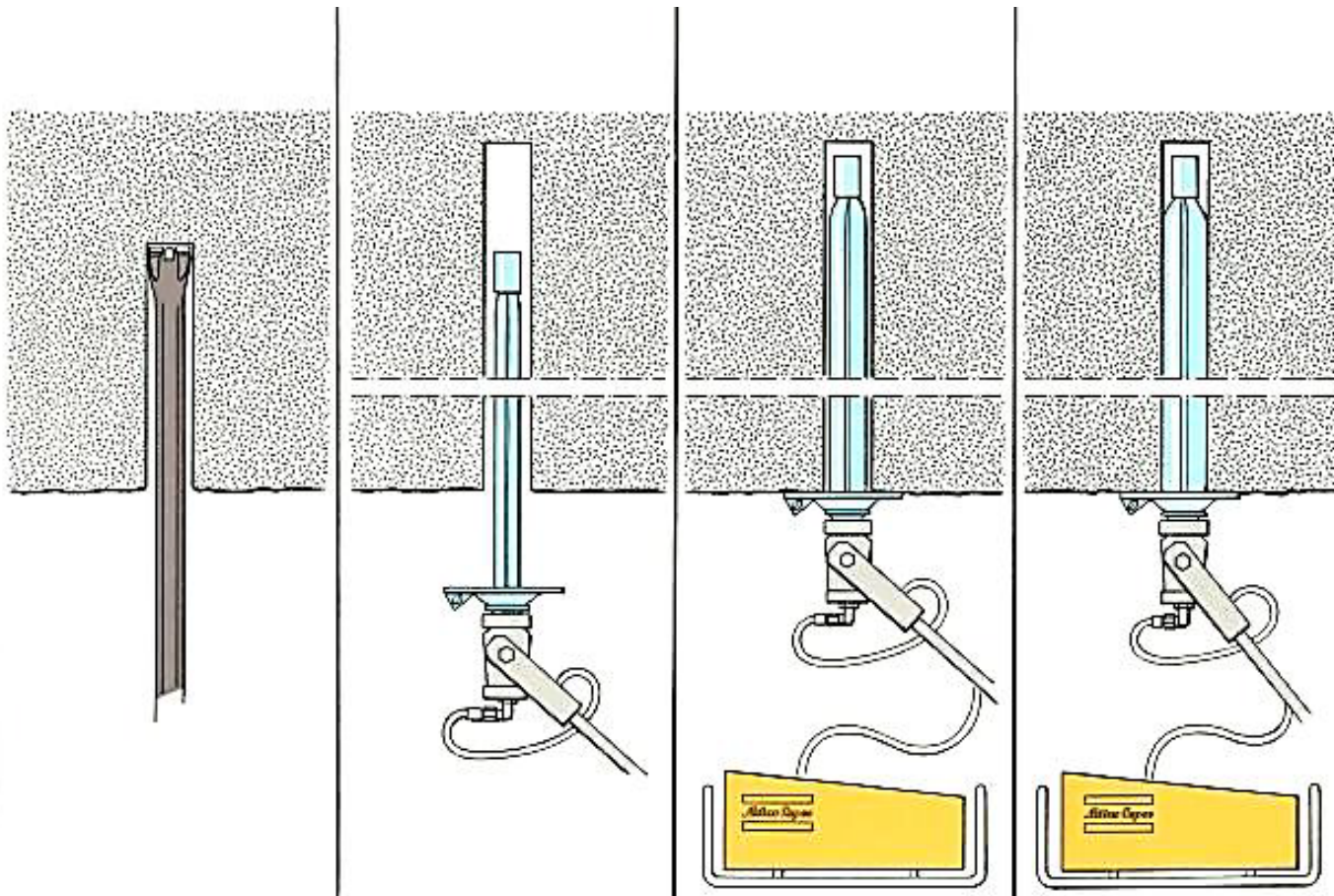
## Bulones y anclajes

- MECÁNICOS
  - Bulones tipo Swellex



## Bulones y anclajes

- MECÁNICOS: Instalación bulones tipo Swellex



## Bulones y anclajes

DE ADHERENCIA (QUÍMICOS): Activos o pasivos.

- **Bulones de barra de acero corrugado** (20-32mm diámetro)
  - **De resina:** Resina de poliéster en cartuchos.
  - **De cemento:** Cemento inyectado o en cartuchos.
- **Bulones de fibra de vidrio:**
  - Excavación mecánica posterior.
- **Autoperforantes**
  - Boca de perforación integrada
  - Aptos cuando la estabilidad del taladro no es buena
  - Se rellenan de lechada de cemento
- **Anclajes de cable**
  - Gálibo de túnel / galería insuficiente.
  - Cable de acero e inyección de cemento.

