

TUNELES DE ADUCCIÓN

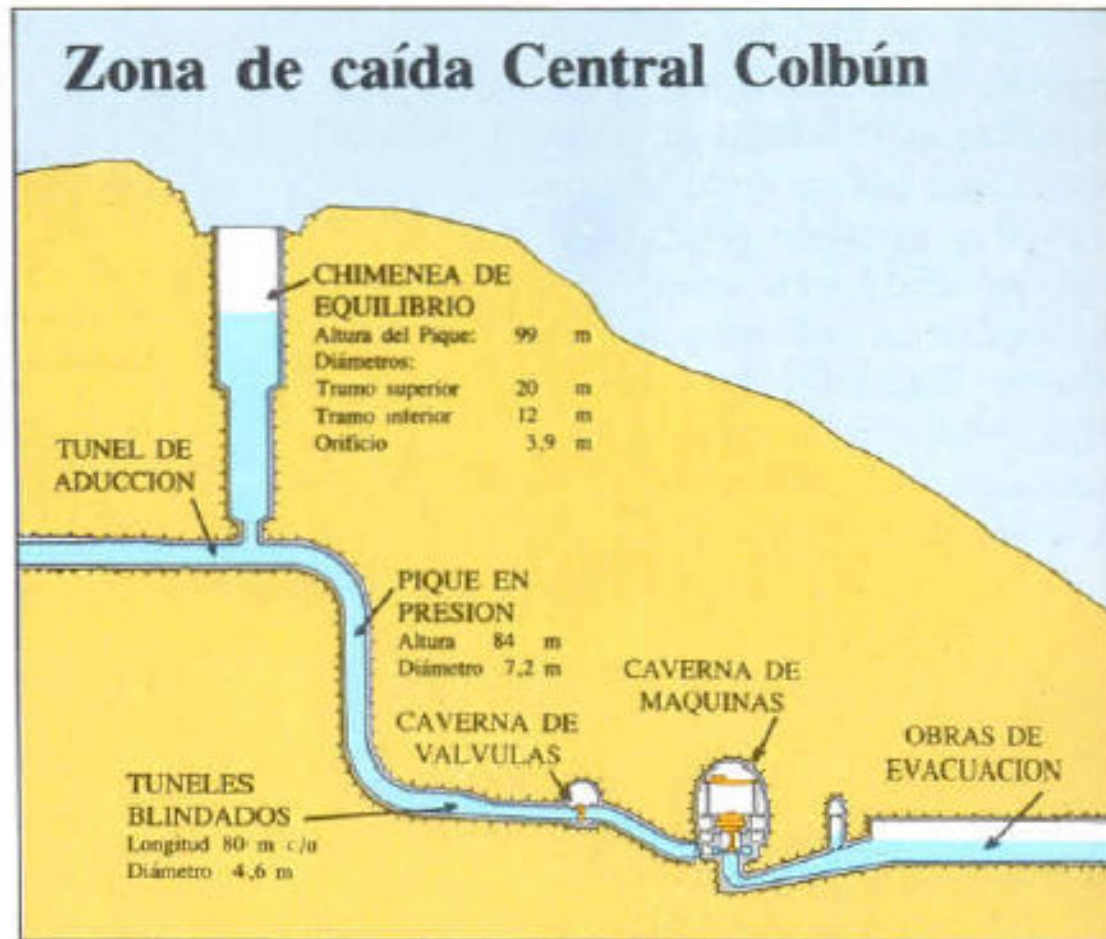


Se usan para acortar la longitud de una aducción o cuando no es posible la construcción de un canal, por razones topográficas o geológicas (relación de costo de 3:1 con un canal). Pueden ser diseñados a **escurrimiento libre (acueducto) o en presión.**

Sección transversal: su forma y revestimiento dependen, en gran medida, de la presión a la que está sometida el agua que escurre por su interior.

Excavación mínima posible: 2,0 m de ancho por 2,2 m de alto (rectangular) y 3,2 a 3,5 m (sección acueducto)

Algunos ejemplos....





