AIN active
CONSULTORES TÉCNICOS

TÚNELES Y GEOMECÁNICA

Identificación de necesidades para diseño de túneles

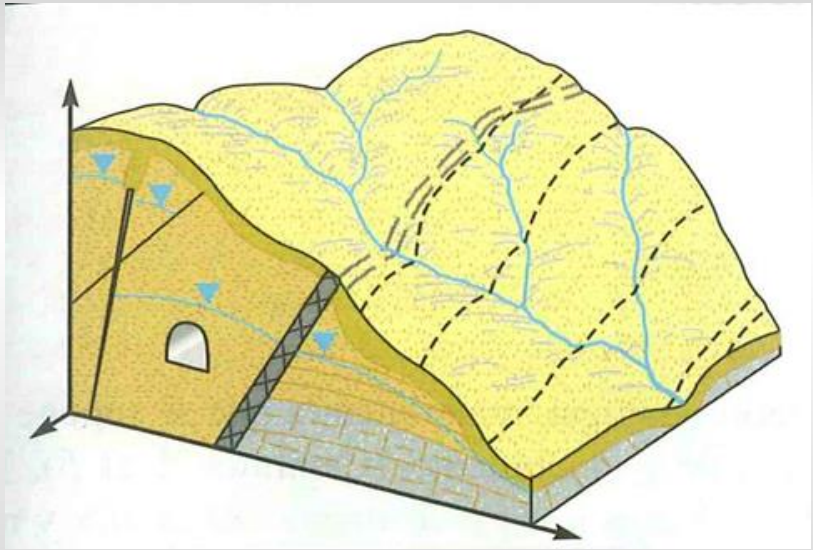
MANUEL ARLANDI RODRÍGUEZ

¿QUE ES NECESARIO PARA REALIZAR UN PROYECTO DE TÚNELES?

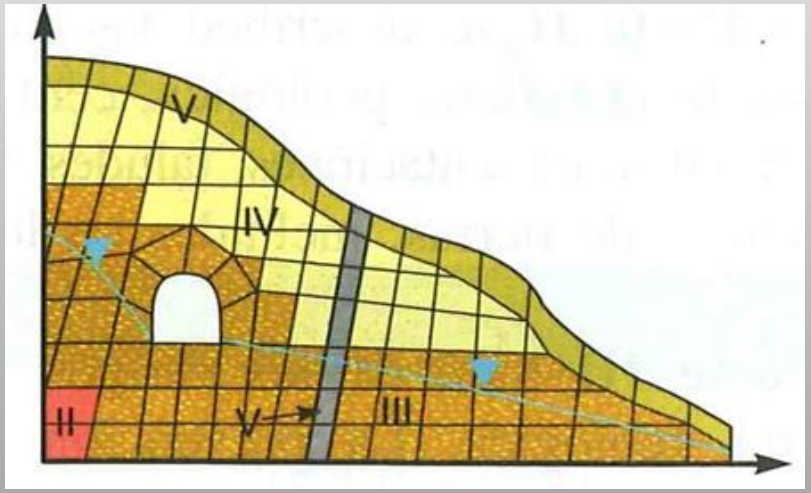
- DEFINIR EL TRAZADO
- PROPORCIONAR UN MODELO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO
- DEFINIR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN
- IDENTIFICAR LAS NECESIDADES LOGISTICAS DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN
- DEFENIR EL SOPORTE Y REVESTIMIENTO
- DEFINIR LOS PORTALES
- PREVER LAS AFECCIONES DE LA OBRA AL ENTORNO
- ESTIMAR LOS COSTES Y PLAZOS
- PREVER LOS RIESGOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS QUE PUEDEN AFECTAR AL COSTE Y PLAZO, Y CUANTIFICAR SU IMPACTO

ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

GENERACIÓN DEL MODELO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO



MODELO GEOLÓGICO



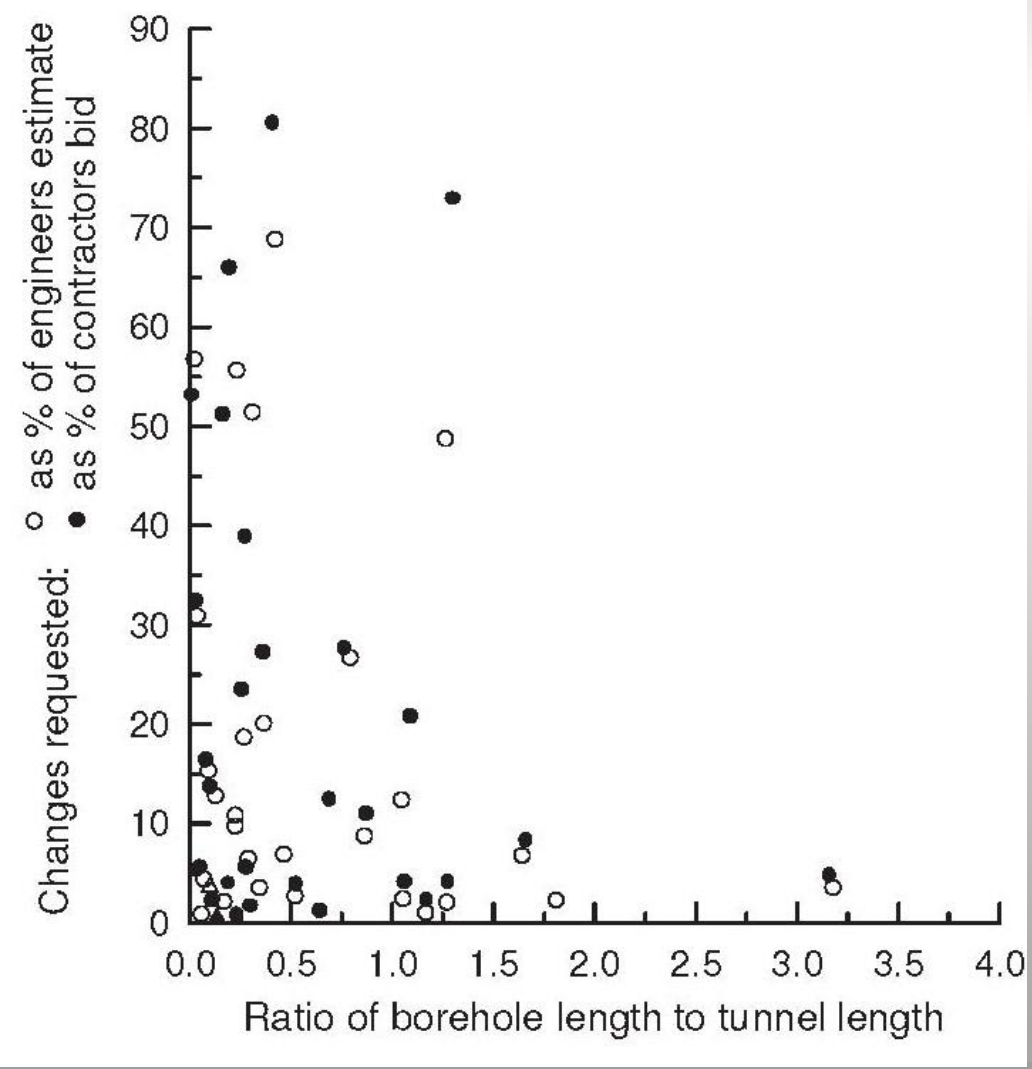
MODELOS GEOTÉCNICOS

IDENTIFICAR RIESGOS GEOLÓGICOS CRÍTICOS

- PORTALES INESTABLES
- ZONAS CON ELEVADA CARGA DE AGUA
- FALLAS
- SQUEEZING
- ROCKBURST
- CUEVAS Y CAVIDADES
- MATERIALES EXPANSIVOS
- ETC.

¿CUAL ES LA MAGNITUD ADECUADA DEL ESTUDIO GEOLOGICO - GEOTECNICO A REALIZAR?

Criterio Basico: USNCTT (United States National Comission on Tunelling Technology). En el año 1987 realizó un estudio que relacionaba el ratio (ml sondeos perforados / ml de trazado de túnel) con el importe porcentual de las desviaciones en coste de un gran número de proyectos de túneles construidos. El resultado de este estudio se plasmó en la gráfica.



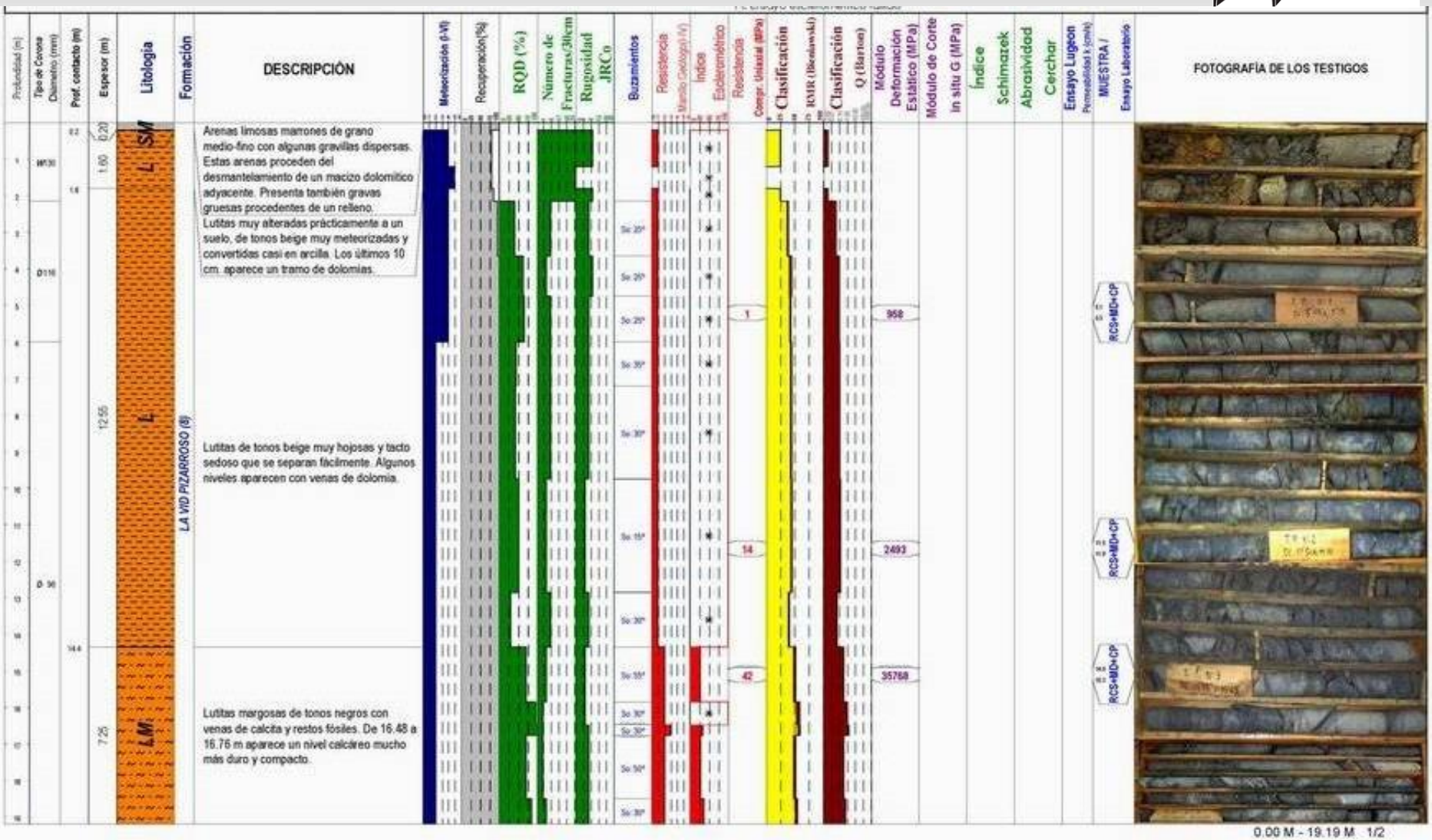
La USNCTT indica que el ***ratio óptimo es 1,5***, y que el gasto total óptimo en reconocimientos debería estar cercano al ***3 %*** del coste de obra civil. Así mismo, considera que los valores “aceptables” del ratio deberían comenzar a partir de 0,6

RECONOCIMIENTOS HABITUALES EN ESTUDIOS Y PROYECTOS DE TÚNELES

Pueden destacarse los siguientes tipos de reconocimientos para la investigación de los túneles:

- TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.
- SÍSMICA.
- SONDEOS WIRE – LINE
- SONDEOS DIRECCIONALES
- DIAGRAFÍA TELEVIEWER
- HIDROFRACTURACIÓN:
- DIAGRAFÍA DE CALIBRE
- DIAGRAFÍA GAMMA NATURAL – TEMPERATURA – CONDUCTIVIDAD:
- DIAGRAFÍA SÓNICA DE ONDA COMPLETA
- PRESIODILATOMETRÍA
- PRESIODILATOMETRÍA CON PROTOCOLO DE LARGA DURACIÓN
- ENSAYOS DE LABORATORIO

SONDEOS CON OBTENCIÓN DE NUCLEOS: Sistema Wire-Line



PRESIODILATOMETRÍA: Determinación del Módulo de deformación dentro del sondeo

- Los valores obtenidos en las probetas de laboratorio son mucho mayores que los que realmente presenta el terreno.

- En geotecnia de túneles se mide in situ (presiodilatómetro o dilatómetro), o se valora con formulaciones empíricas basadas en las clasificaciones geomecánicas.

- En geotecnia de túneles se emplea el módulo en su rama de descarga.

DETECCIÓN DE FALLAS: Tomografía Eléctrica

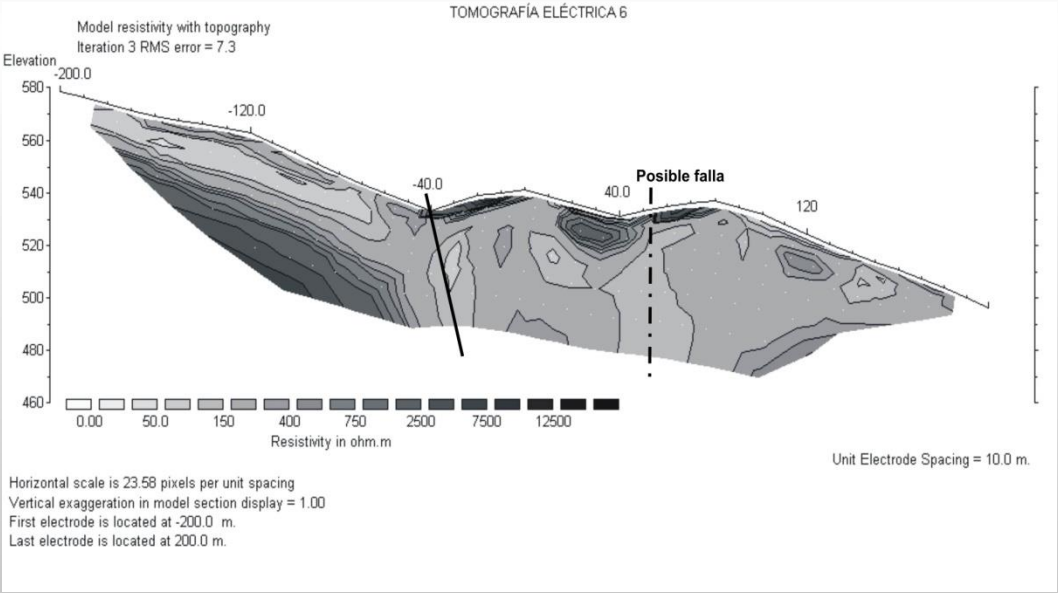


FOTO: Falla de difícil detección en superficie

¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?

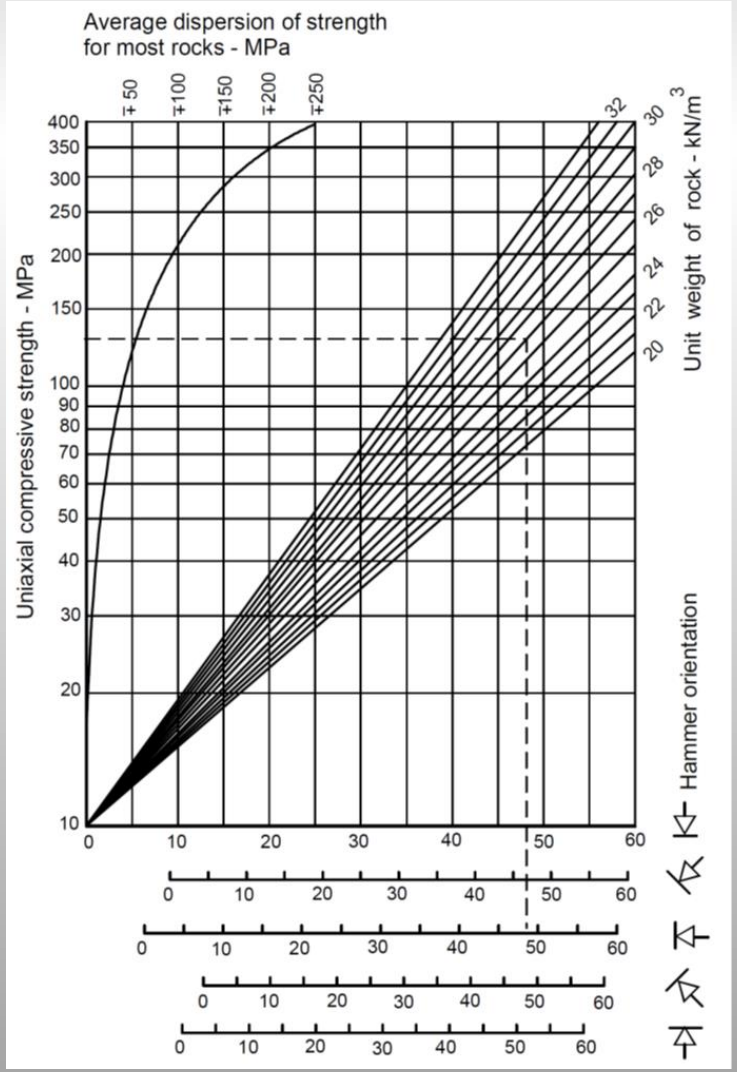
1) En una primera fase, que denominaremos FASE I, se realizan extensos reconocimientos de campo, geofísica, teledetección, toma de muestras manuales o con máquina eléctrica portátil y ensayos de laboratorio.
2) En una segunda fase, que denominaremos FASE II, se realizarán sondeos en los principales lugares de interés, una vez que se disponga de los viales de acceso. Suele hacerse en fase de construcción.

¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?