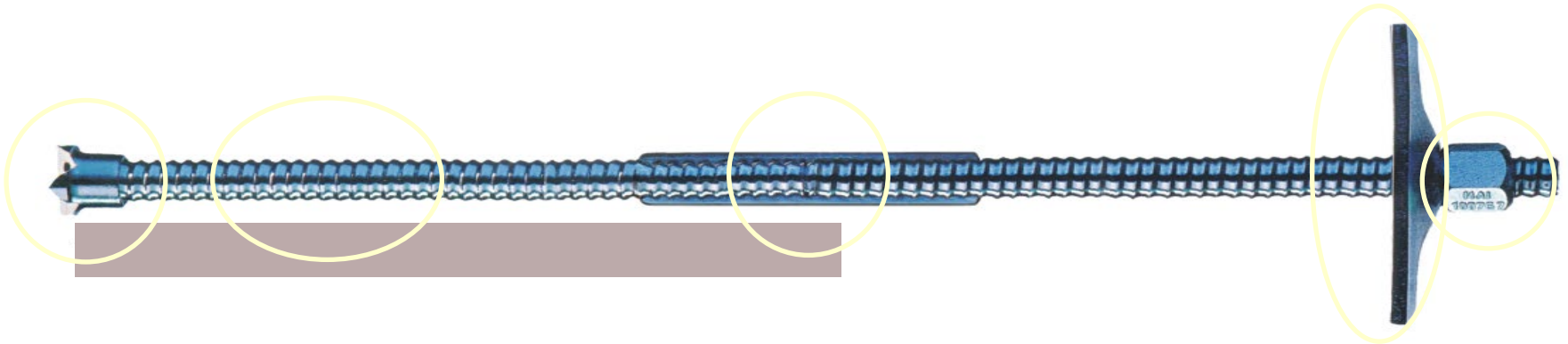
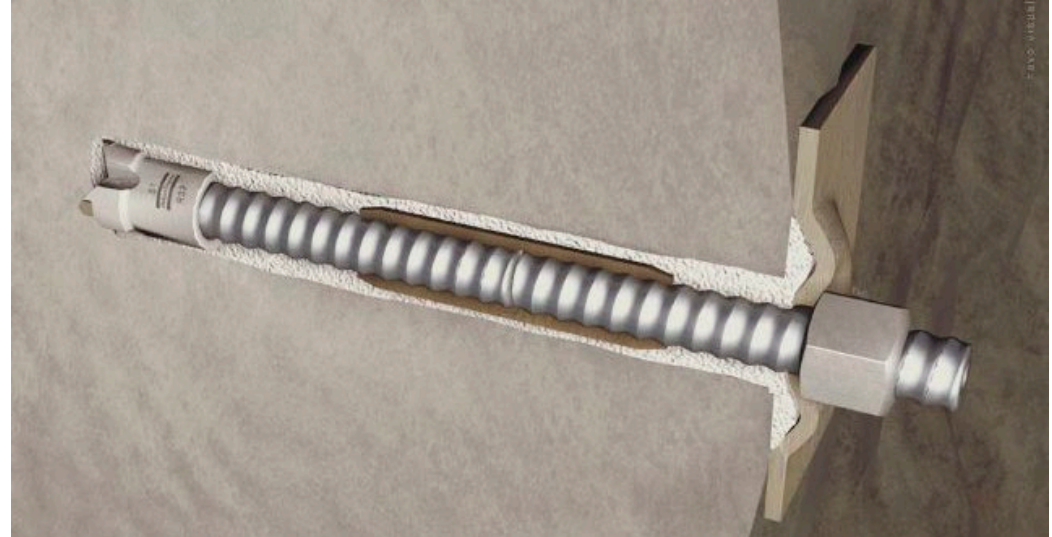
## Bulones y anclajes

<b>Tipo de bulón</b>	<b>Duración</b>	<b>Coste relativo</b>	<b>Comentarios</b>
<i>Recubiertos cemento</i>	<i>Permanente</i>	1	<i>Bajo coste, Soporte no inmediato</i>
<i>Recubiertos resina</i>	<i>Permanente (si en toda su longitud)</i>	2	<i>Razonable coste, Soporte inmediato</i>
<i>Expansión</i>	<i>Temporal / Permanente si recubierto</i>	1.5	<i>Soporte inmediato</i>
<i>Cuña</i>	<i>Temporal / Permanente si recubierto</i>	1.25	<i>Rápida instalación, soporte inmediato, bajo coste.</i>
<i>Swellex</i>	<i>Temporal</i>	3	<i>Rápida instalación, soporte inmediato</i>
<i>Split-set</i>	<i>Temporal</i>	1	<i>Rápida instalación, soporte inmediato</i>
<i>CT</i>	<i>Permanente</i>	4	<i>Buenas propiedades, caro</i>

### ■ FORMAS DE INSTALACIÓN:

- Perforación e instalación manual
- Perforación con jumbo e instalación manual
- Perforación e instalación mecanizadas con bulonadora

## Bulones y anclajes



## Bulones y anclajes

### Forma de Instalación



MANUAL



MECANIZADA CON BULONADORA

## BULONES Y ANCLAJES

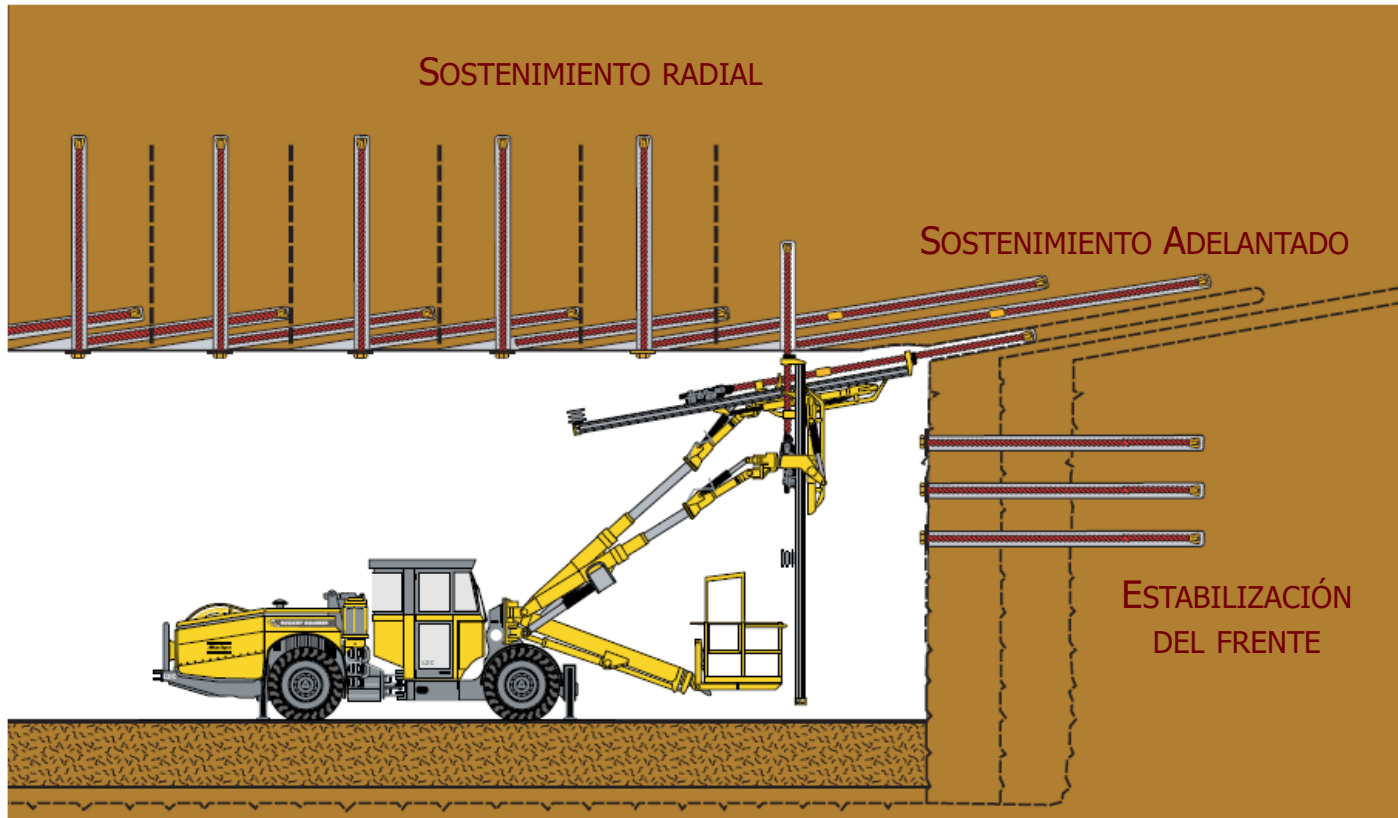
- Forma de Instalación



PERFORACIÓN CON JUMBO E INSTALACIÓN MANUAL

# BULONES Y ANCLAJES

## Forma de Instalación



## APLICACIONES DEL SOSTENIMIENTO MEDIANTE BULONES

## BULONES Y ANCLAJES



BULONADO SISTEMÁTICO CON MALLA METÁLICA

## BULONES Y ANCLAJES

- Bulones Swellex "hinchados"



## BULONES Y ANCLAJES

### ANCLAJES DE CABLE

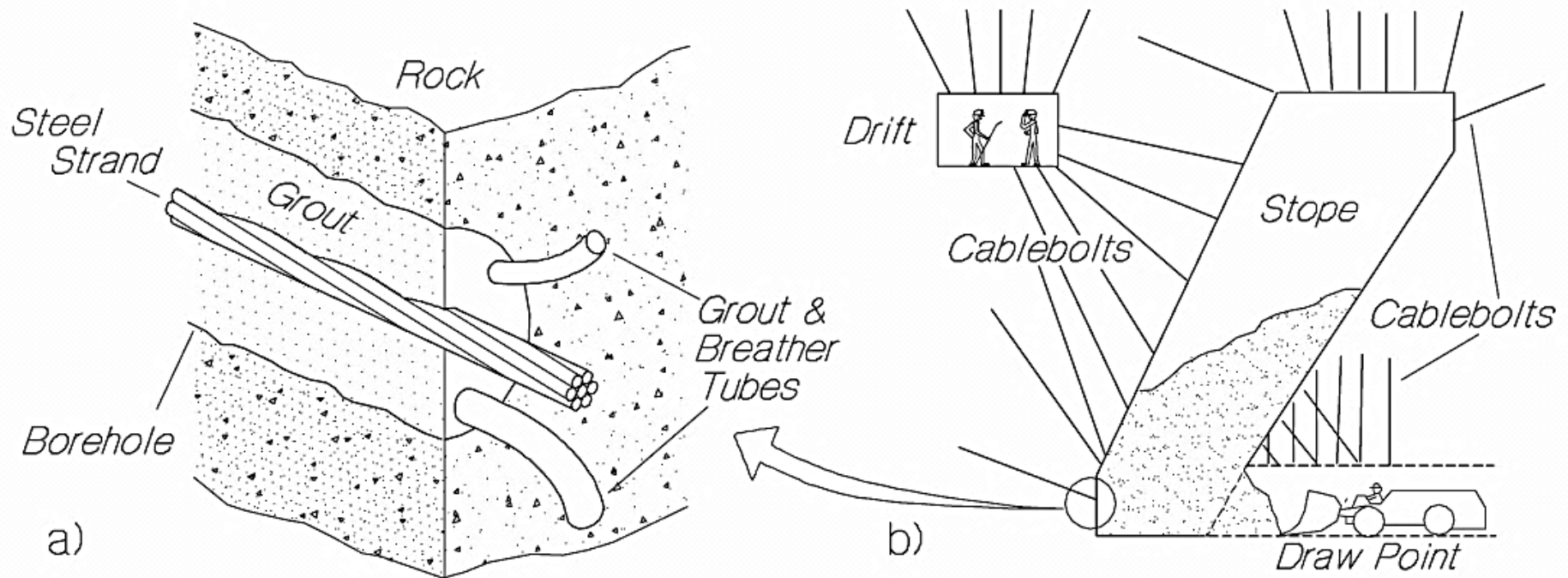
#### ■ Aplicaciones:

- Unión y fijación de grandes masas de roca
- Antes o después de la excavación para:
  - Prevenir hundimientos
  - Reforzar techo o pilares
  - Reforzar pozos tolva y áreas de producción
  - Anclajes largos en túneles de reducido gálibo
- Lechada de cemento: Relación a/c: 0,3-0,5
- Tipo de cable:
  - Acero de 15'2 mm
  - 25 t de resistencia a tracción
  - Dos cables por taladro de 51mm  $\Phi$



## BULONES Y ANCLAJES

### ANCLAJES DE CABLE





**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



# CERCHAS



**POLITÉCNICA**  
"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



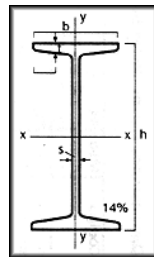
Universidad Politécnica de Madrid



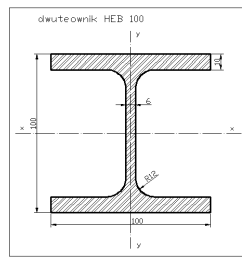


## CERCHAS

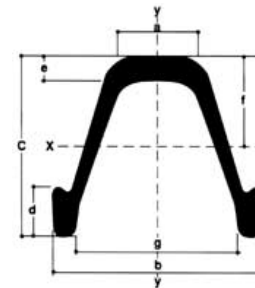
- Arcos de acero estructural para sostenimiento de excavaciones
- Aplicación en sostenimientos de galerías en condiciones severas
- Tipo de entibación (sostenimiento):
  - Rígida: Unión remachada o atornillada
    - Perfiles tipo: HEB, IPN
    - Pierden capacidad portante ante movimientos del terreno
  - Deslizante: Unión mediante grapas
    - Perfil tipo: TH
    - Se adaptan a los movimientos del terreno sin perder capacidad portante