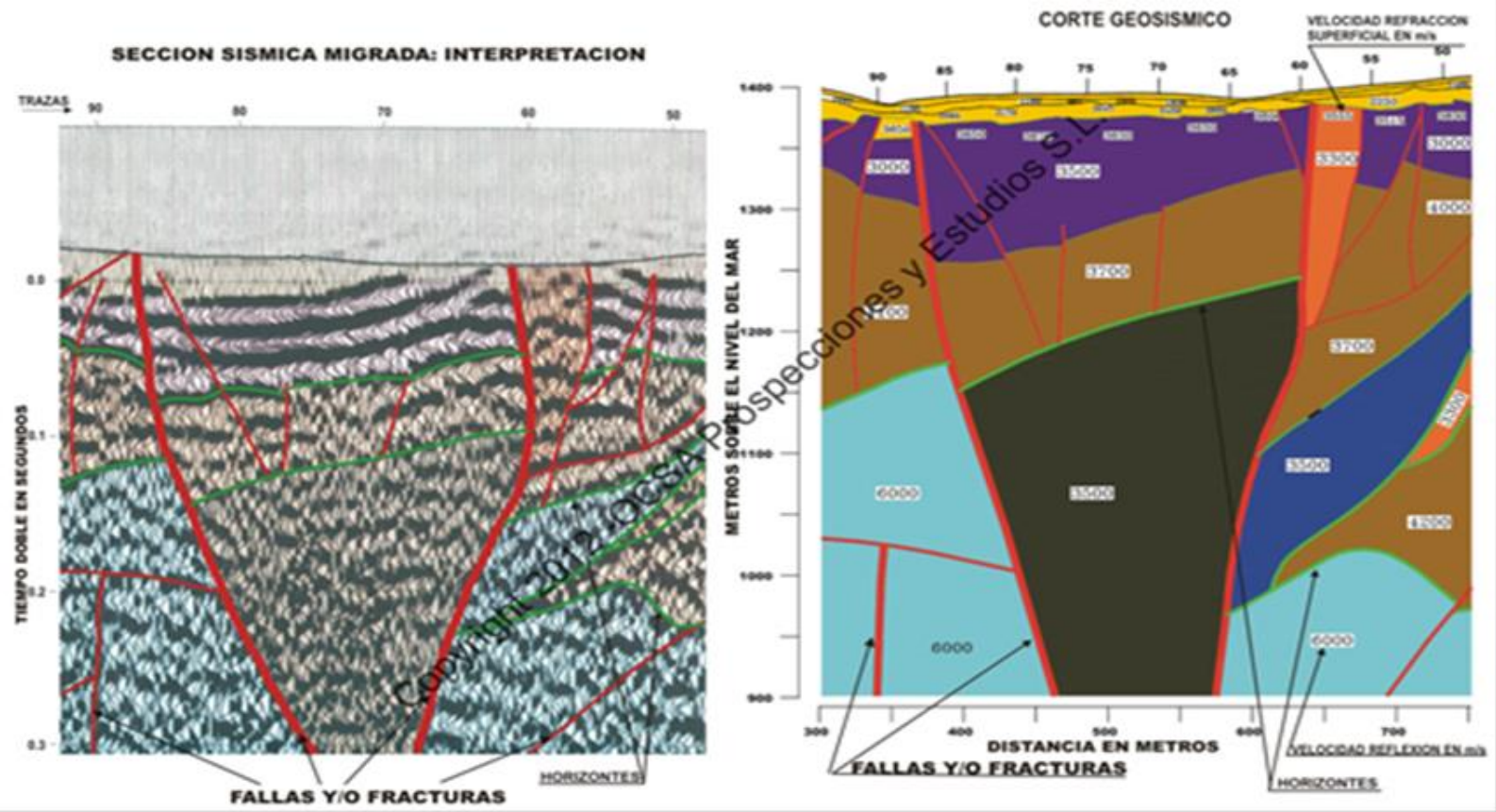
Trabajos de cartografía geológica de campo, con ayuda de mulas. Se acampa y hace noche en el sitio de los túneles

¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?

Medida de resistencia de la roca con esclerómetro



¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?



Estructura geológica y velocidad Ondas P

¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?

CORRELACIÓN RESISTENCIA / VELOCIDAD SÍSMICA PARA ARENISCAS EN GENERAL			
AUTOR	EXPRESIÓN	VARIABLES	APLICACIÓN
Freyburg, 1972	$\sigma_C = 0{,}035 \cdot V_p - 31{,}5$	σ_C = Resistencia Compresión (MPa) V_p = Velocidad Ondas P (m/s)	Areniscas en general

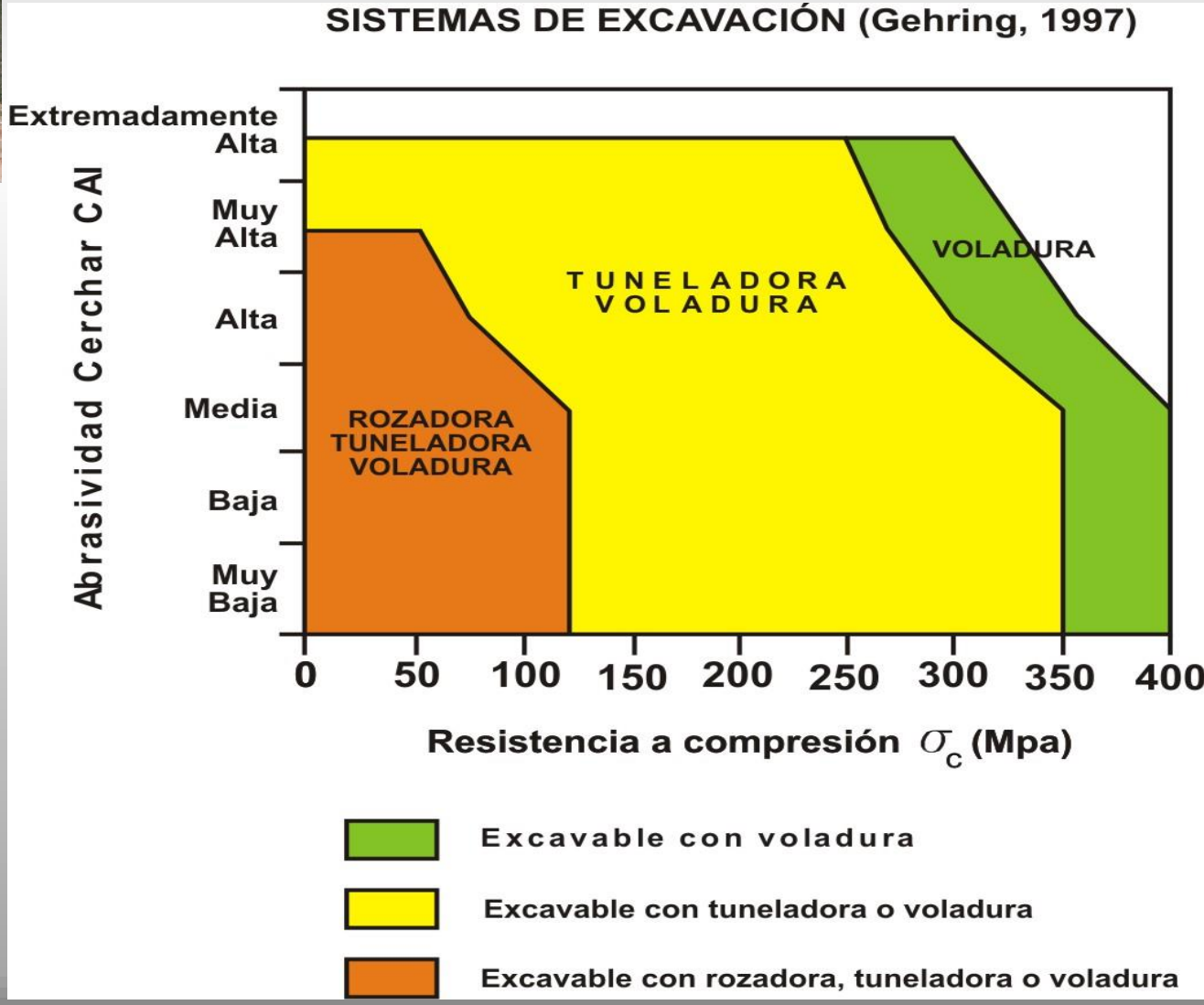
CORRELACIONES DENSIDAD Y VELOCIDADES SISMICAS			
AUTOR	EXPRESIÓN	VARIABLES	APLICACIÓN
Gaviglio, 1989	$V_p = 3{,}66\ \rho - 4{,}46$	V_p = Velocidad Ondas P (km/s) ρ = densidad (gr/cm^3)	Lutita
Gardner, 1974	$\rho = 0{,}23 \cdot V_p^{0{,}25}$	V_p = Velocidad Ondas P (pie/s) ρ = densidad (gr/cm^3)	General

¿QUE HACER PARA REALIZAR RECONOCIMIENTOS DE TÚNELES EN ZONAS REMOTAS?

CORRELACIONES CLASIFICACIONES GEOMECÁNICAS Y VELOCIDADES SISMICAS-ANGULO TALUD			
AUTOR	EXPRESIÓN	VARIABLES	APLICACIÓN
El-Naqa, 1996	$RMR = 59{,}8 \left(\frac{V_p}{V_{p0}}\right)^{0{,}26}$	V_p = Velocidad Ondas P en el terreno (km/s) V_{p0} = Velocidad Ondas P en testigos intactos del mismo macizo (km/s) RMR = Rock Mass Rating (Bieniawski)	Pizarras, margas y calizas
El-Naqa, 1996	$\text{Ln } Q = 2{,}61 \cdot \left(\frac{Vp}{Vp0}\right)^{0{,}97}$	V_p = Velocidad Ondas P en el terreno (km/s) V_{p0} = Velocidad Ondas P en testigos intactos del mismo macizo (km/s) Q = Indice Q (Barton)	Pizarras, margas y calizas
Banks, 2005	RMR Básico = 0,4 ·S +52	S = Ángulo de Taludes Naturales (º) RMR Básico = Valor sin corrección por orientación de diaclasas.	General
Barton, 2002	$Q_c = 10^{Vp - 3{,}5}$	V_p = Velocidad Ondas P en el terreno (km/s) Qc = Indice Q Normalizado: $Q_c = Q \cdot \frac{100}{\sigma_c}$ Q = Indice Q σ_C = Resistencia a Compresion Simple de la roca intacta (MPa)	General, tanto para rocas duras como blandas

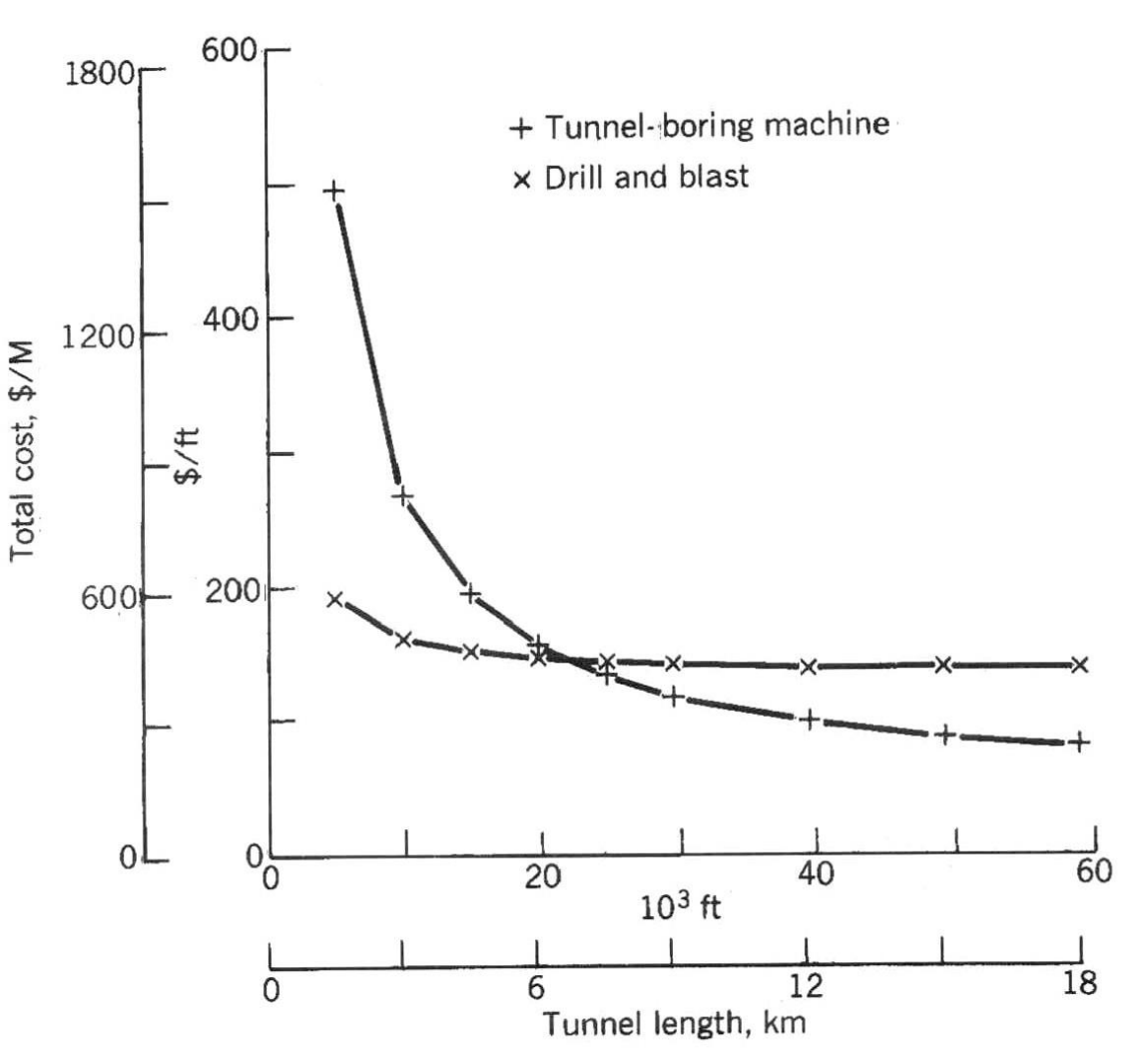
MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

MÉTODOS DE EXCAVACIÓN SEGÚN DUREZA TERRENO



TUNELADORA vs. EXCAVACIÓN CON VOLADURA

La tuneladora solo es económicamente adecuada en longitudes superiores a 6 km, aunque esta cifra puede variar en los distintos países



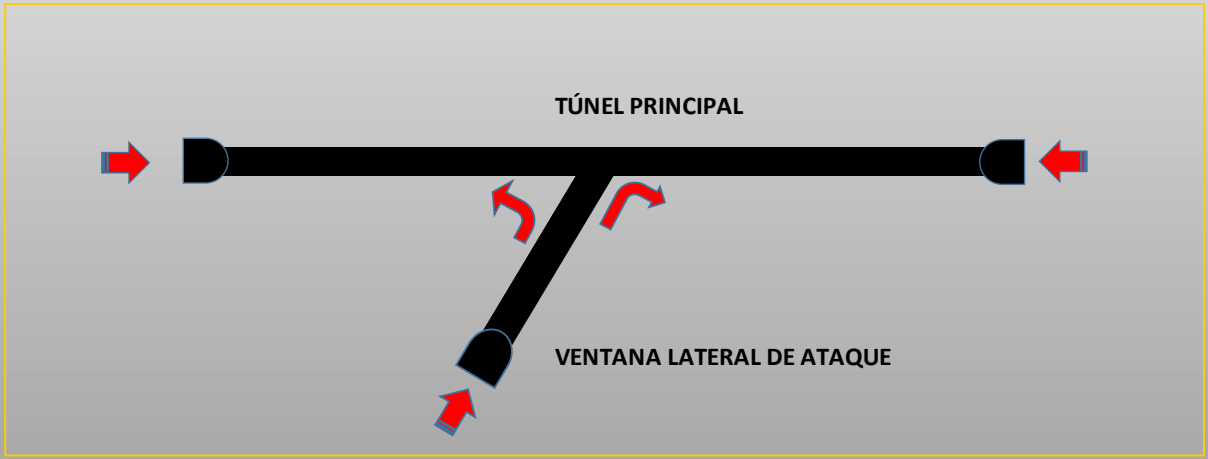
VELOCIDAD DE EXCAVACIÓN HABITUAL (Túneles en Roca)

La tuneladora es capaz de excavar entre 350 y 650 m/mes

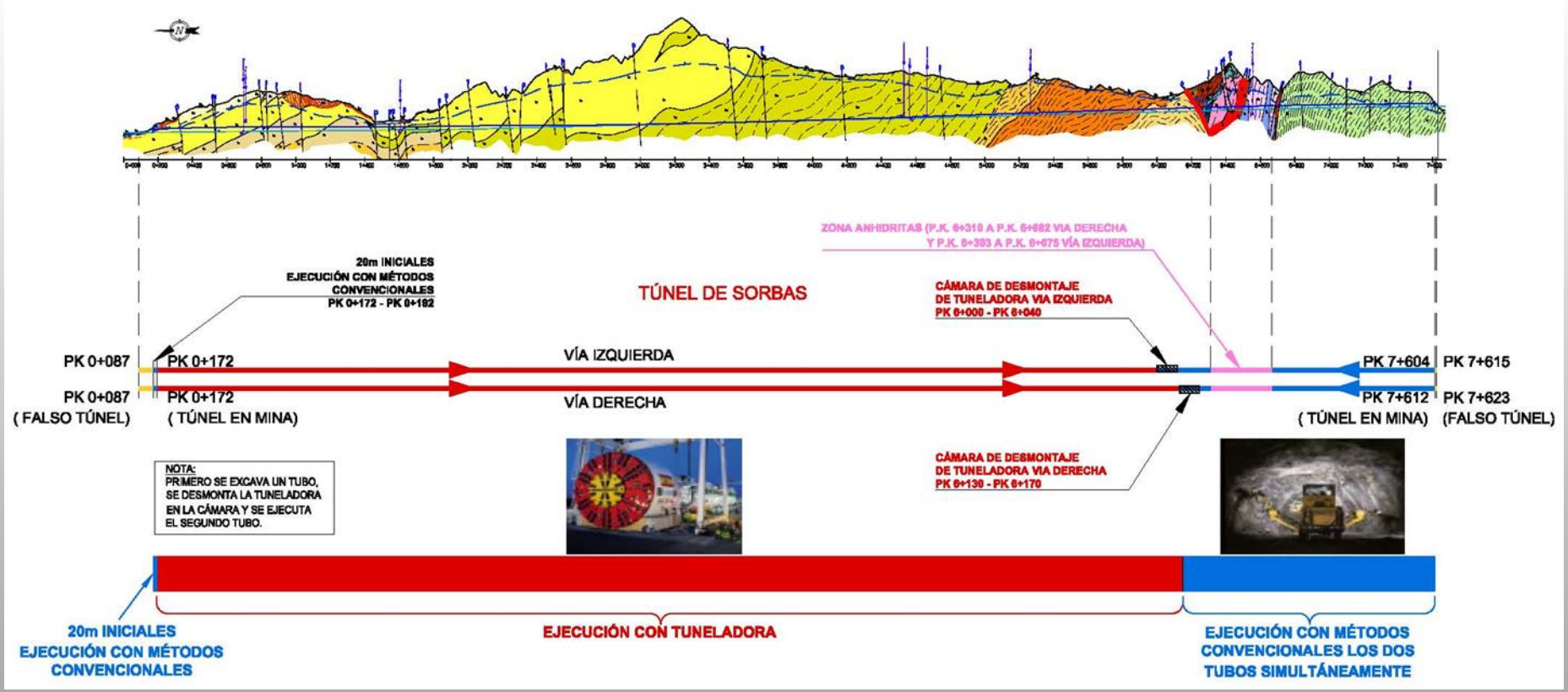
El método convencional es capaz de excavar entre 80 y 300 m/mes

ESQUEMAS DE EJECUCIÓN

MÉTODO	RANGO DE LONGITUDES	OBSERVACIONES
Convencional	< 4.000 m	Si son cortas, podrian definirse ventanas (L < 250 m)
Convencional con ventanas	4.000 - 6.000 m	Ventanas no muy largas (L< 1000 m)
Tuneladora / Convencional con Ventanas	6.000 - 8.000 m	Tuneladora si los accesos son fáciles. Ventanas de no más de 2.000 m
Tuneladoras	> 8.000 m	Dos ataques con tuneladora, uno por boca.