IPN



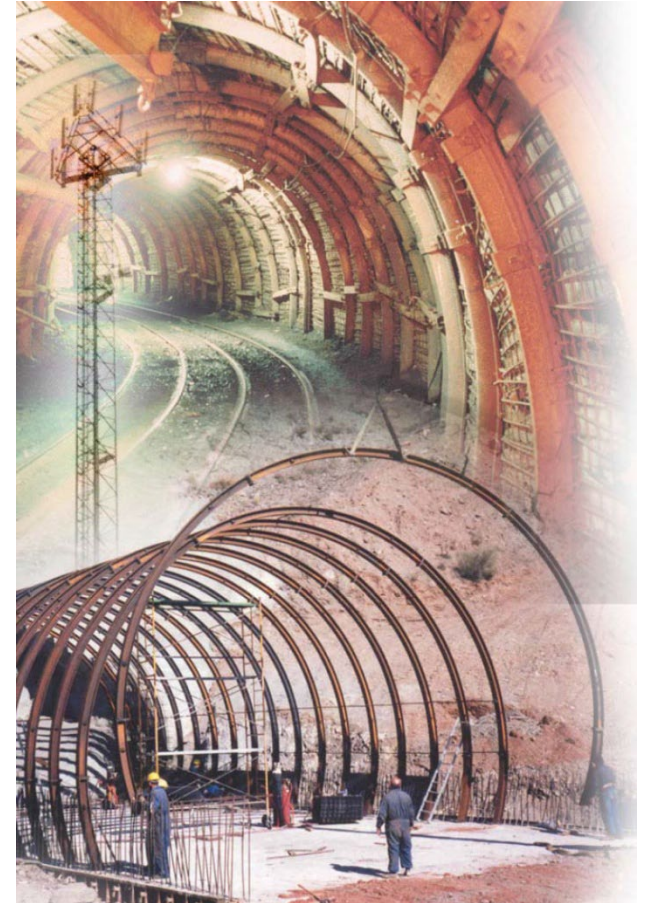
HEB



TH

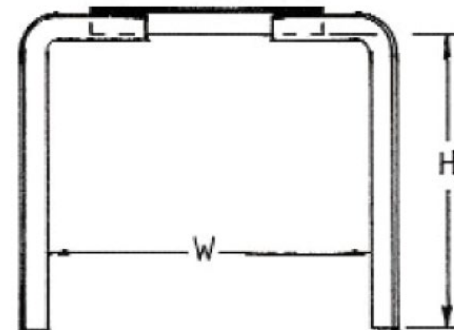
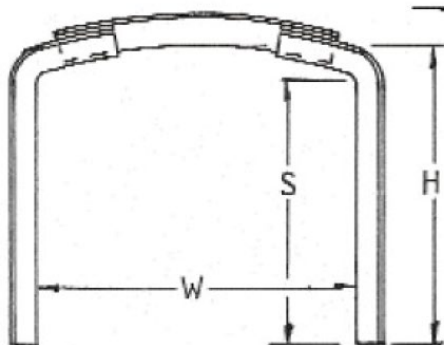
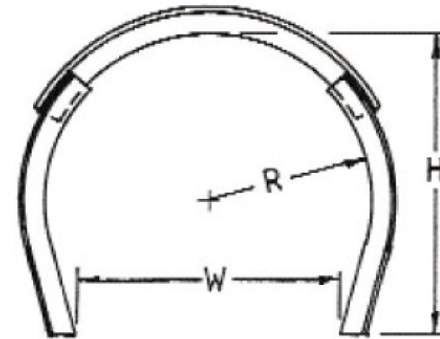
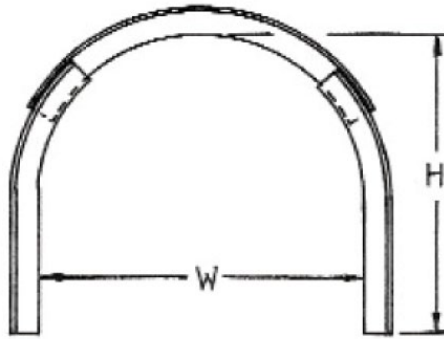
## CERCHAS

### CERCHAS Y CUADROS DE MINA

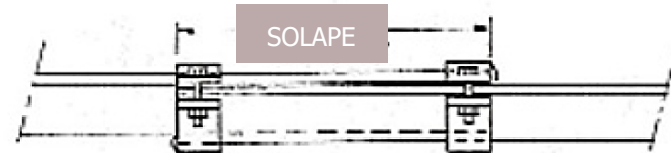
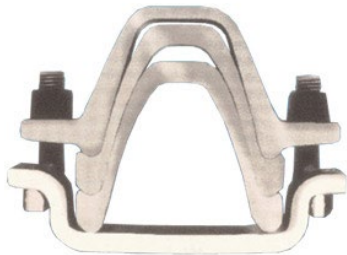


## CERCHAS

- Tipos de sección (Ejemplos)



# CERCHAS





**POLITÉCNICA**

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



# HORMIGÓN PROYECTADO

## HORMIGÓN PROYECTADO

- El hormigón proyectado es el método de sostenimiento que consiste en la aplicación a distancia de una capa de mortero por medio de equipos de bombeo, de modo que se cree un recubrimiento continuo, una vez fraguado, en el contorno de la excavación.
  - Se conoce también como "*gunita*" (nombre comercial), o bien, "*shotcrete*" o "*sprayed concrete*", en inglés.
  - Sostenimiento temporal y/o a largo plazo (a veces previo a otro mayor)
  - Elimina los efectos de la meteorización y las filtraciones de agua (con tubos de drenaje)
  - A menudo utilizado en combinación con bulonaje y mallazo.
  - Se emplea en todo tipo de excavaciones.
- 
- Hormigón proyectado: Arido:  $10\text{mm} < \Phi < 25\text{mm}$ . ( $R_c=40-55\text{MPa}$ )
  - Gunitado: Arido:  $\Phi < 5\text{mm}$  → Sellado

# HORMIGÓN PROYECTADO

## Tipos de aplicación

### Vía Seca

- Se mezclan en seco cemento y acelerantes de fraguado y se impulsa esta mezcla mediante aire comprimido.
- El agua se añade en la boquilla a través de una válvula de regulación.
- Método generalmente manual, barato y para equipos pequeños.
- Capacidad práctica: 2-10 m<sup>3</sup>/h de hormigón proyectado.

### Vía Húmeda

- Se bombean él árido, el cemento, los aditivos y el agua, mezclados previamente, hasta la boquilla y allí se impulsan mediante aire comprimido.
- Para equipos mecanizados.
- Capacidad práctica 10-25 m<sup>3</sup>/h.



# HORMIGÓN PROYECTADO

<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>Cemento</b>	20-25%
	<b>Árido grueso</b>	30-40% Vía Seca: 4-12 mm $\Phi$ - Vía Húmeda: 2-8 mm $\Phi$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayor compactación, densidad y resistencia</li> <li>- Menor retracción.</li> <li>- Aplicación más difícil <math>\rightarrow</math> Mayor rechazo.</li> </ul>
	<b>Árido fino</b>	40-50% Vía Seca: <4mm $\Phi$ - Vía Húmeda: <2 mm $\Phi$
	<b>Acelerante</b>	1-2 % <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fraguado rápido <math>\rightarrow</math> Sostenimiento inmediato</li> <li>- Menor rechazo. Menos polvo.</li> <li>- Menor resistencia final.</li> </ul>
	<b>Agua</b>	Relación agua/cemento: Vía Seca: 0,3-0,5 - Vía Húmeda: 0,4-0,6
	<b>Fibras:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Acero</b></li> <li>- <b>Polímeros</b></li> </ul>	19-35mm (0'5mm $\Phi$ ) <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora de las características mecánicas.</li> <li>- Aumenta el desgaste de los equipos de proyección.</li> </ul>
	<b>Humo de Sílice</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejor adherencia en superficies húmedas.</li> <li>- Mayor resistencia final.</li> </ul>