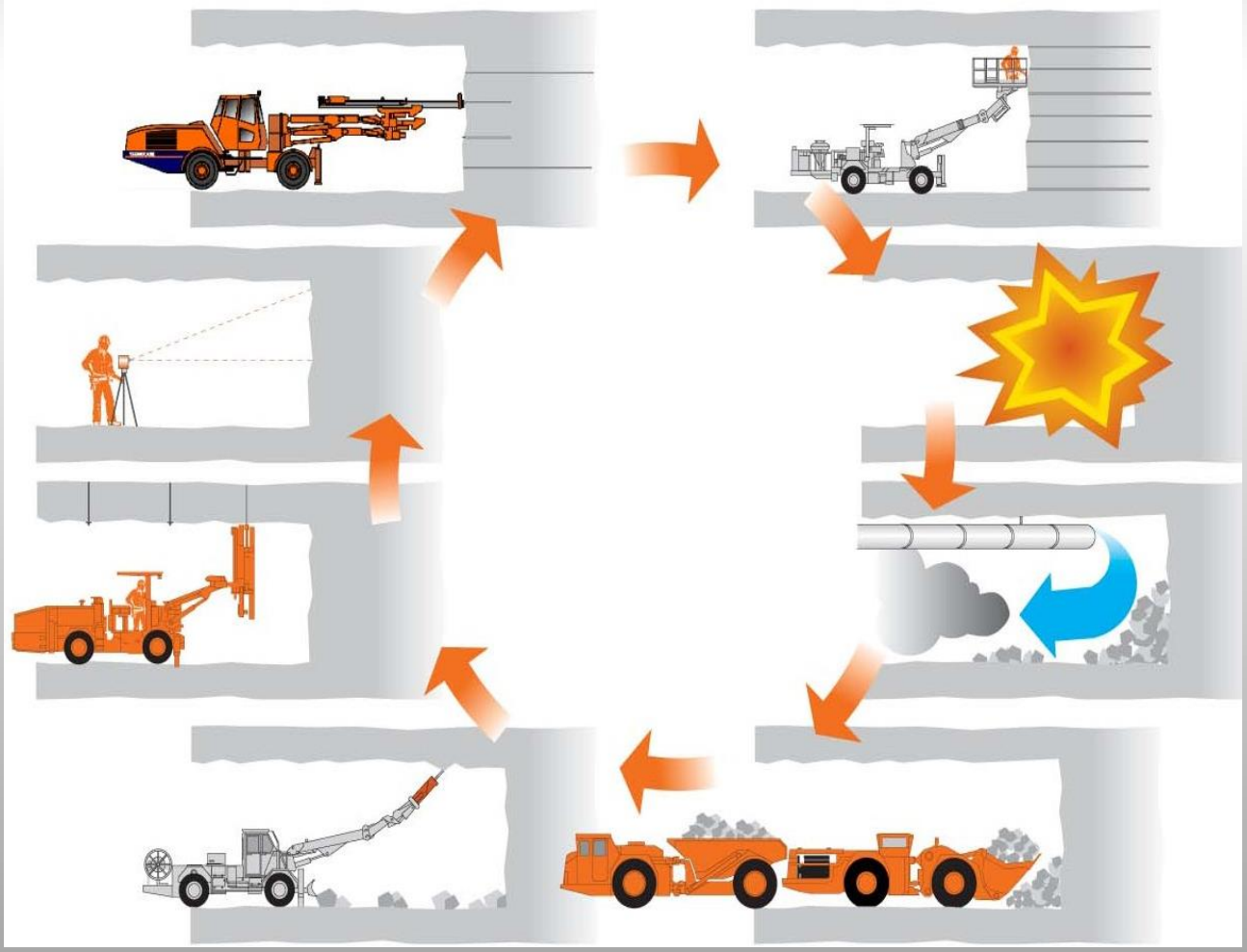


ESQUEMAS DE EJECUCIÓN



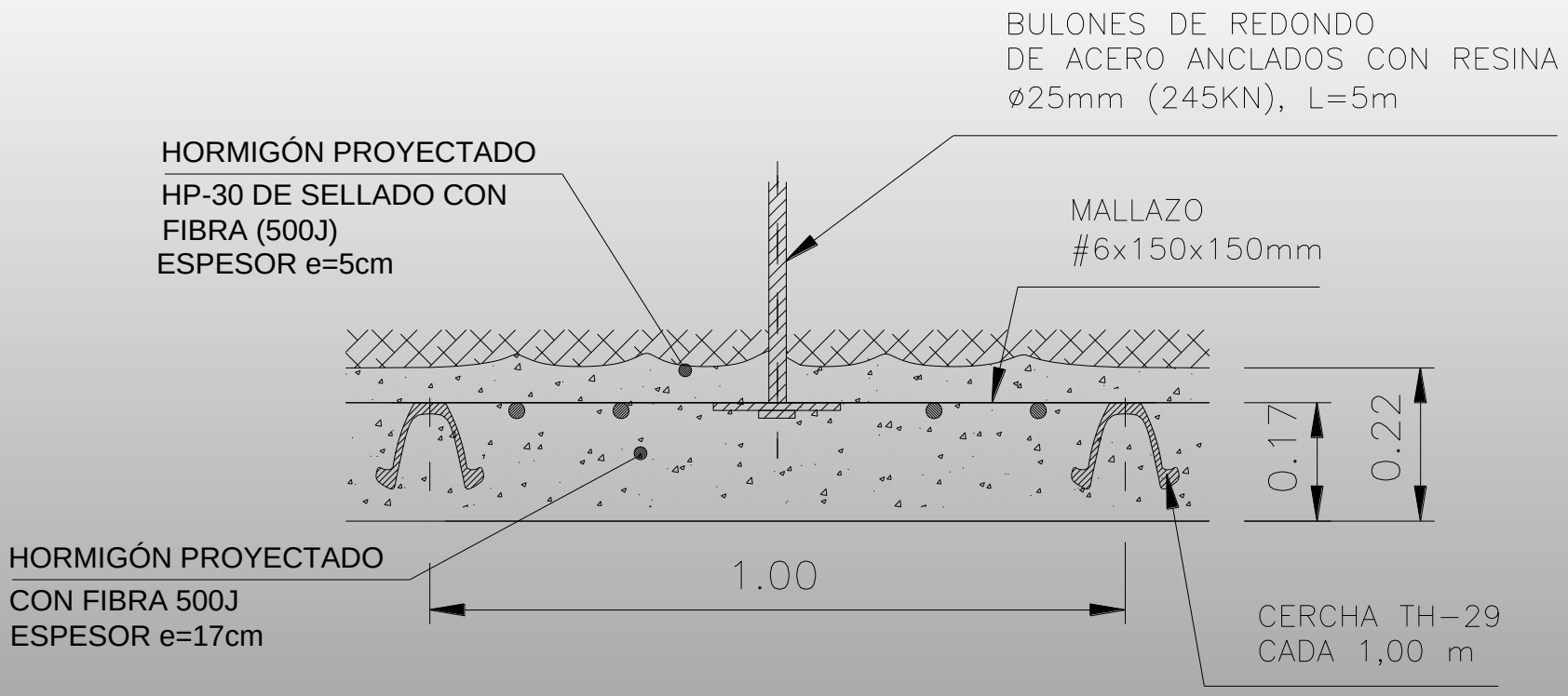
MÉTODOS DE VOLADURA Y CONVENCIONAL

EXCAVACIÓN EN CICLOS



SOPORTE

En función de la calidad de la roca, se coloca mayor o menor cuantía de soporte



EXCAVACIÓN A SECCIÓN COMPLETA O EN DOS MITADES

El tramo en método convencional se excava mediante perforación y voladura (drill and blast). Si el terreno es de mala calidad se excava en dos mitades: mitad superior (calota) y mitad inferior (destroza). Si el terreno es de buena calidad se excava a sección completa.

CALOTA

DESTROZA

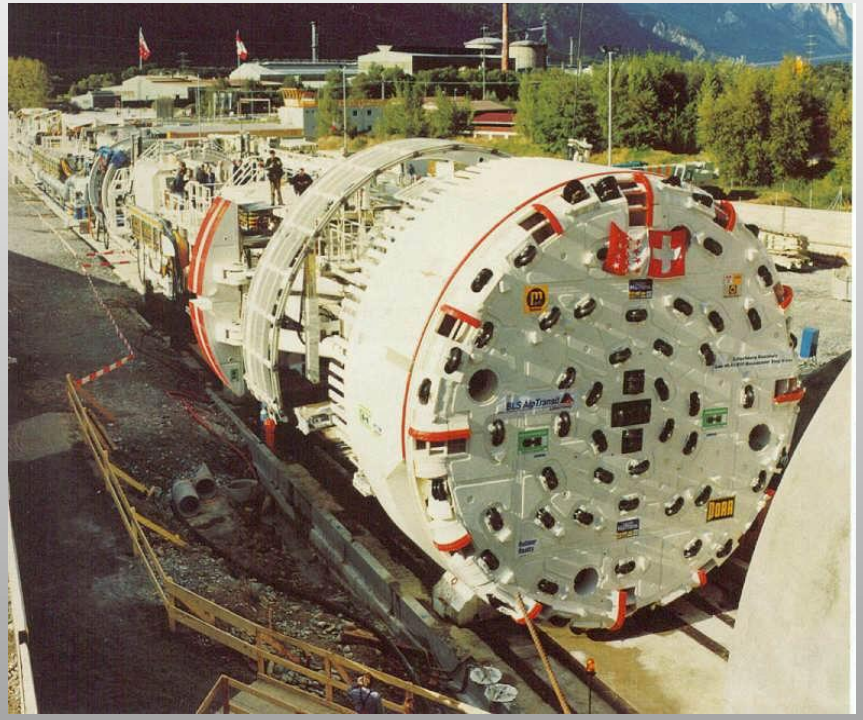
TÚNELES CON VOLADURA
Implantación de obras en el sitio

La implantación de obras por método convencional requiere mucho menos espacio, generalmente no supera los 5.000 - 10.000 m^2.

MÉTODOS DE TUNELADORA

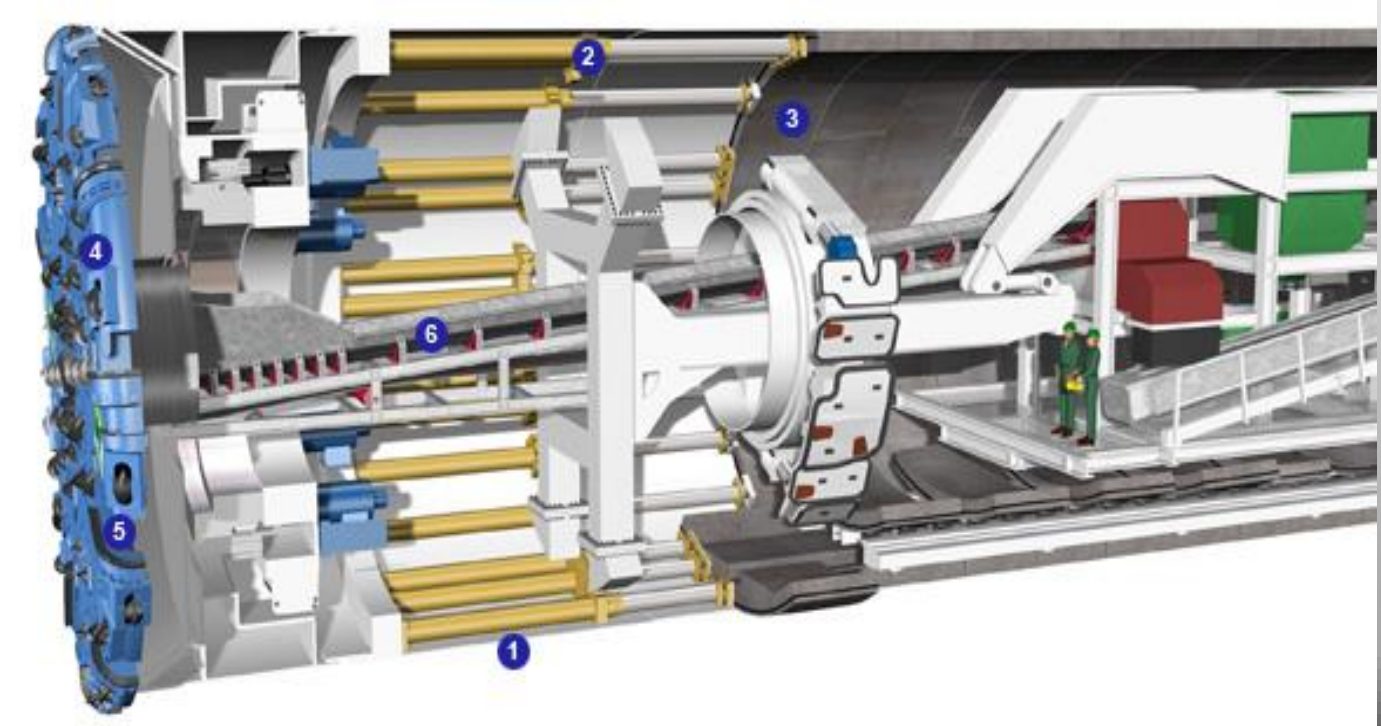
TIPOS DE TUNELADORAS: Topo Abierto

•Excavación con máquina tuneladora abierta (topo abierto). Excavación mecanizada a plena sección sin coraza o escudo. Sostenimiento con hormigón proyectado, bulones, cerchas. El apoyo necesario de la máquina para conseguir la reacción de empuje para la excavación es contra el terreno.



TIPOS DE TUNELADORAS: Escudo

•Máquina tuneladora escudada. Revestimiento de dovelas prefabricadas de hormigón armado. La máquina se apoya contra el anillo de dovelas mediante gatos hidráulicos para conseguir el empuje de excavación.



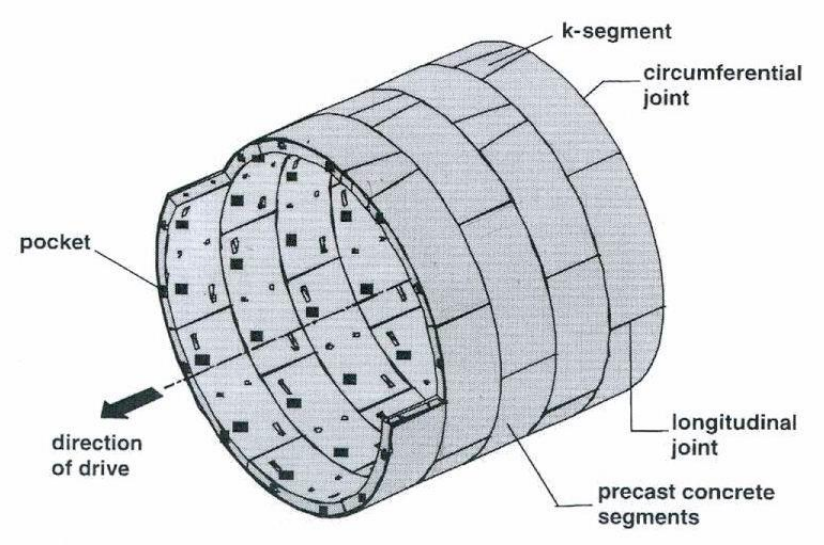
TIPOS DE TUNELADORAS: Doble Escudo

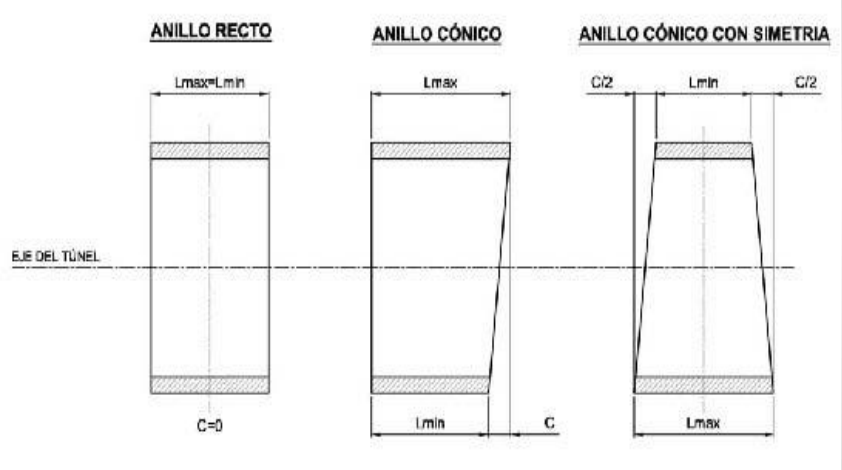
Máquina tuneladora doble escudo. Revestimiento de dovelas de hormigón armado. Está máquina puede efectuar el empuje sobre el revestimiento como el escudo simple, o bien, apoyándose contra el terreno como el topo abierto.

REVESTIMIENTO DE DOVELAS EN TUNELADORA TIPO ESCUDO

El revestimiento circular de los túneles excavados con tuneladora se realiza con dovelas prefabricadas de hormigón en un número de entre 4 y 9 dovelas por anillo. En estas dovelas se colocan transversalmente unas juntas de estanqueidad. Una vez volcado el anillo de dovelas se rellena el trasdós con mortero de cemento.