# HORMIGÓN PROYECTADO

## Aplicación por vía seca

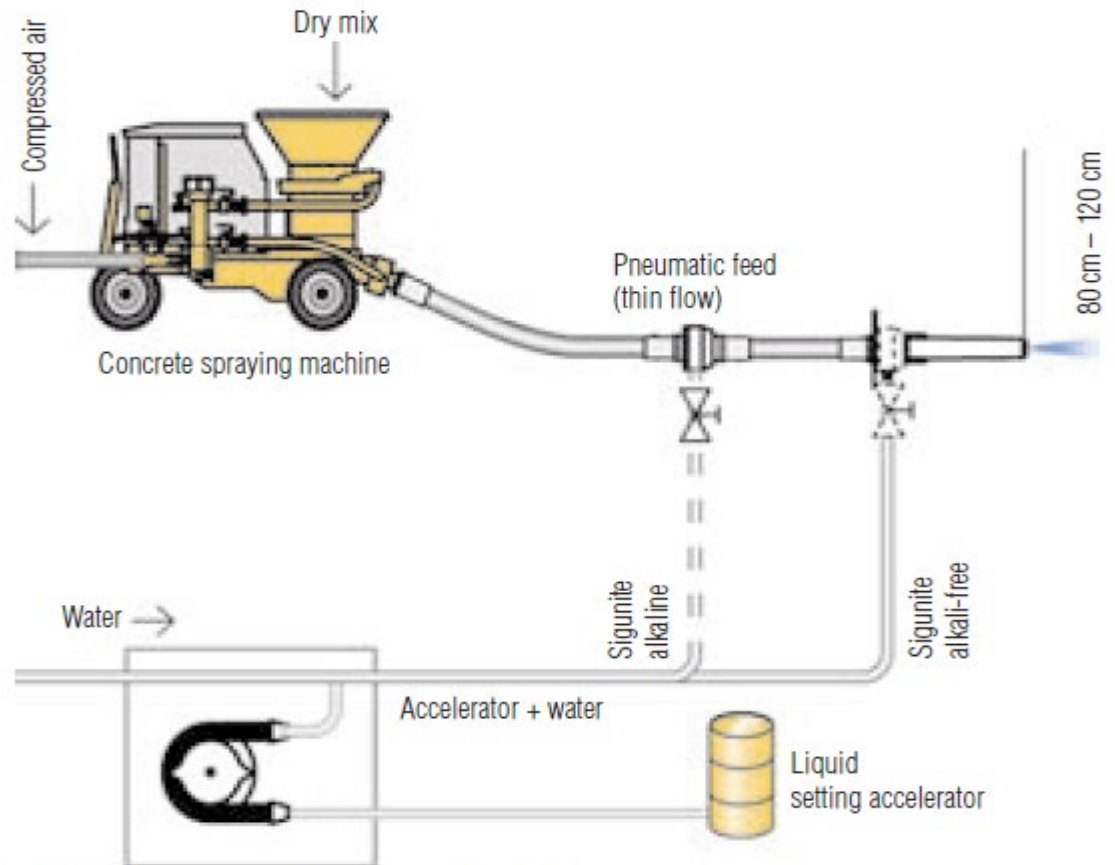


Fig. 51: thin-flow process for dry sprayed concrete

# HORMIGÓN PROYECTADO

## Aplicación por vía húmeda

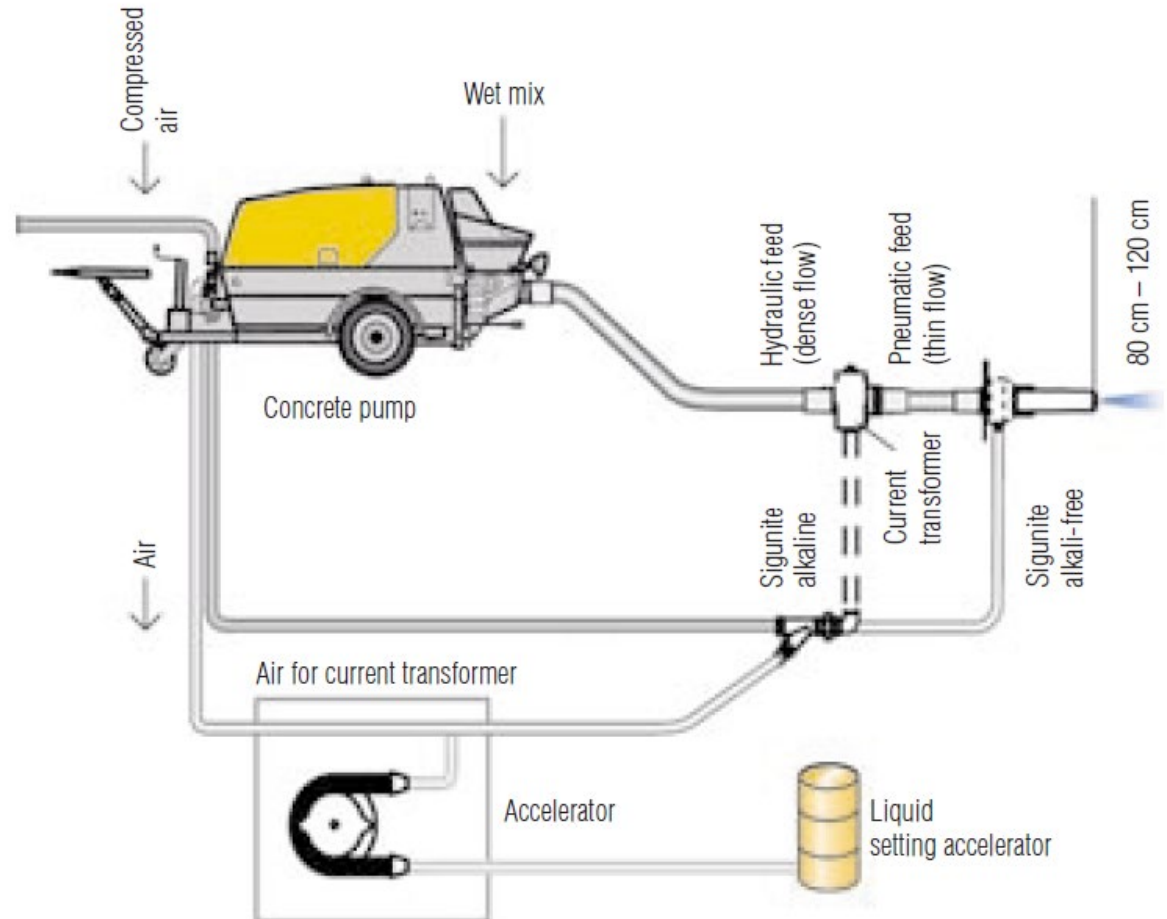


Fig. 39: dense-flow process for wet sprayed concrete

## HORMIGÓN PROYECTADO

- Tipos de aplicación

	VIA SECA	VIA HÚMEDA
<b>Formación de Polvo</b>	ALTO	BAJO
<b>Rechazo</b>	ALTO	BAJO
<b>Capacidad de salida</b>	ALTO	ALTO
<b>Coste Equipos</b>	BAJO	ALTO
	<b>Bajos volúmenes</b> ↓ <b>Sección pequeña</b>	<b>Altos volúmenes</b> ↓ <b>Sección grande</b>

## HORMIGÓN PROYECTADO





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



## HORMIGÓN PROYECTADO



## HORMIGÓN PROYECTADO





# ENTIBACIÓN HIDRÁULICA



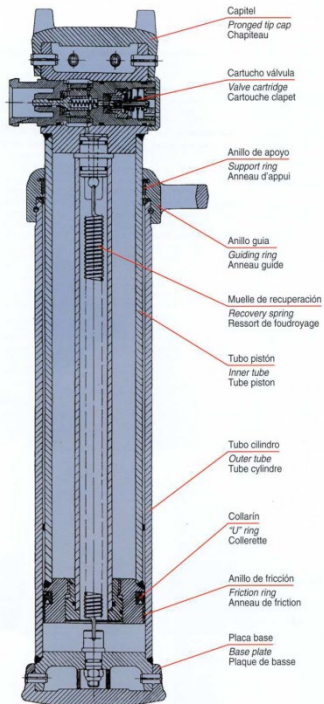
## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

La entibación mediante **pilas hidráulicas**:

- Es un tipo de sostenimiento mecanizado usado principalmente en labores de extracción de carbón mediante métodos de hundimiento.
- Consiste en el empleo de mecanismos hidráulicos para:
  - La sujeción del techo de la explotación y
  - Garantizar la seguridad de trabajadores y maquinaria.
- Según su función en el diseño y operación de la explotación:
  - Posibilita la colocación y retirada del sostenimiento de acuerdo al avance de la explotación.
  - Se integran con maquinaria de arranque y transporte como elementos del sistema minero de extracción.

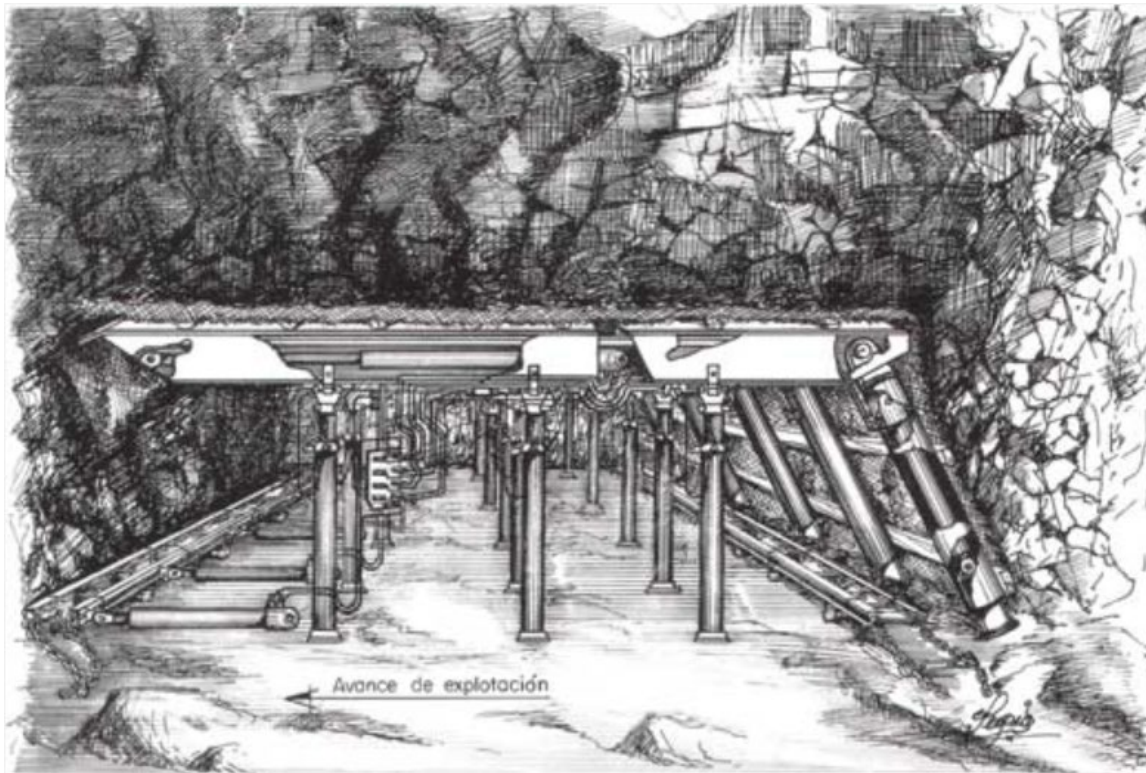
# ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