REVESTIMIENTO DE DOVELAS EN TUNELADORA TIPO ESCUDO





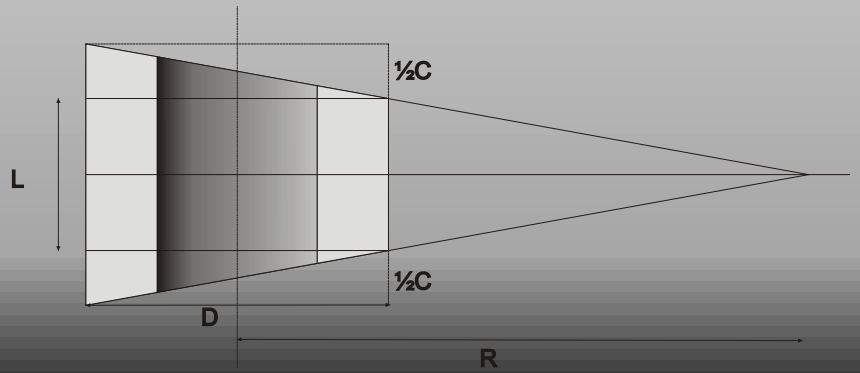
$$C = D \cdot (L / R)$$

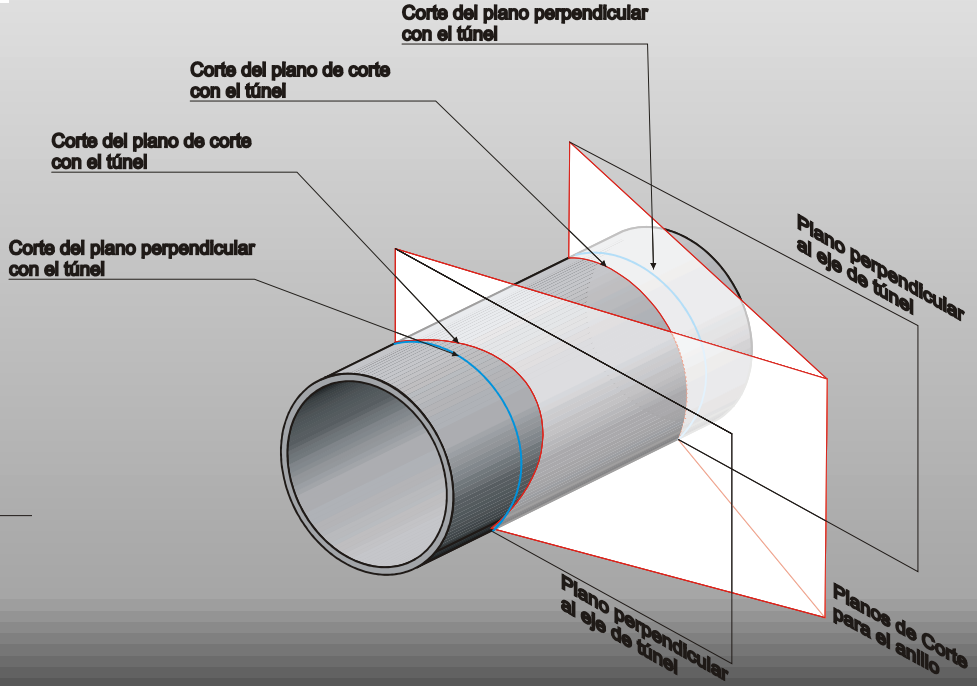
C es la Conicidad

D el diámetro del túnel

L la longitud media del anillo y

R el radio mínimo de curvatura del trazado

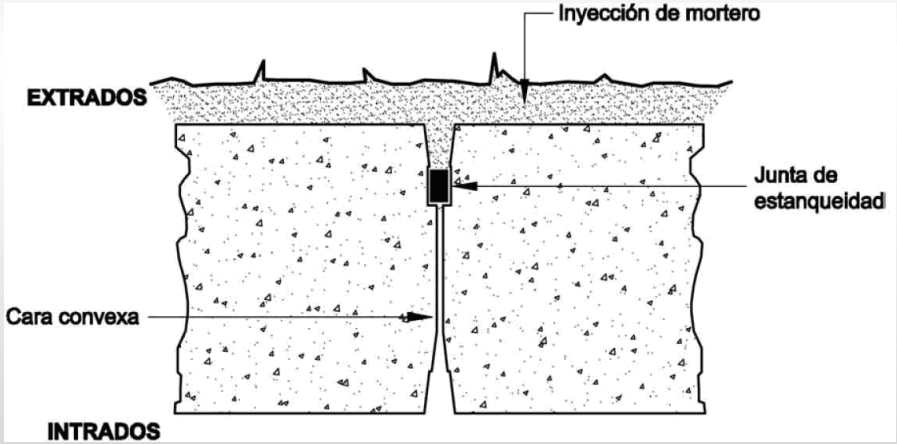


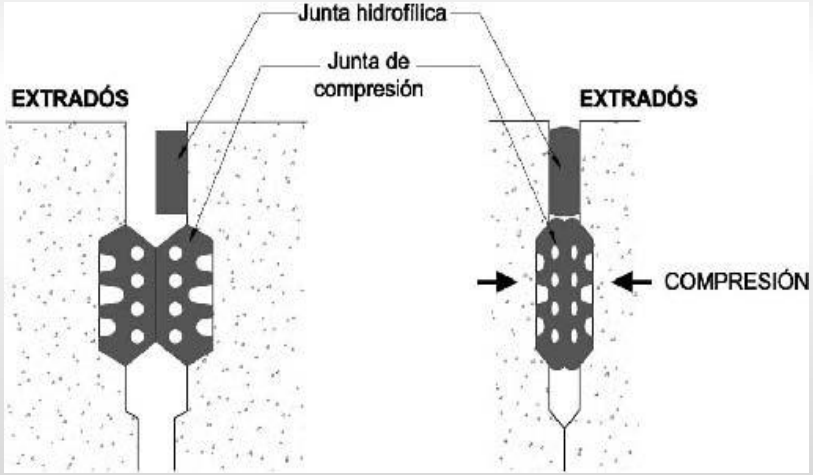


FABRICACIÓN DE LA DOVELA

La dovela se fabrica en la obra, para que los gastos de transporte no eleven su coste

ESTANQUEIDAD DEL REVESTIMIENTO DE DOVELAS: Juntas EPDM



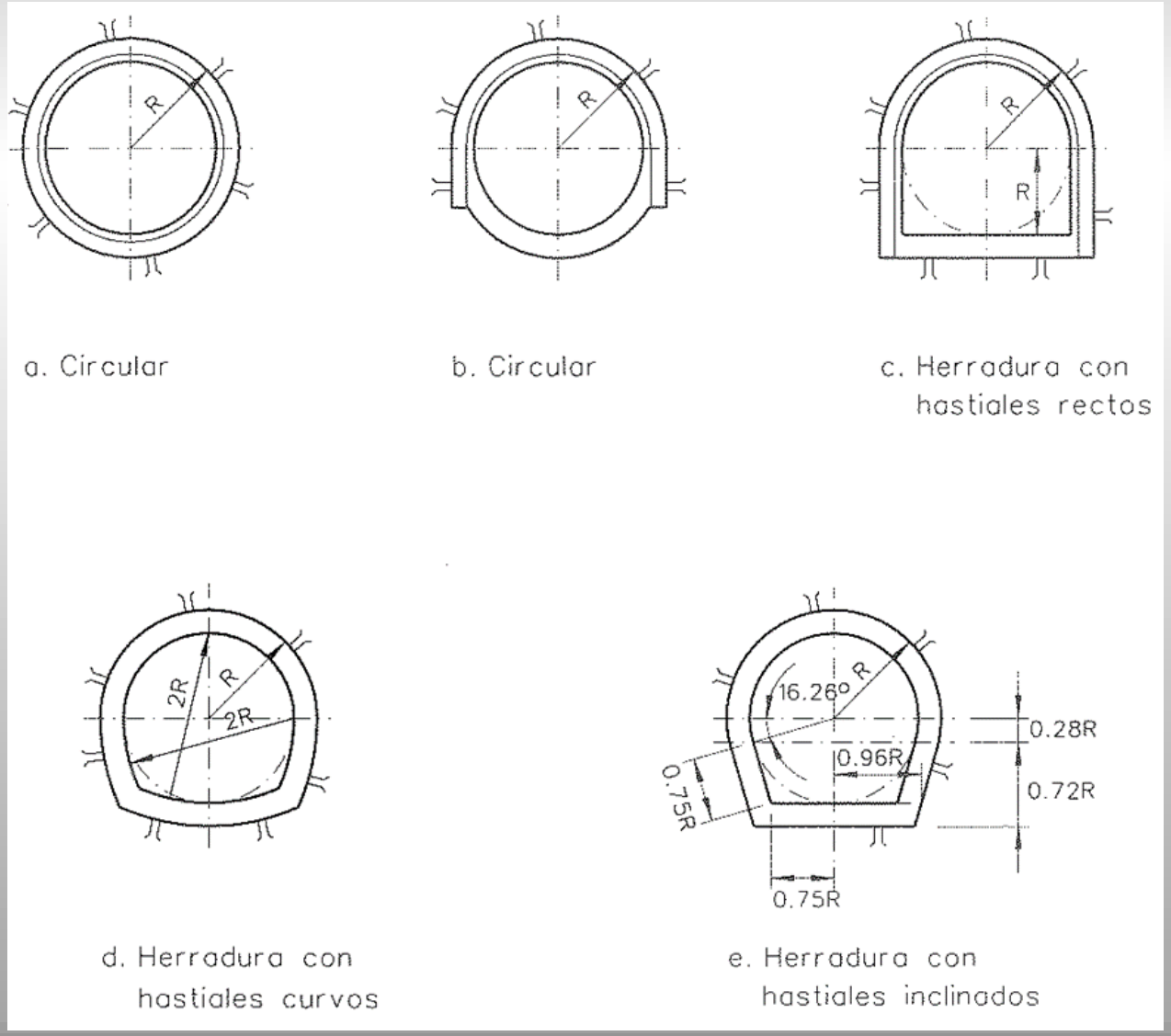


TÚNELES CON TUNELADORA
Implantación de obras en el sitio

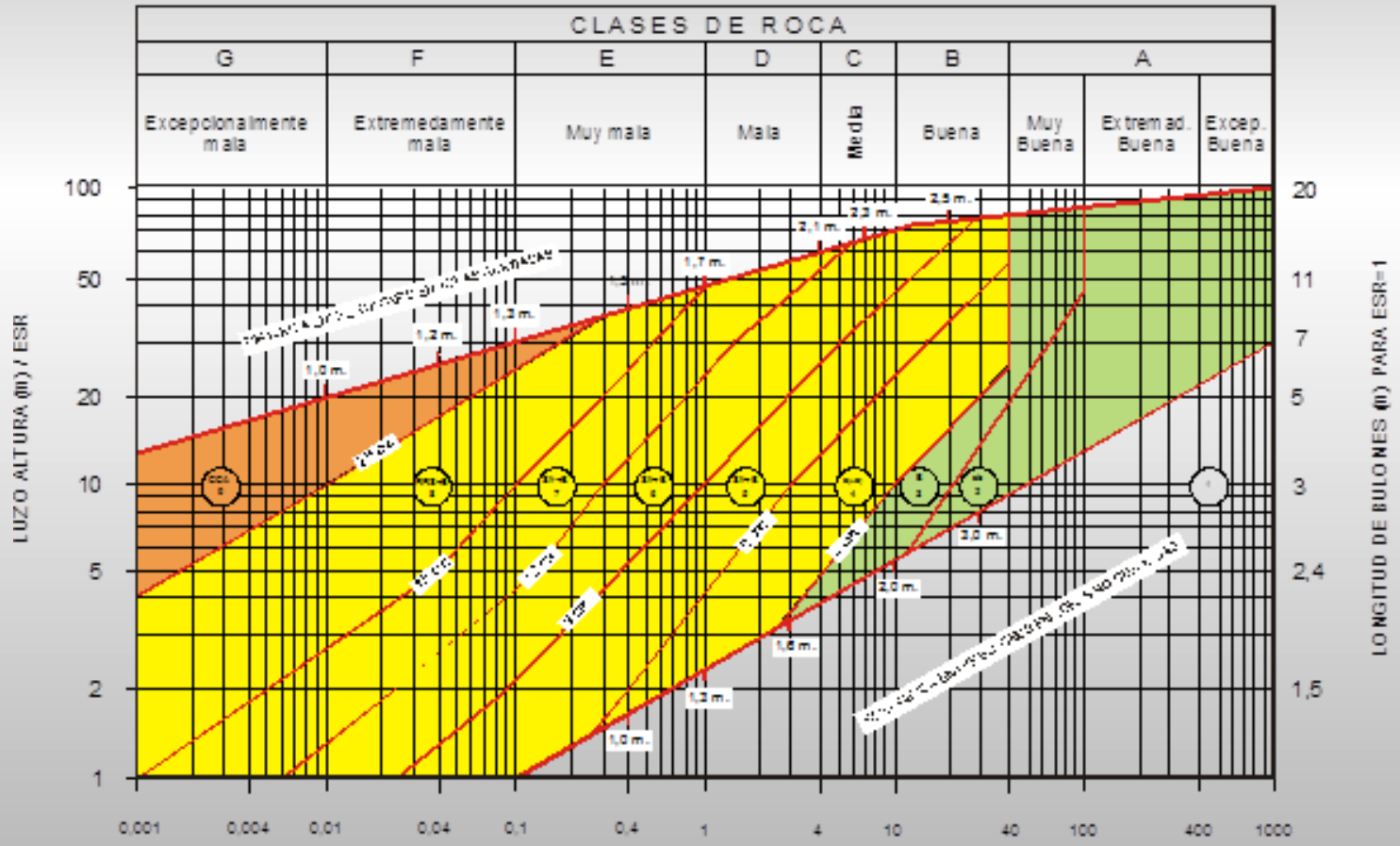
La implantación de obras con tuneladora requiere la ocupación de grandes zonas, que generalmente superan los 40.000 m^2.

SOPORTE Y REVESTIMIENTO

SECCIONES TÍPICAS EN TÚNELES HIDRAULICOS



DEFINICIÓN DE CLASES DE SOPORTE



(1) Sin sostenimiento
(2) sb Bulonado ocasional
(3) B Bulonado sistemático
(4) B (+S) Bulonado sistemático y hormigón proyectado (4-10 cm)
(5) Sfr + B Hormigón proyectado reforzado con fibras (5-9 cm) y bulonado
(6) Sfr + B Hormigón proyectado reforzado con fibras (9-12 cm) y bulonado
(7) Sfr + B Hormigón proyectado reforzado con fibras (12-15 cm) y bulonado
(8) Sfr, RRS+B Cerchas reforzadas de hormigón proyectado, hormigón proyectado (> 15 cm) y bulonado
(9) CCA Hormigón encofrado

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

DEFINICIÓN DE CLASES DE SOPORTE

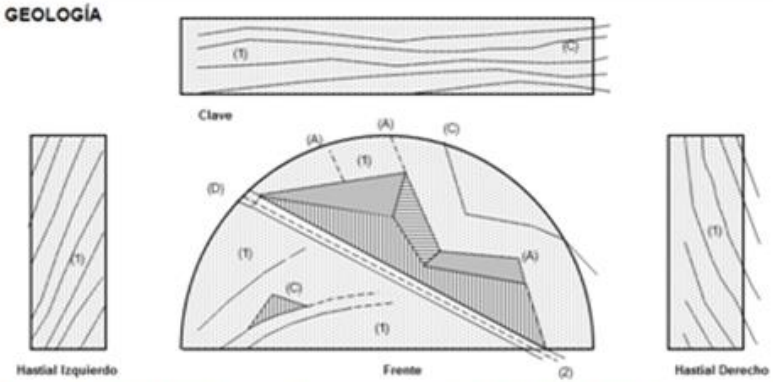
TIPO Y APLICACIÓN	EXCAVACIÓN	SOSTENIMIENTO			
		Bulones	Hormigón proyectado	Cerchas de acero	Otros
Tipo 1 RMR: 81-100	Excavación en avance y destroza. Pases de 4 m	Longitud de 4 m Bulonado ocasional. Expansivos o redondo Ø 25	HP-30 reforzado con fibra. 5 cm de espesor.	Ninguna.	Ninguna.
Tipo 2 RMR:61-80	Excavación en avance y destroza. Pases de 4 m Finalizar sostenim. a 8 m del frente.	Longitud de 4 m Malla de 2 x 2 m Expansivos o redondo Ø 25	HP-30 reforzado con fibra. 5 cm de espesor.	Ninguna.	Ninguna.
Tipo 3 RMR 41-60	Excavación en avance y destroza. Pases de 1,5 - 3 m Finalizar sostenim. a 3 - 6 m del frente.	Longitud de 4 m Malla 1,5 x 1,5 m Expansivos	HP-30 reforzado con fibra. 12 cm de espesor.	Ninguna.	Ninguna..
Tipo 4 RMR < 40	Excavación en avance y destroza (2 fases). Pases de 1 m Finalizar sostenim. a 2 m del frente.	Longitud de 4 m Malla de 1 x 1 m Expansivos	HP-30 reforzado con fibra. 20 cm de espesor.	Cerchas TH-29 a 1 m	1 capa de mallazo 150x150x6

LEVANTAMIENTO DE FRENTES Y SELECCIÓN DEL SOPORTE MÁS ADECUADO

AIN active CONSULTORES TÉCNICOS

TÚNELES Y GEOMECÁNICA

GEOLOGÍA



MATRIZ DE ROCA	Litología		Alter.
(1)	Pizarras arenosas		I-II
(2)	Pizarras débiles (pastiones)		
(3)			
(4)			
(5)			
(6)			
AGUA	Seco en general, salvo algunas manchas puntuales de humedad		

PLANOS DE DISCONTINUIDAD	Tipo	Direcc.	Buz.	Separ.	Apertura	Rugos.	Relleno
(A)	J	N130E	60ºN	>1 m	<5 mm	R-O	OX
(B)	-	-	-	-	-	-	-
(C)	E	N25E	65ºW	20-6 cm	<5 mm	O-L	OX, FR
(D)	E	N20E	60ºW	>2 m	<2 cm	O-L	FR
(E)							
(F)							

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO - RMR

(Bieniawski 1989)

OBTENCIÓN RMR BÁSICO			VALORACIÓN MÍNIMA DATOS	VAL.	VALORACIÓN MÁXIMA DATOS	VAL.
1	Resistencia a compr. simple (MPa)		5		30	
	Martillo de geólogo		No utilizado	2	No utilizado	4
2	Fracturas/metro lineal (λ)		50		20	
	RQD		4	3	41	8
3	Espaciado (mm)		200	8	200	8
4	Estado de las juntas	Persistencia	>20 m	0	>20 m	0
		Apertura	1-5 mm	1	1-5 mm	1
		Rugosidad	Suave	1	Suave	1
		Relleno	Relleno blando < 5 mm	2	Relleno blando < 5 mm	2
		Alteración	Moderadamente alterado	3	Inalterado	6
		Suma		7		10
5	Presencia de agua		Estado Ligeram. húmedo	10	Estado Seco	15
			Total	30	Total	45

Corrección por orientación discont.: Medio
Valoración: -5

RMR Básico	30	a	45
RMR:	25	a	40
Q-Barton:	0	a	1

Situación del frente en sección de avance:

Túnel: Boca: SUR
Tramo de túnel representado del P.K. 4+510 al P.K. 4+511
Longitud: 1 m Cobertera: 1100,00 m

FICHA Nº: 35
FECHA:

FOTO: Cuña de frente

AVANCE PROPUESTO:

EXCAVACIÓN Tipo: Mecánica o voladura suave Longitud de pase: 1,00 m.
SOSTENIMIENTO Tipo: IV (Ø25 1,5x1m, 6x150x150, TH-29/1m,20 cm HP250)

Observaciones:

Posible falla de potencia centimétrica paralela a la esquistosidad. Durante el gunitado se desprendió cuña frontal representada en el esquema.

SUPERVISIÓN:	Realizado por:	Informado:
Por:		
Fecha:	Fecha:	Fecha:

ESPESOR DEL REVESTIMIENTO

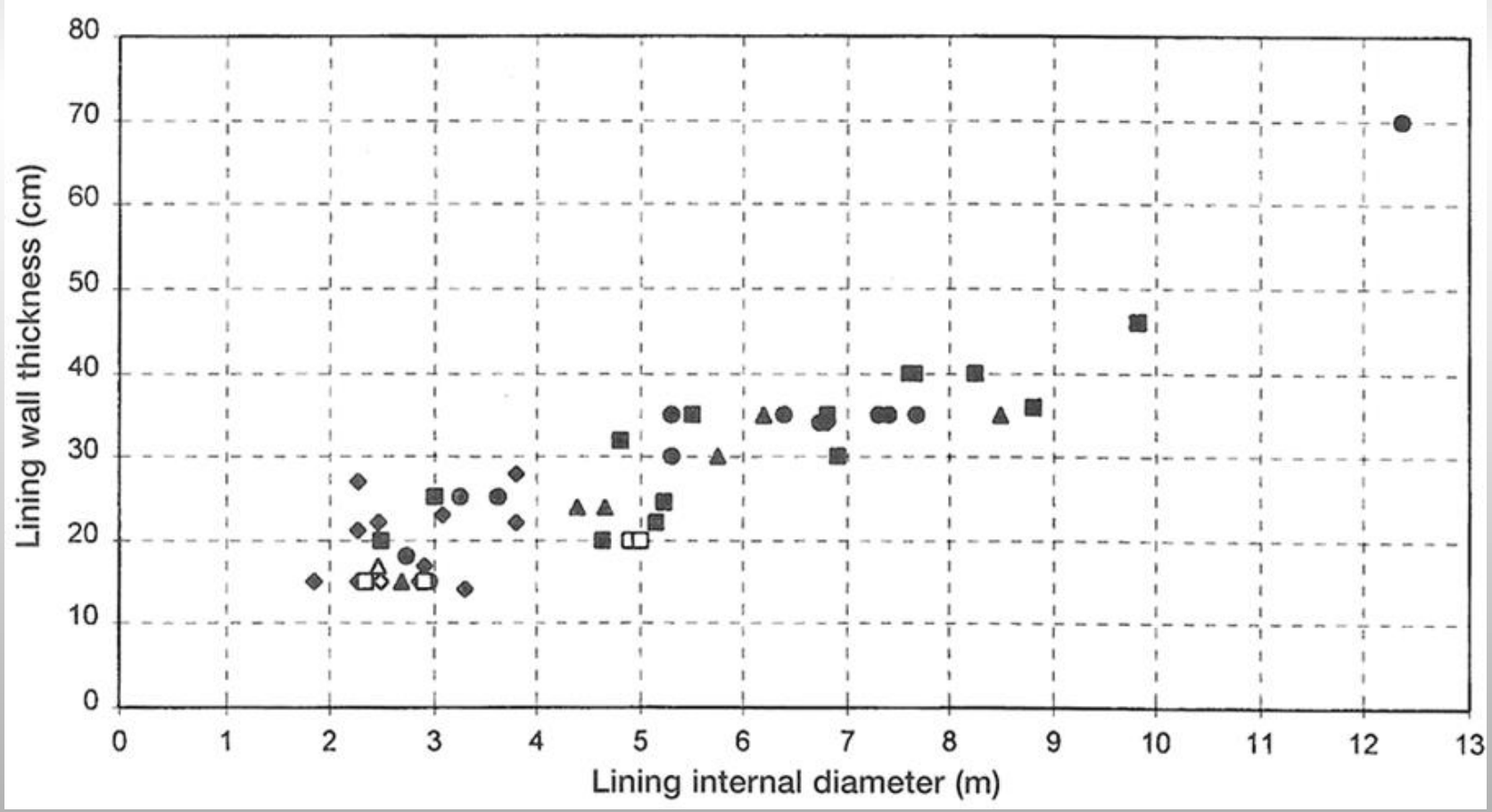
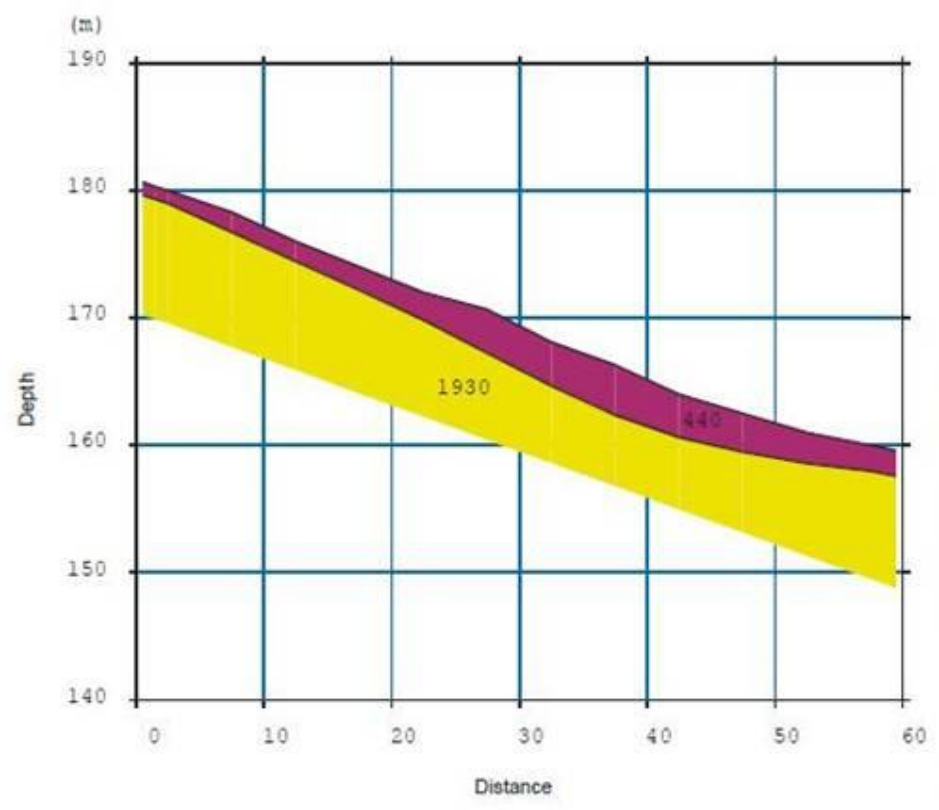


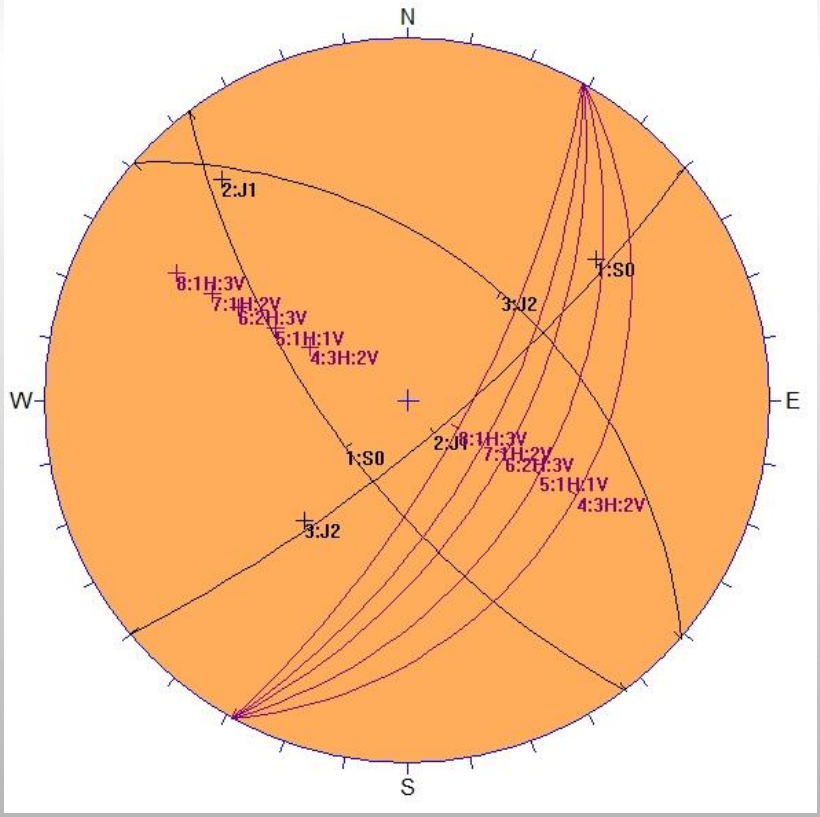
FIGURA: Determinación del espesor del revestimiento de hormigón de un túnel hidráulico (AFTES)

PORTALES

INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DEL PUNTO DE EMBOQUILLE

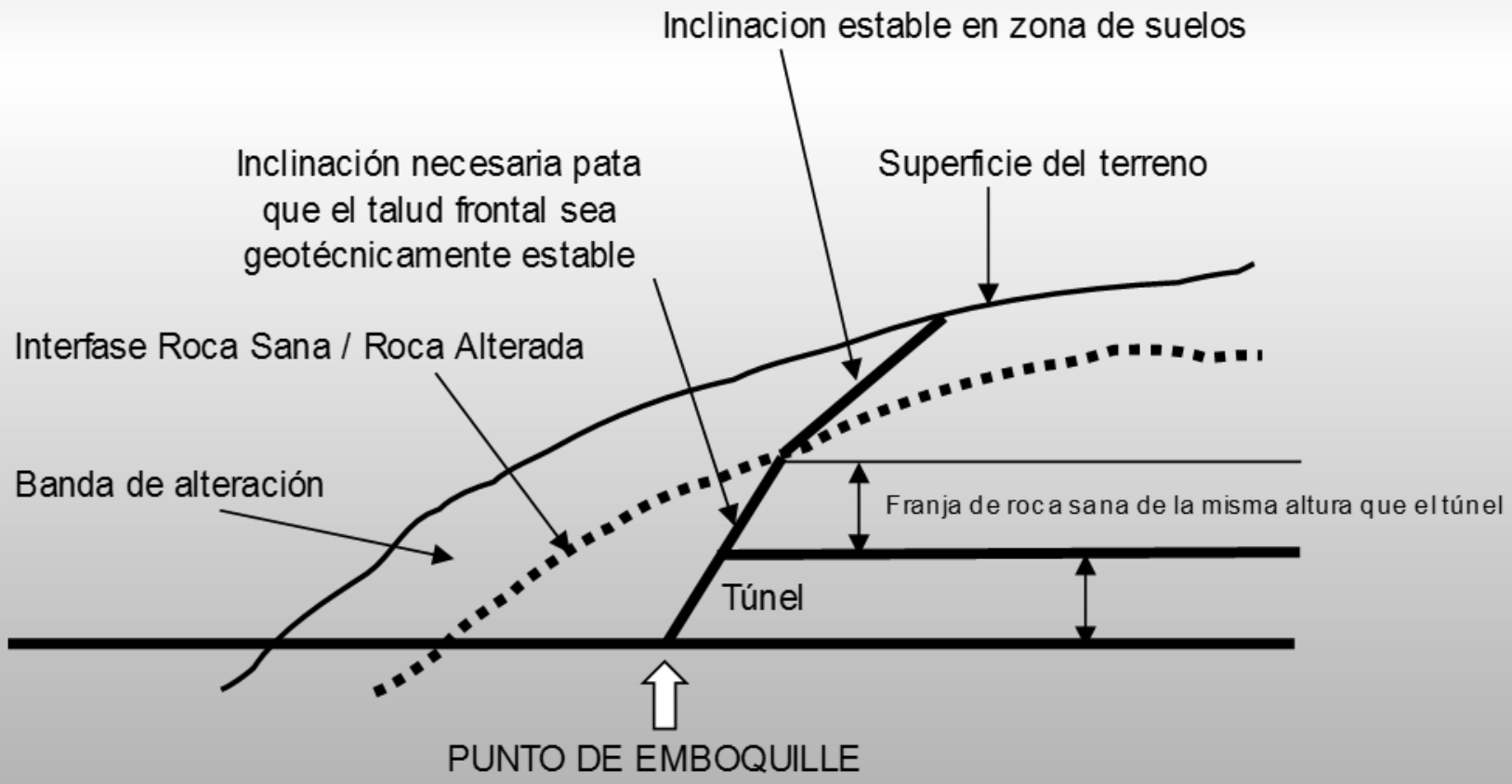


Registro Sísmico

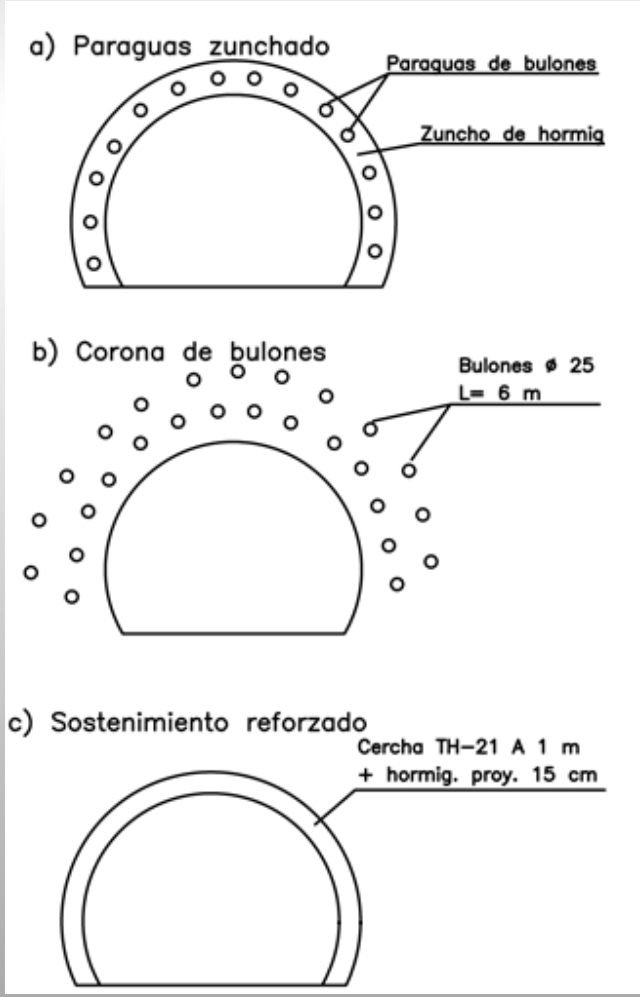


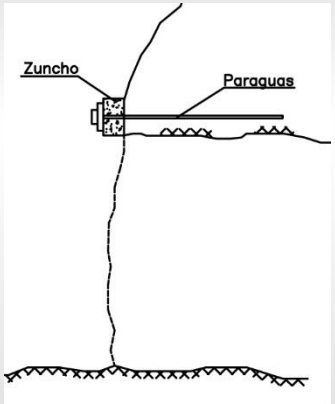
Proyección Estereográfica

CRITERIO DE DEFINICIÓN DEL PUNTO DONDE SE UBICARÁ EL PORTAL



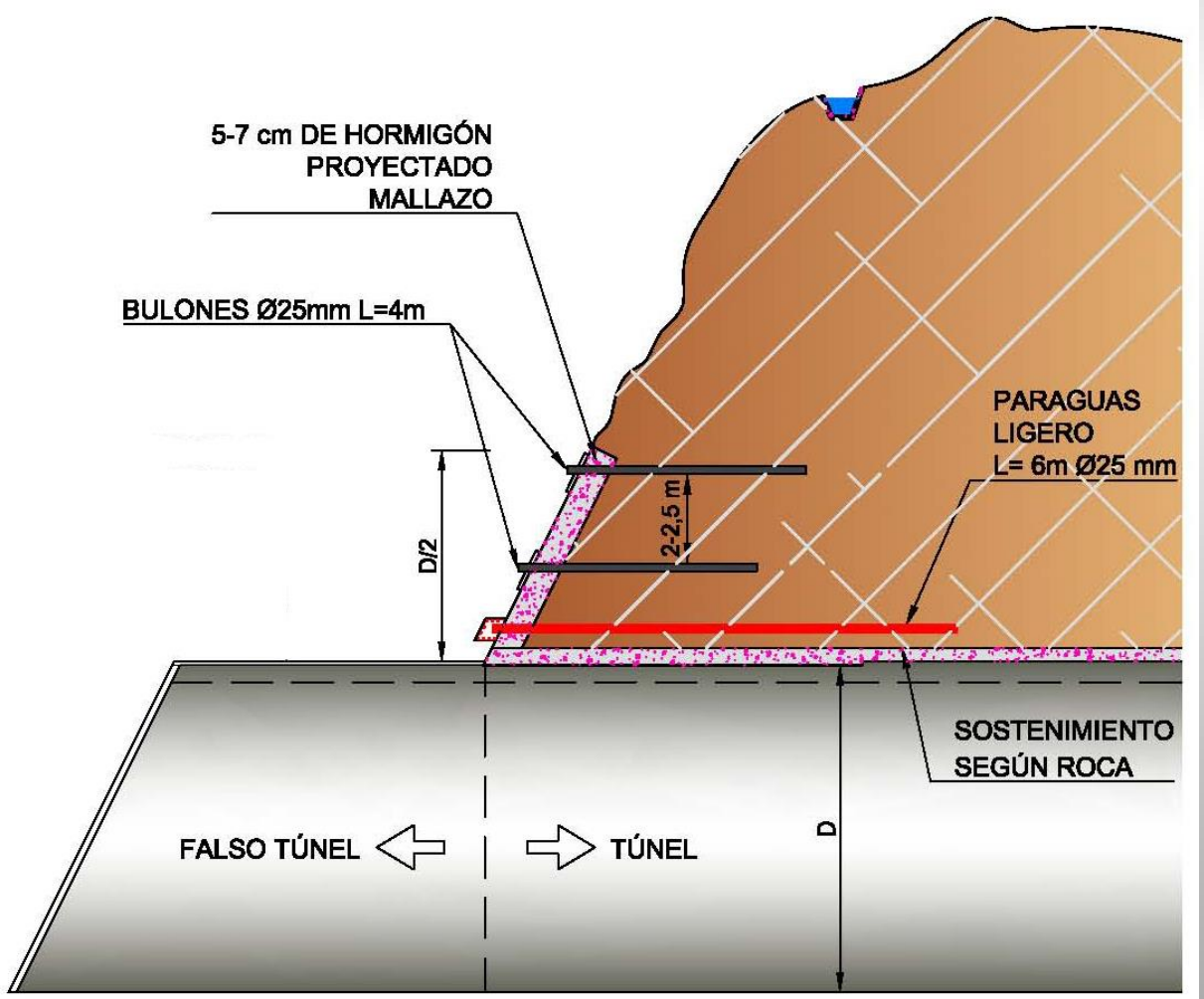
REFUERZO DE LA PERIFERIA INMEDIATA:
Paraguas, Doble Corona y Sostenimiento Reforzado