## ESTEMPLE HIDRÁULICO



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

### ESTEMPLE HIDRÁULICO



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

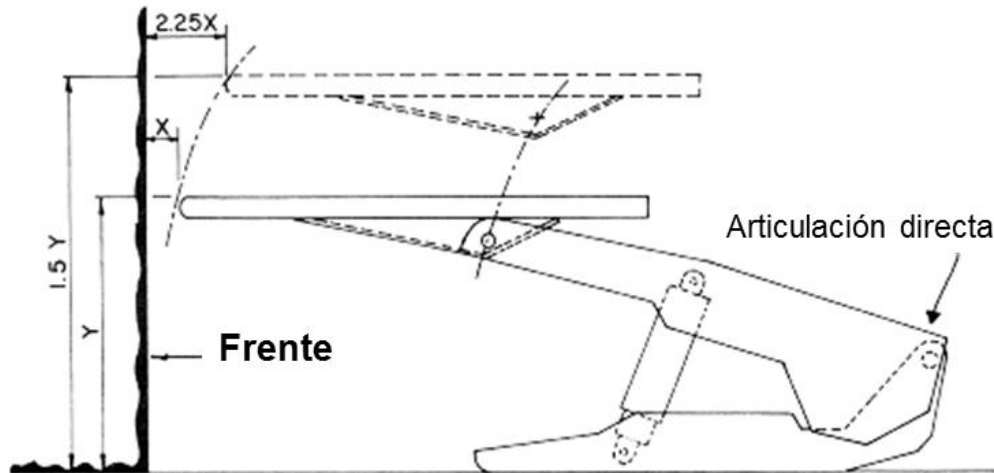
### TIPO DE PILAS ESCUDO



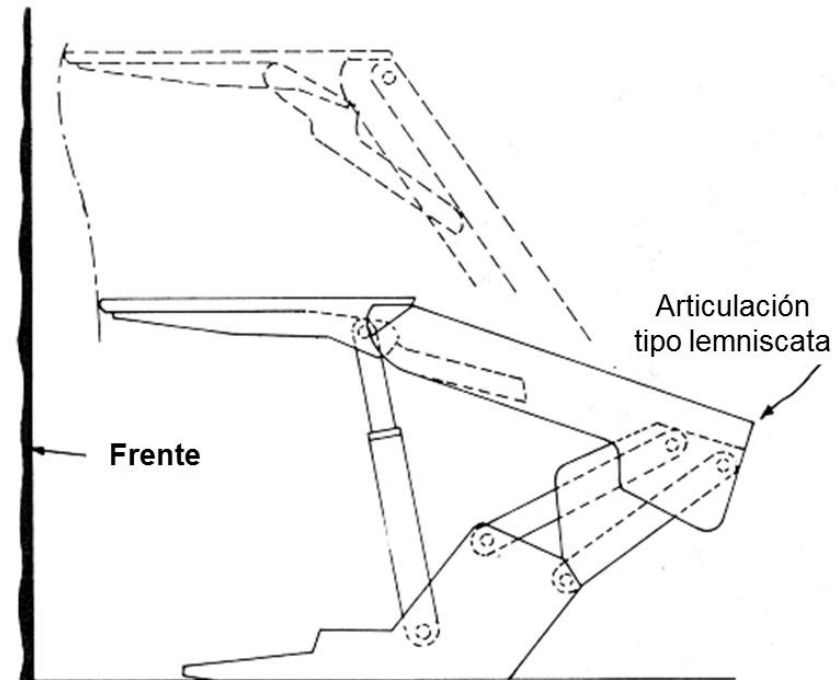
## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