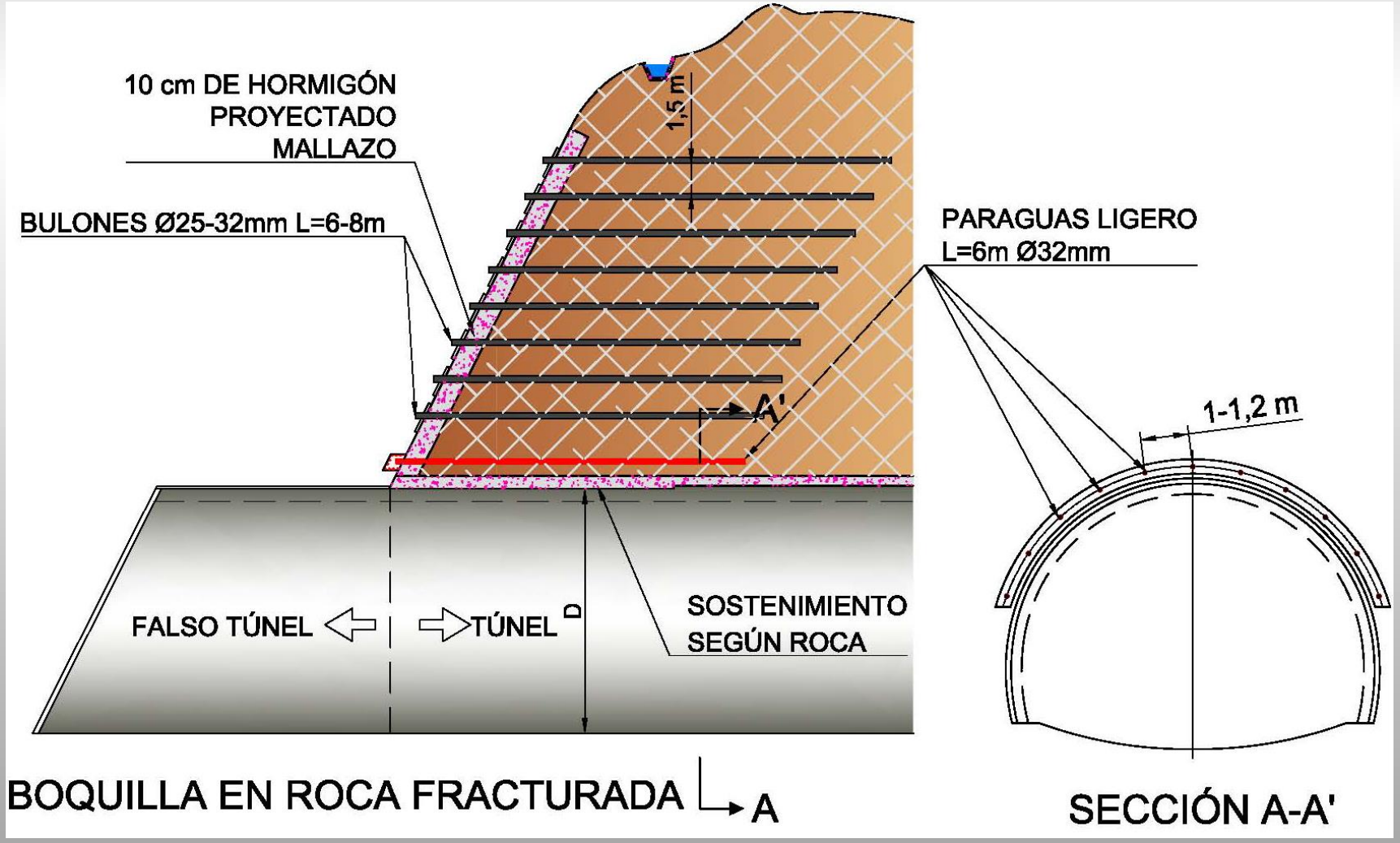
- Al margen de las necesidades de estabilización que se estimen para el talud frontal, como norma de "buena práctica", se suele reforzar la periferia inmediata del túnel con un paraguas zunchado, sostenimiento reforzado y una doble corona de bulones horizontales.

SOLUCIONES TIPO:
Emboquilles en roca sana

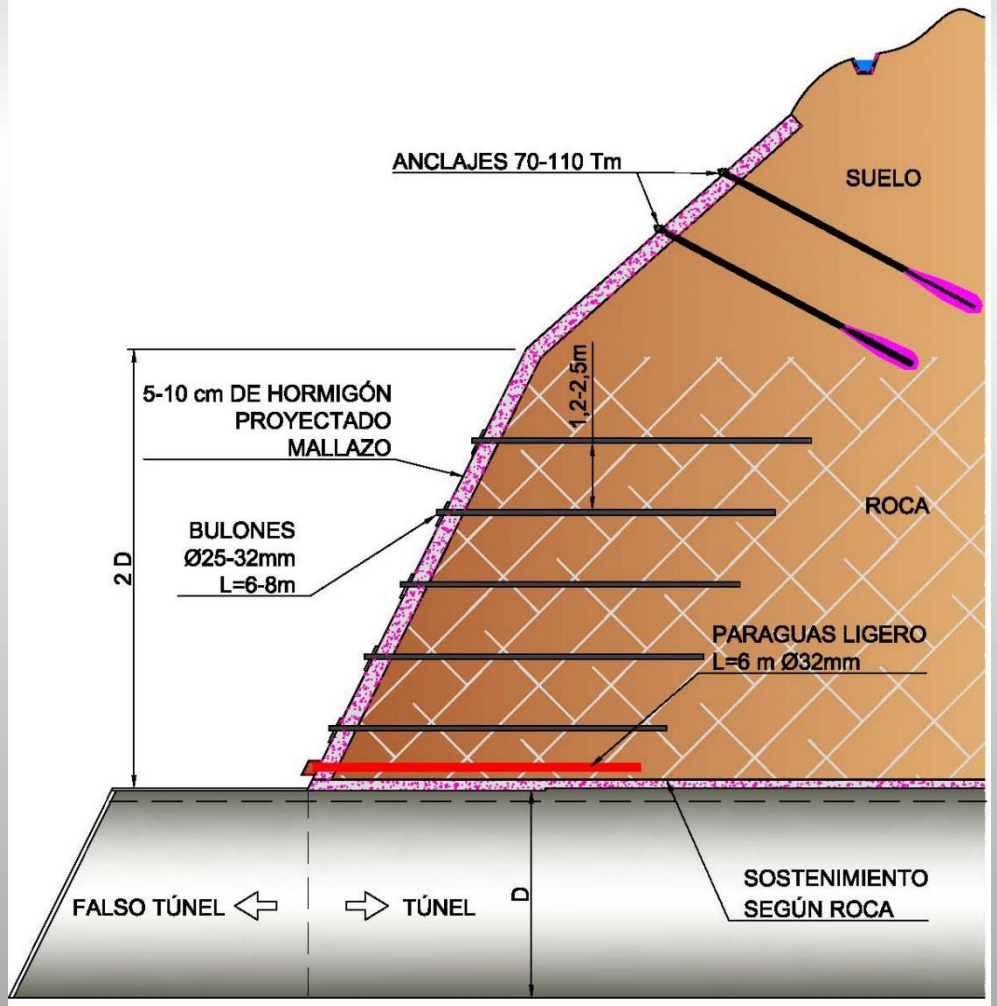


BOQUILLA EN ROCA SANA

SOLUCIONES TIPO:
Emboquilles en roca fracturada

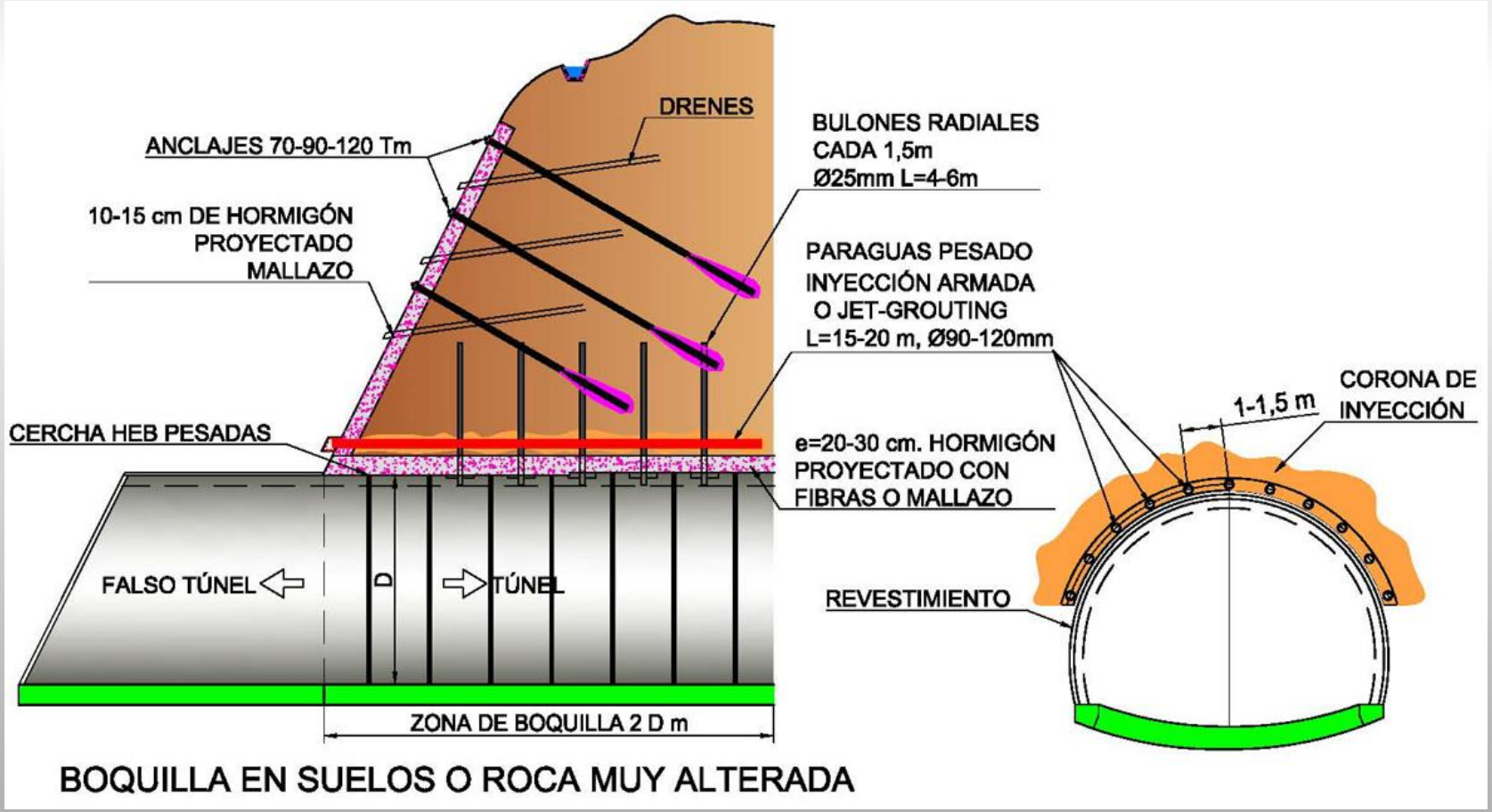


SOLUCIONES TIPO:
Emboquilles con suelo en zona superior y roca en zona inferior

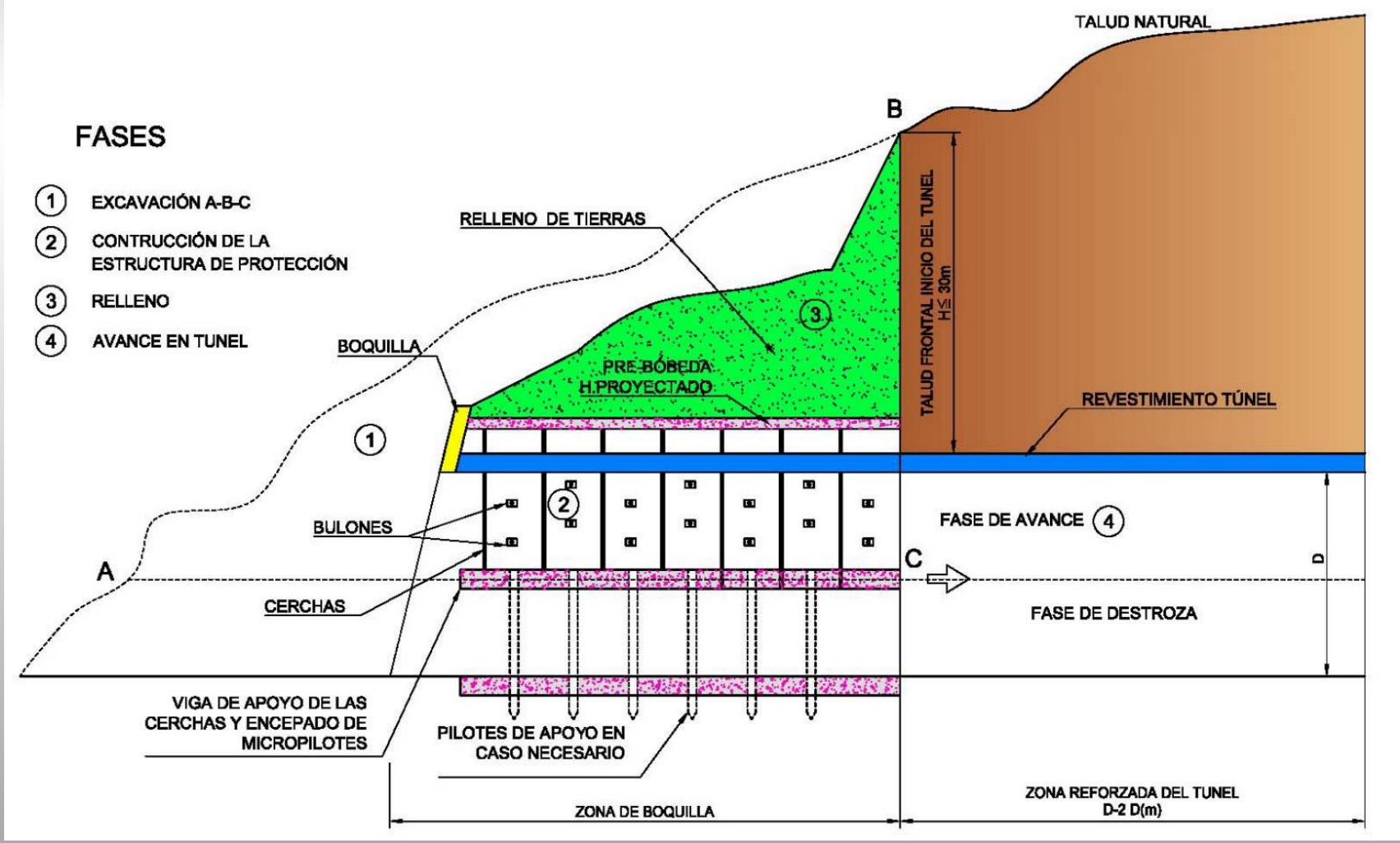


BOQUILLA EN SUELO Y ROCA

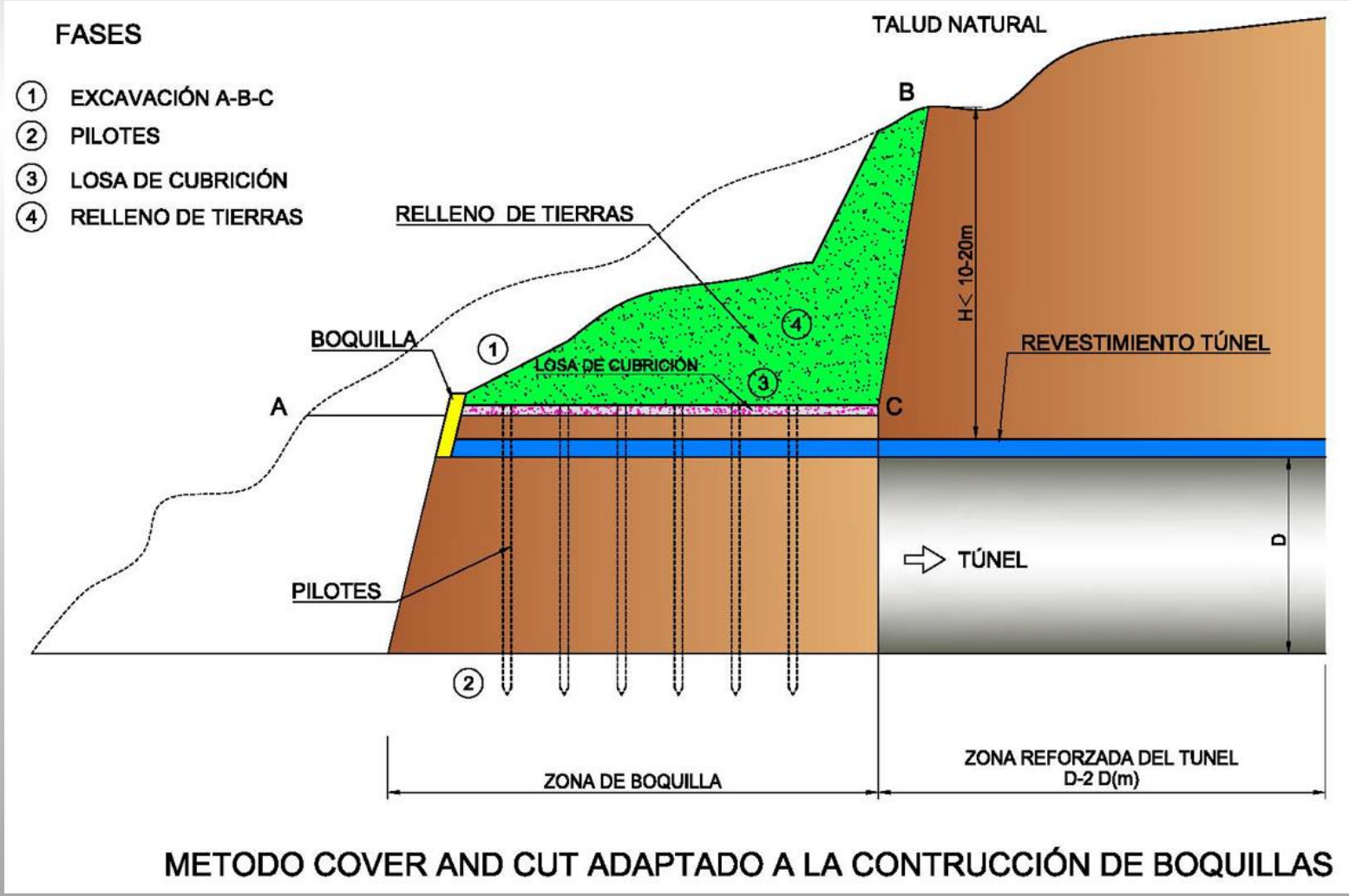
SOLUCIONES TIPO:
Emboquilles en suelo blando y/o roca muy alterada