### TIPO DE PILAS ESCUDO

- Articulación directa ↓



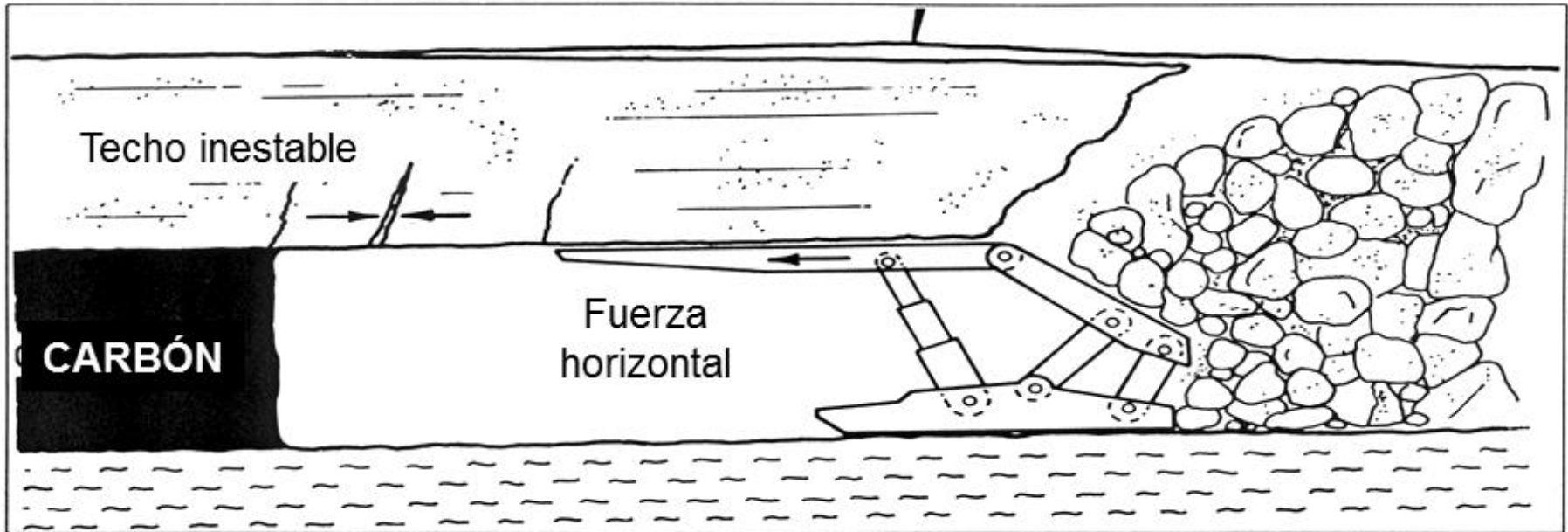
- Articulación tipo lemniscata →



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

### ESCUDO DE 2 CILINDROS

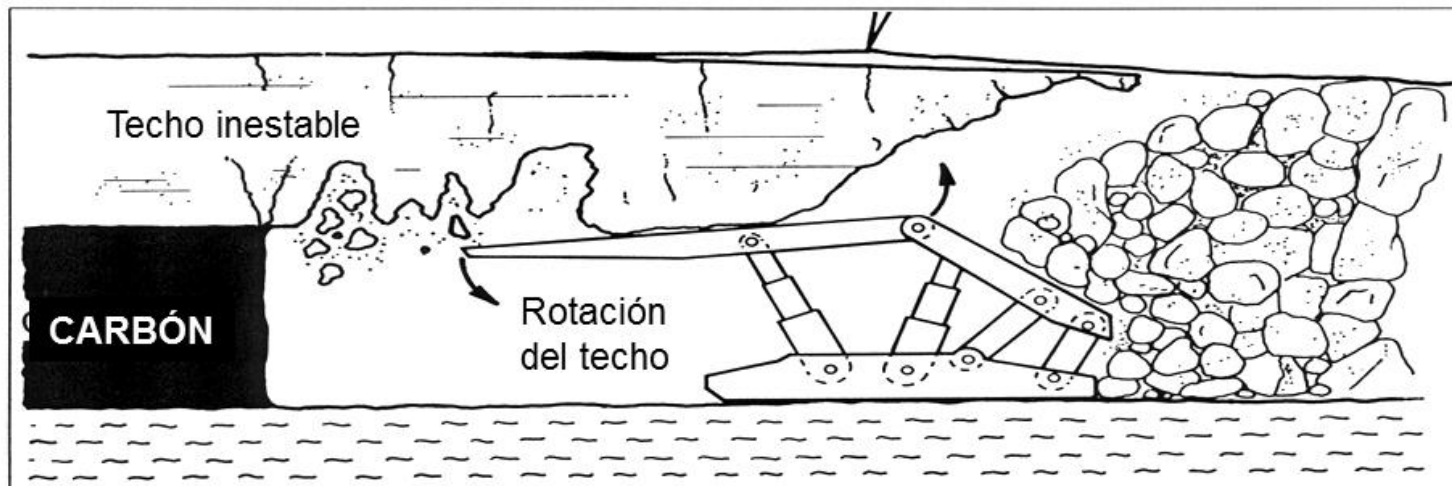
- Genera una fuerza horizontal que ayuda a la estabilidad del frente



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA

### ESCUDO DE 4 CILINDROS

- El efecto de sostenimiento por su parte posterior llega hasta una zona más alejada del frente → techos que hunden con dificultad y quedan en voladizo.
- Tendencia a girar si el techo es irregular → inestabilidad de la pila.
- Reparto más uniforme de la presión sobre techo y suelo → facilita el desplazamiento de la pila en suelos blandos.





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

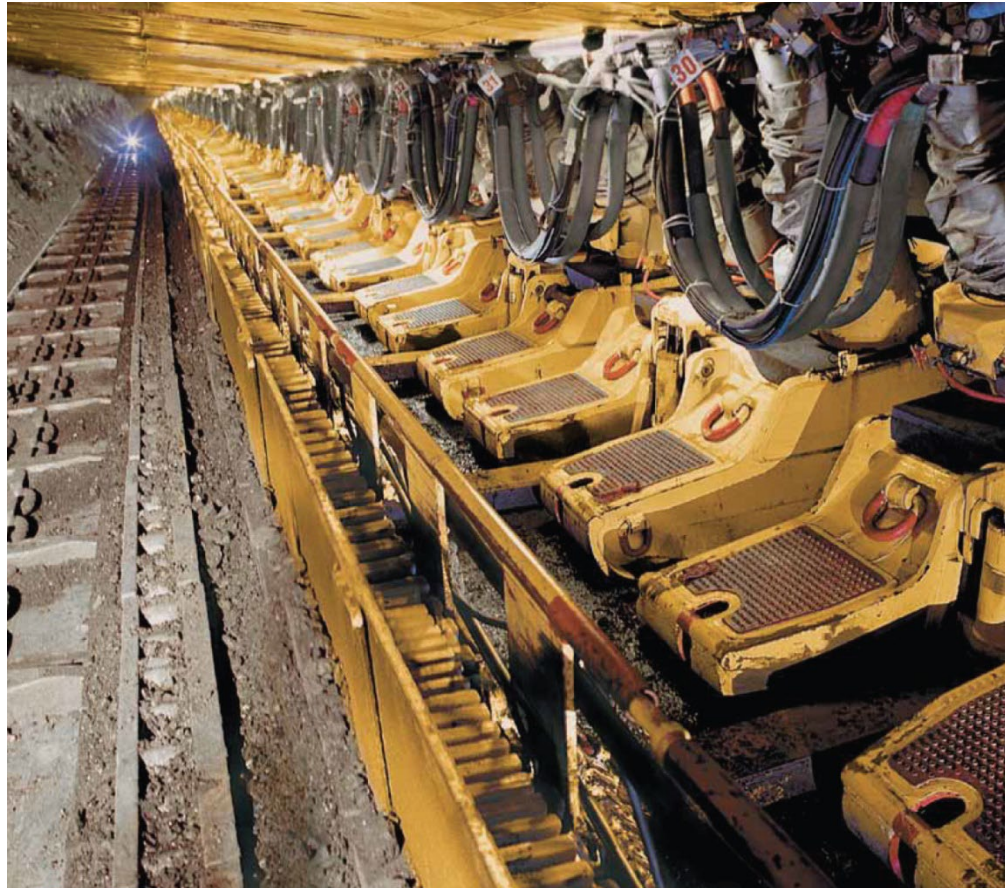
CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA





POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



## ENTIBACIÓN HIDRÁULICA







POLITÉCNICA

"Ingeniamos el futuro"

CAMPUS  
DE EXCELENCIA  
INTERNACIONAL



Universidad Politécnica de Madrid



## Dudas y preguntas