SOLUCIONES TIPO:
Método "Cut and Cover"

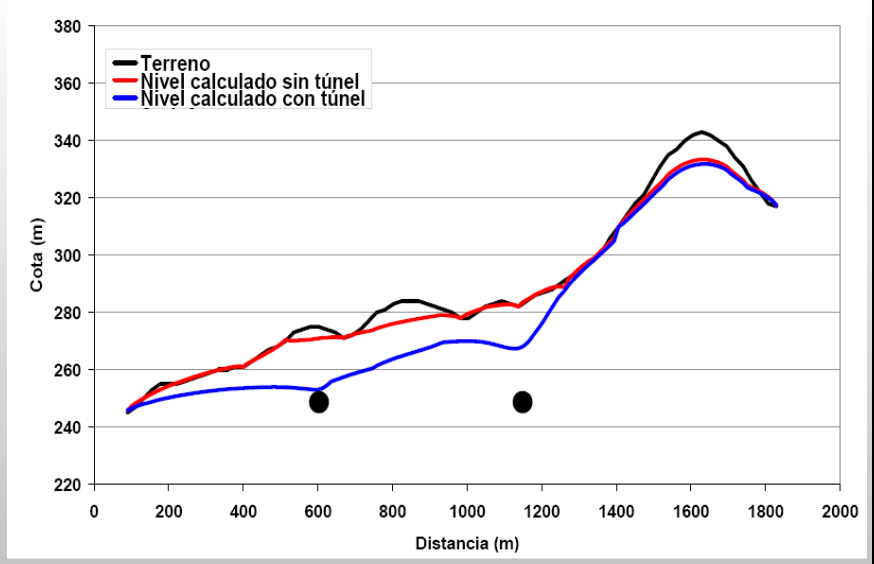


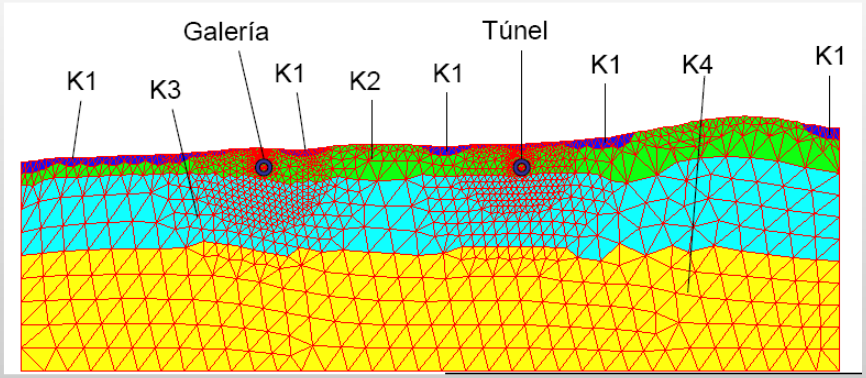
SOLUCIONES TIPO:
Método Cover and Cut



ANÁLISIS DE AFECCIONES AL ENTORNO

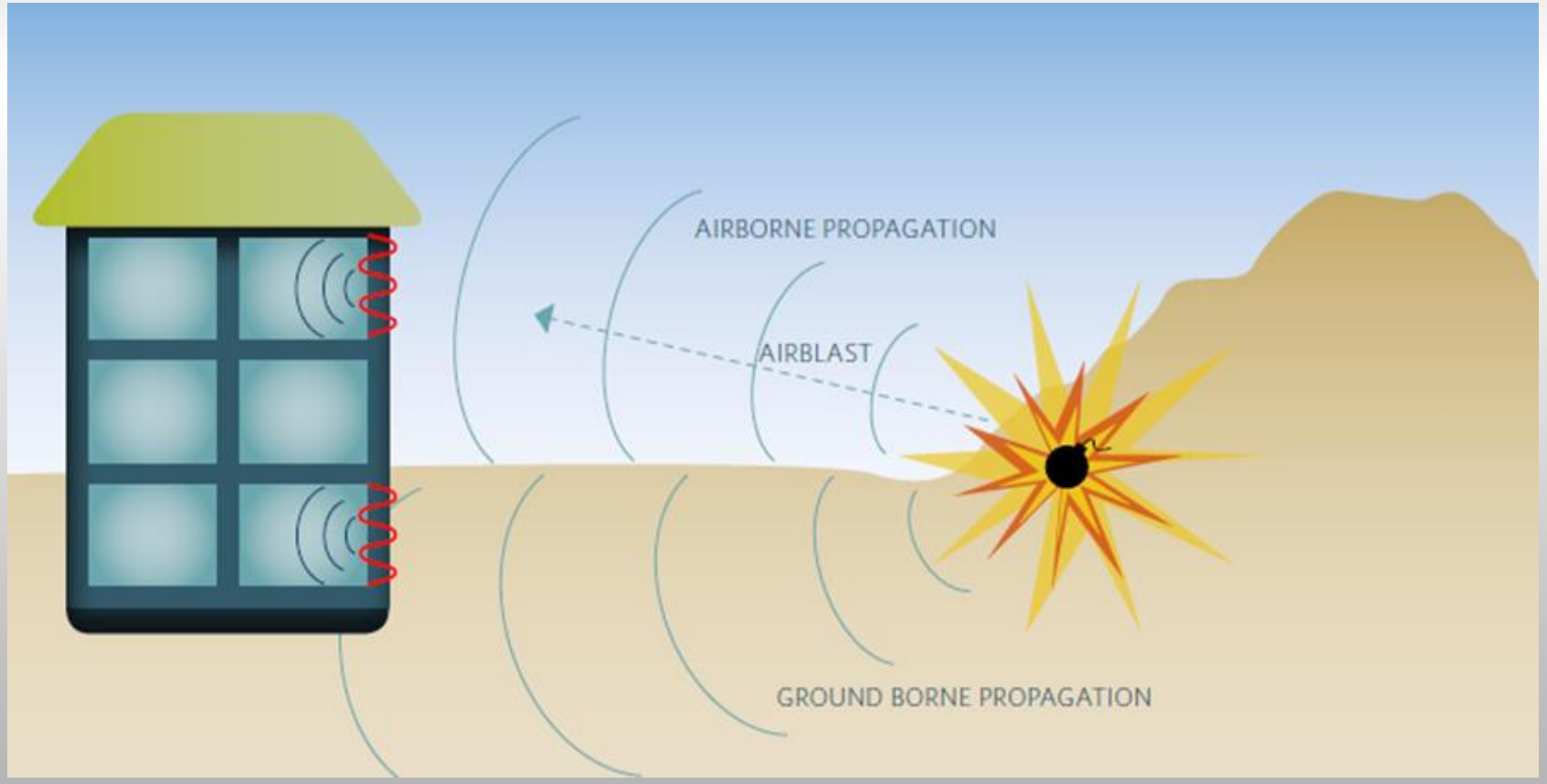
INFILTRACIONES DE AGUA AL TÚNEL



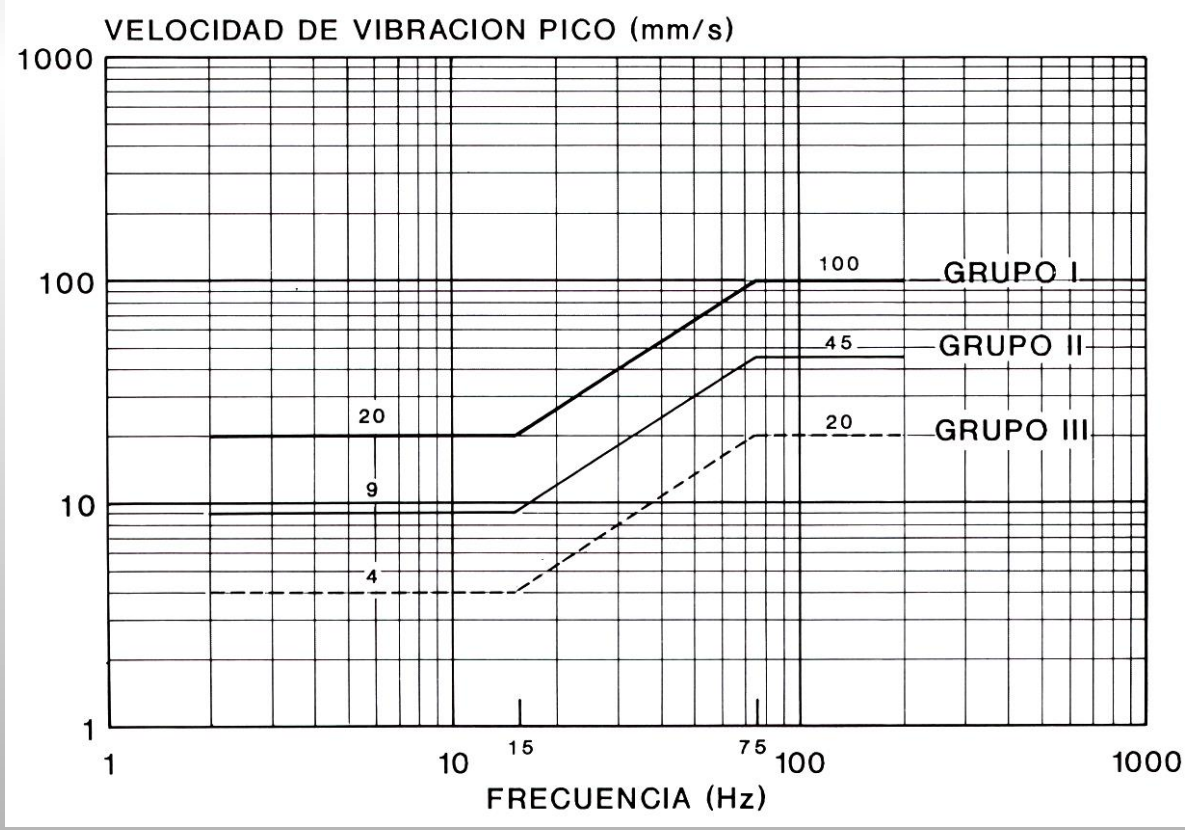


Malla de elementos finitos 2D y perfil del nivel freático regional antes y después de la construcción del túnel de Meirama y galería de servicio. Eje Atlántico de Alta Velocidad en el tramo Cerceda-Meirama (A Coruña).

VIBRACIONES



VIBRACIONES

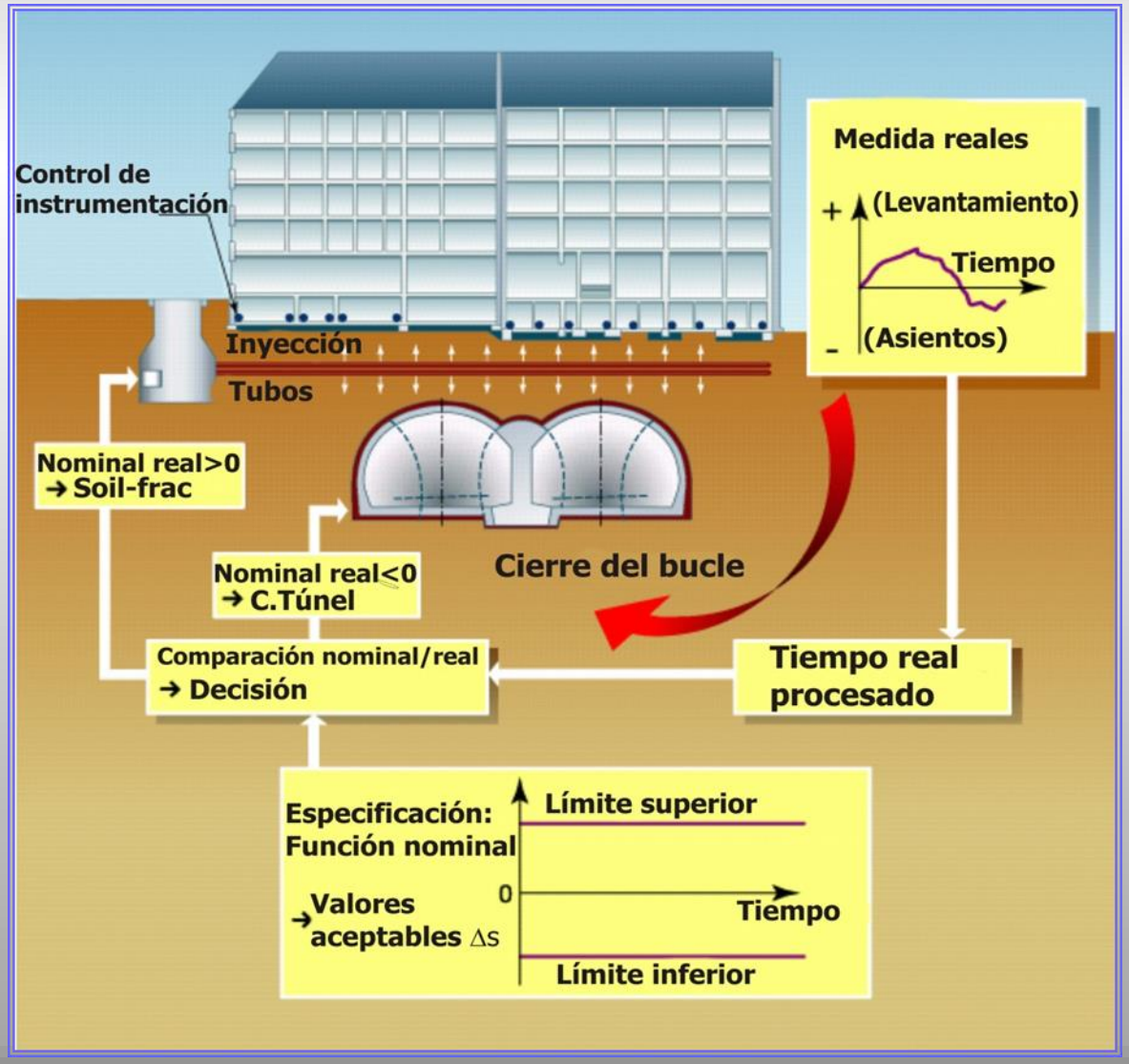


Grupo I: Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.

Grupo II: Edificios de viviendas, oficinas y centros comerciales.

Grupo III: Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico.

SUBSIDENCIAS



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LOS SISMOS

ZONAS DEL TÚNEL SUSCEPTIBLES DE SUFRIR DAÑOS EN UN SISMO

Sólo las zonas de boquilla, las de poca cobertera, las zonas de falla o y de mala calidad geotécnica sufren daños. Las razones que indica para explicar este comportamiento son las siguientes:

•Influencia de la profundidad: como se ha comentado con anterioridad, las ondas que principalmente provocan los daños son las ondas superficiales Rayleigh. Al propagarse exclusivamente por la superficie, las zonas de poca cobertera o las boquillas se ven afectadas, mientras que las zonas más profundas no sienten apenas sus efectos.

•Zonas de cruce de fallas: en los terremotos, las fallas importantes suelen movilizarse. Por ello, habitualmente, los túneles sufren daños en la zona en la que interceptan dichas fallas.

Zonas de terreno de poca calidad geotécnica: en estas zonas de los túneles los revestimientos suelen estar de por sí muy cargados. Por ello, en ocasiones un poco de carga adicional debida a la acción sísmica suele derivar en daños.

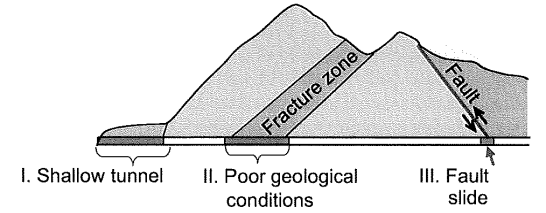


Fig. 12 Classification of damage patterns

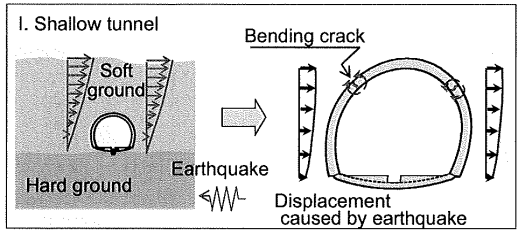


Fig. 13 Damage to shallow tunnels

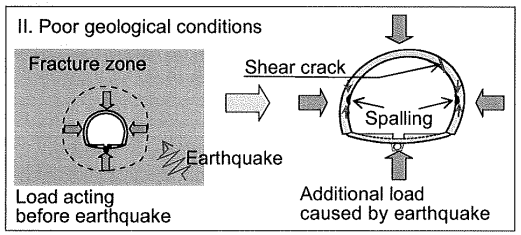


Fig. 14 Damage to tunnels in poor geological conditions

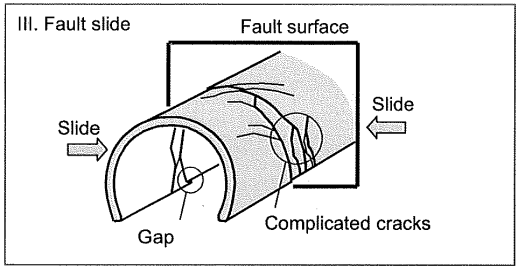


Fig. 15 Damage to tunnels caused by fault slide

ESTUDIO DE SHARMA Y JUDD (1991)

•Sharma y Judd (1991) estudiaron un gran número de terremotos, documentando los efectos producidos en los túneles. Los resultados más interesantes de estos autores son los que se reflejan a continuación en forma de tabla.

•De la tabla de Sharma y Judd, pueden establecerse la conclusión de que ***los daños son mayores en los túneles poco profundos que en los más profundos***.

Profundidad del túnel (m)	Magnitud del daño			
	Fuerte	*Moderado*	*Ligero*	*Sin Daños*
<	10	9	14	24
50 –	2	1	2	12
100 –	1	0	3	6
200 –	1	2	3	13
–	0	3	4	4
–	0	1	9	2
1000 –	0	1	0	4
TOTAL CASOS ⇒	14	17	35	65

TABLA: Efecto de la cobertera (m) sobre el daño sufrido por los túneles tras los terremotos (Sharma y Judd, 1991).

ESTUDIO DE DOWDING Y ROZEN(1978)

•Otro estudio interesante es el debido a Dowding y Rozen (1978). Estos autores relacionaron la aceleración sísmica generada por el terremoto, con los daños producidos por el mismo, resultando las siguientes conclusiones, que se resumen a continuación:

RANGO DE MOVIMIENTOS MÁXIMOS DEL TERRENO A NIVEL DE SUPERFICIE		CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS DAÑOS CONSTATADOS
a (g)	v (cm/s)	
< 0,19	< 20	No hay daños
0,19 - 0,25	20 - 40	Algunos casos de agrietamientos menores en túneles revestidos de hormigón.
0,25 - 0,52	40 - 80	Daños menores y un caso de colapso parcial en un túnel revestido de ladrillos, debido a deslizamientos.
> 0,52	> 94	Varios casos de daños

•La tabla anterior establece un criterio claro para determinar los posibles efectos de los terremotos sobre los túneles, que es el dato de que para aceleraciones < 0,19 g no se espera que los terremotos produzcan afecciones en los túneles.

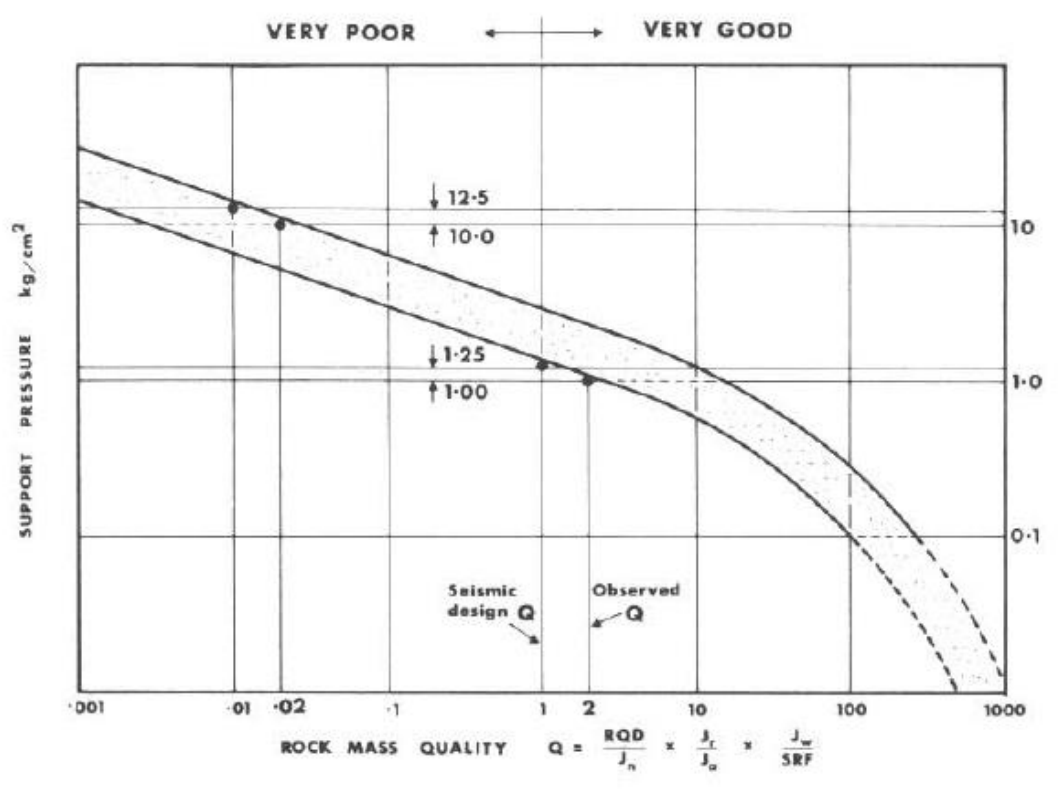
CRITERIO DE REFUERZO DE BARTON

• Para la aplicación del índice Q en diseños sísmicos de soportes, Barton (1984) propone incrementar el valor del SRF en un 100 %, lo que grosso modo se traduce en una reducción del valor habitual de Q a la mitad:

Q (diseño sísmico) = ½ Q (diseño estático)

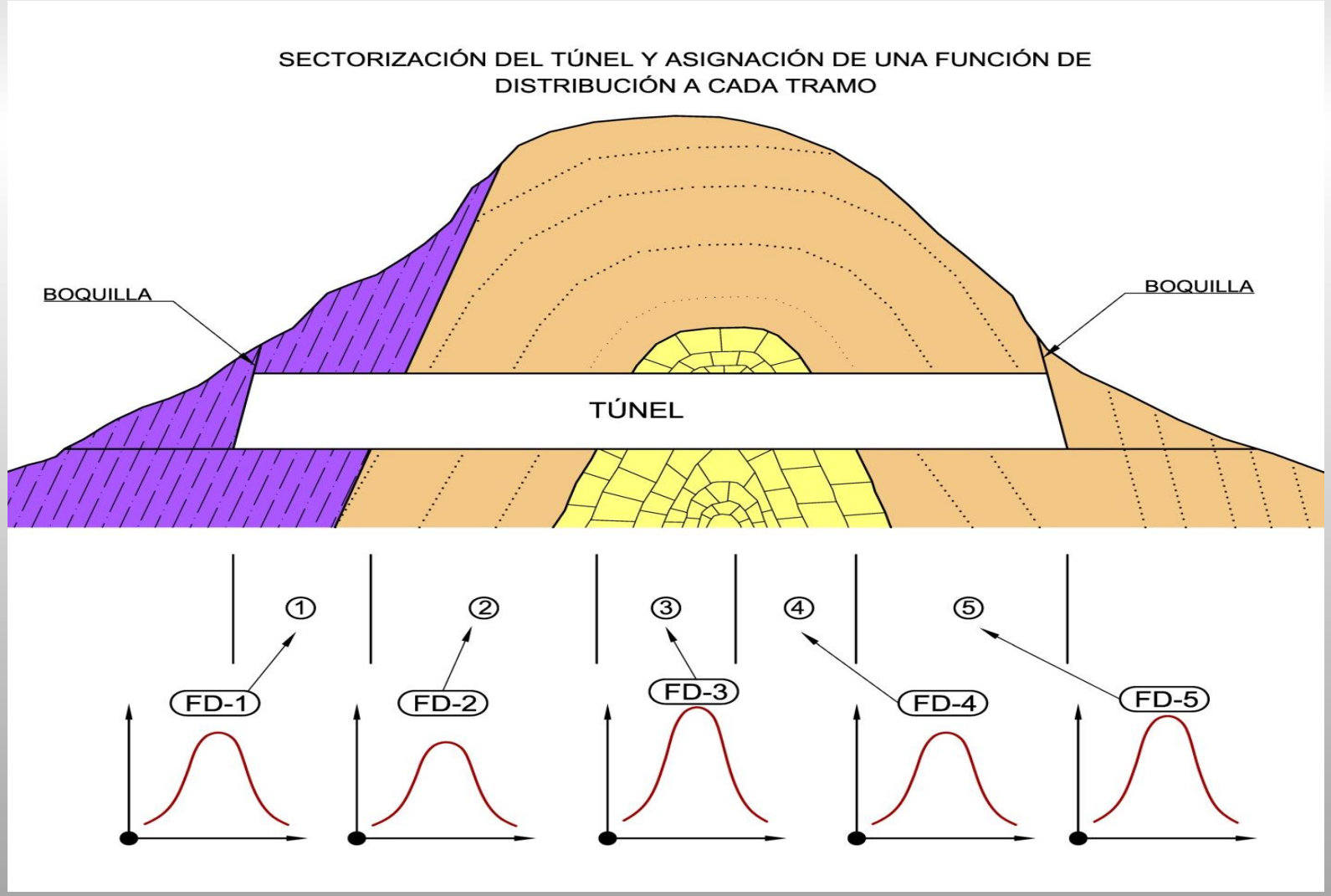
•

•En términos de presión de sostenimiento, esta regla supone incrementar su valor en un 25 %, como se ilustra en el gráfico adjunto:

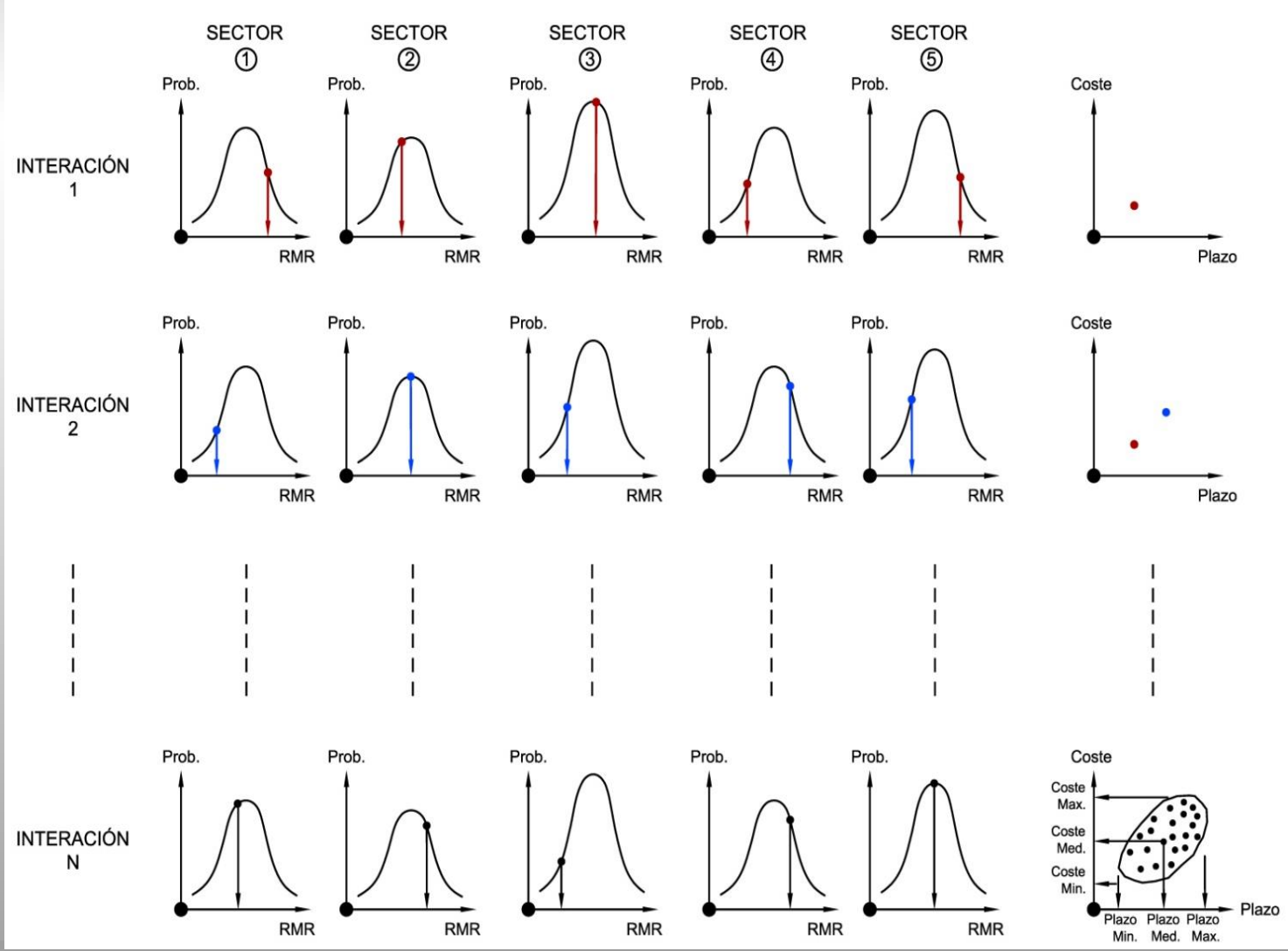


ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS DESVIACIONES DEL MONTO ECONÓMICO

SECTORIZACIÓN DEL TÚNEL Y ASIGNACIÓN DE FUNCIÓN DISTRIBUCIÓN CALIDAD GEOMECANICA



GENERACIÓN ESTADÍSTICA DE EVENTOS ALEATORIOS



GENERACIÓN DEL DIAGRAMA DE VARIACIÓN DE COSTE Y PLAZO

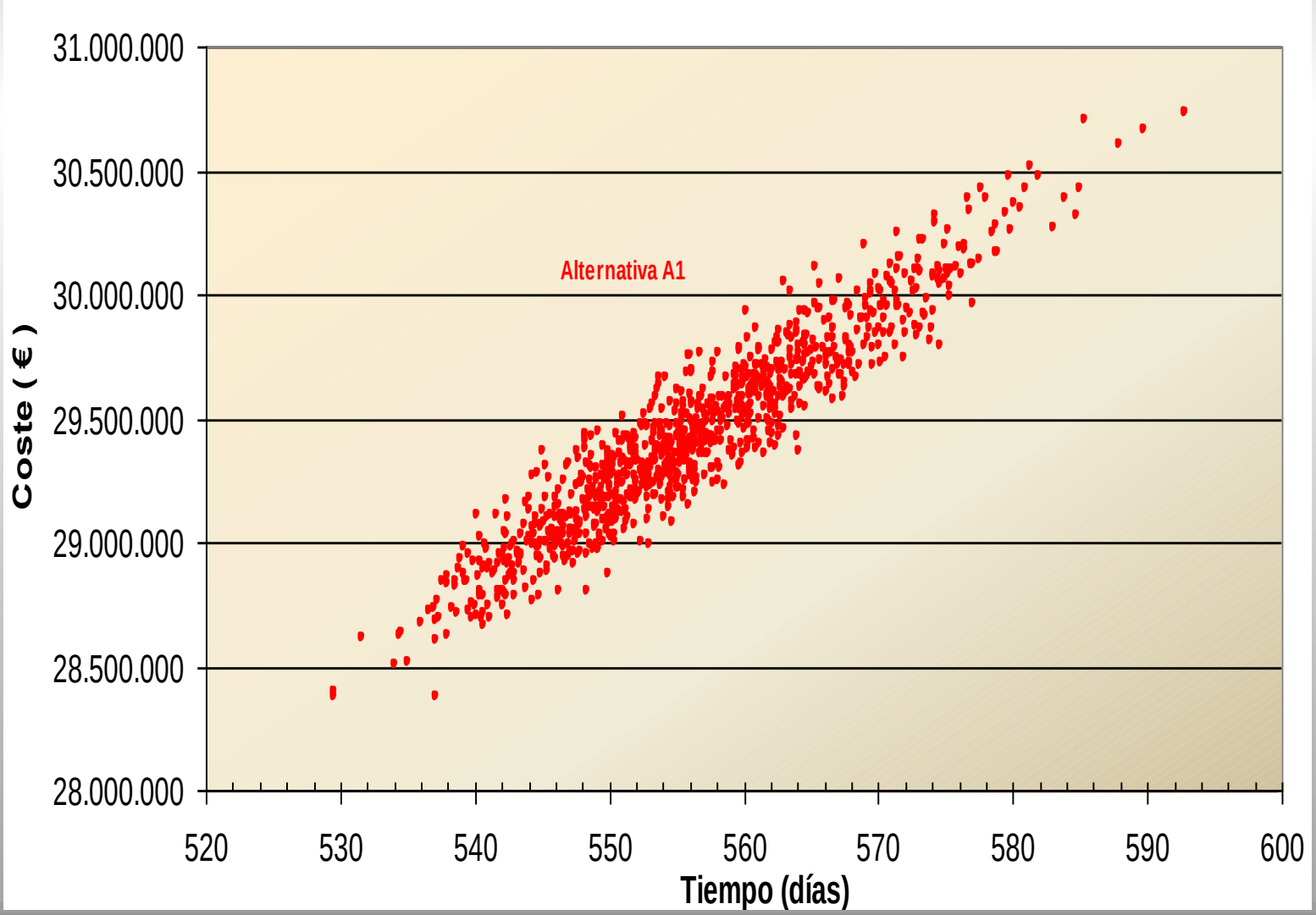
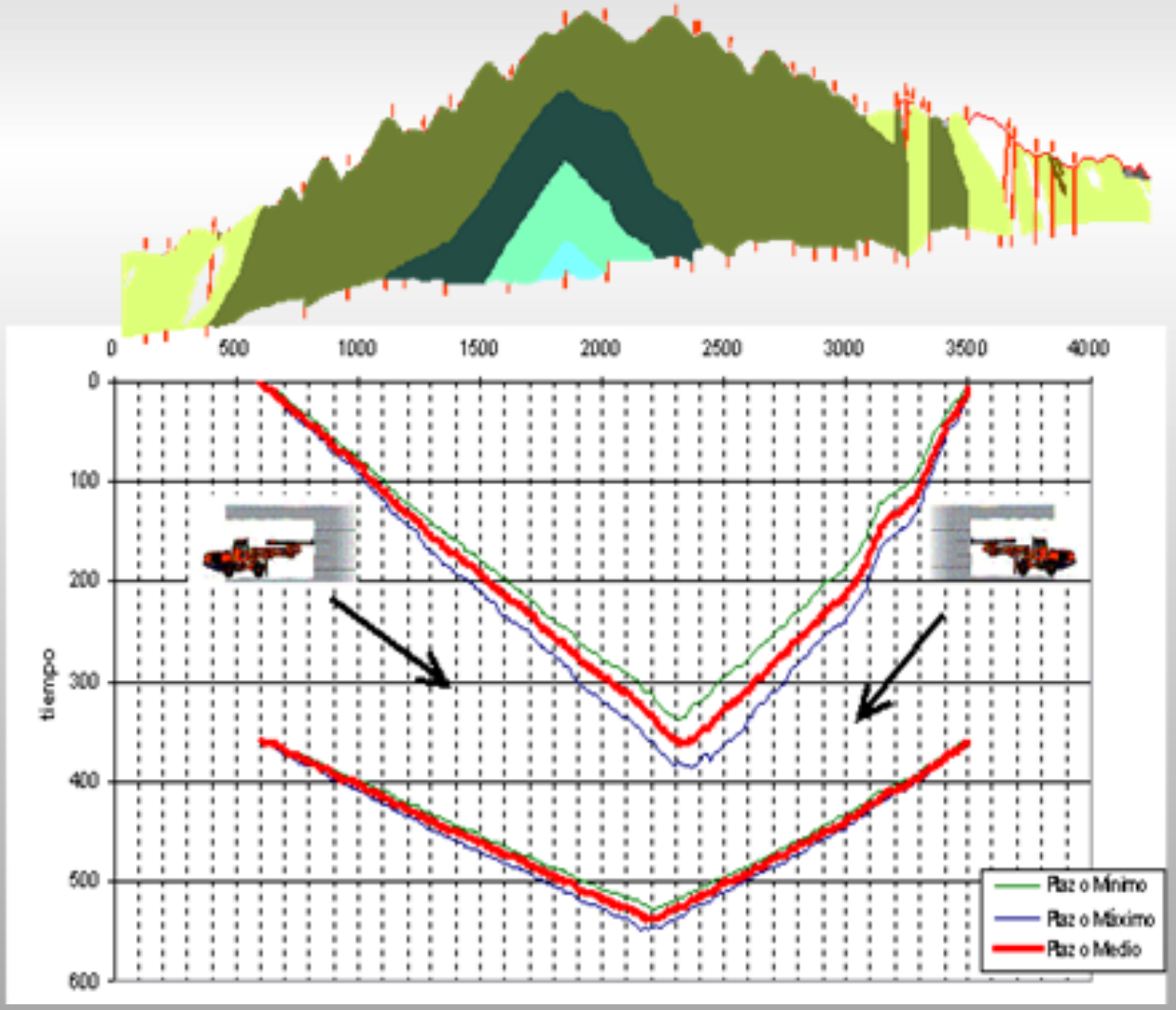


DIAGRAMA ESPACIO-TIEMPO



TUNELES Y GEOMECANICA

TÚNELES Y GEOMECÁNICA, S.L.

C/ Alfonso Gómez, 17 – 3ª Pl. Ofic. 11
28037 Madrid - España
Tel. 810 512 887
www. tunelesygeomecanica.es