**Túnel de Aducción
(revestido con hormigón)**

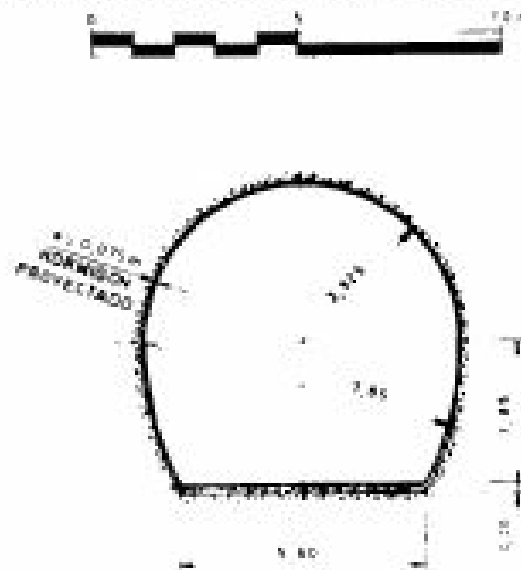
$D = 8 \text{ m}$

$Q_d = 280 \text{ m}^3/\text{s}$

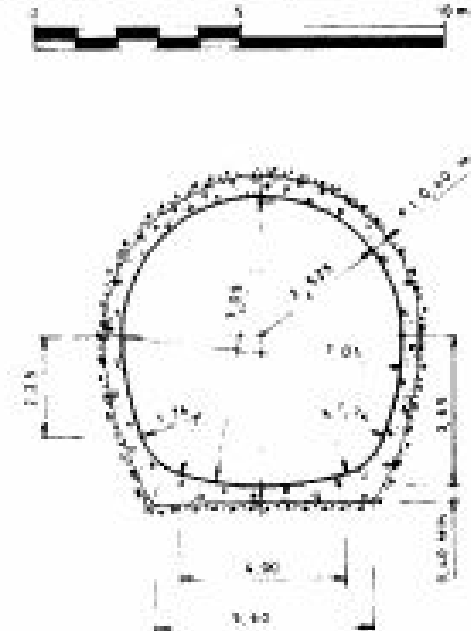


*Central Colbún.
Túnel blindado
en construcción,
montaje de la
bifurcación.*

SECCION REVESTIDA CON HORMIGÓN PROYECTADO



SECCION REVESTIDA CON HORMIGÓN



Túnel de Aducción

Caudal de Diseño = 140 m³/s

Forma Sección : herradura modificada

Revestimiento: Hormigón proyectado (shotcrete) y radier de hormigón

Diámetro = 7,7 m (7,05 m en secciones con revestimiento de hormigón)

Pendiente : 0,0020

Fuente: Proyecto Central Pehuenche. Descripción General. 1982. ENDESA.

Túneles con escurrimiento libre (Acueducto)

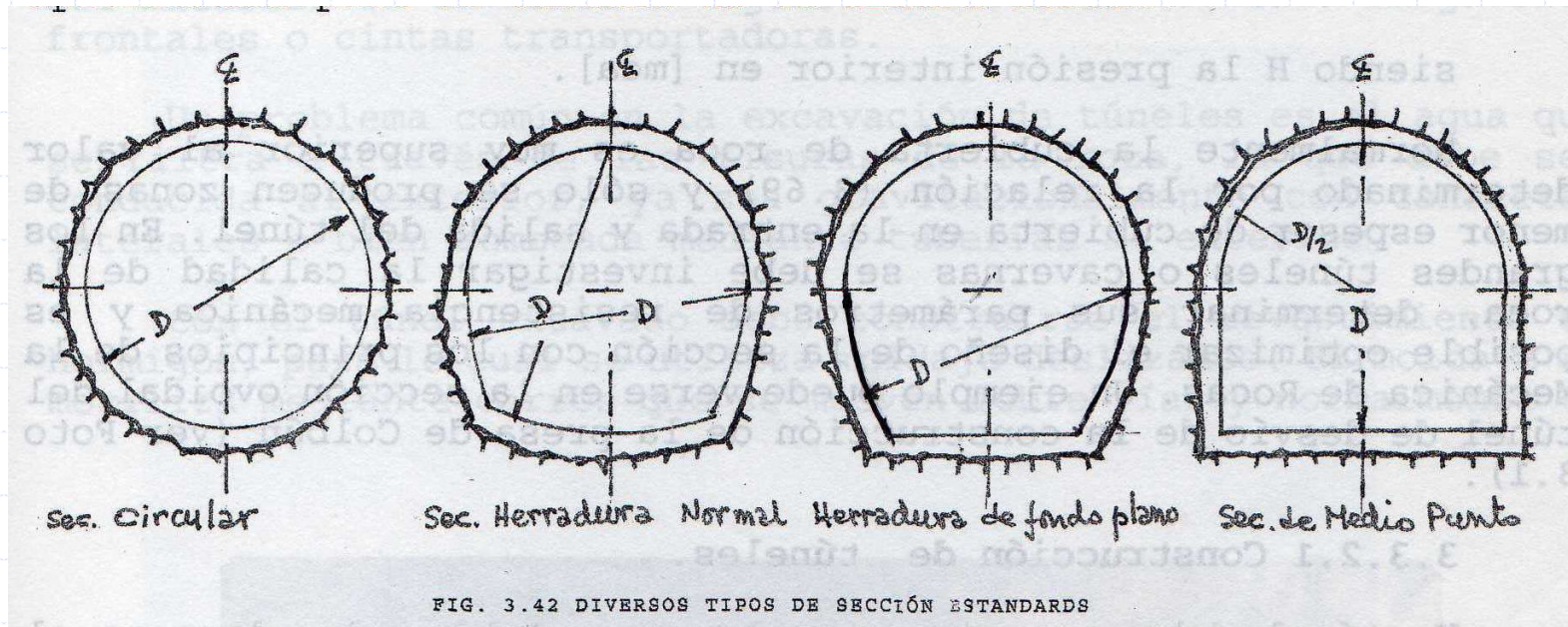
La sección excavada está sometida a la presión vertical de la cobertura de roca que existe sobre ella y a una presión horizontal, que es producto de la anterior, pero que es aproximadamente $1/10$ de su valor.

Desde el punto de vista estructural, la sección que mejor se adapta a esta distribución de tensiones es una elipse con eje mayor vertical, la que da gran curvatura a los sectores sometidos a alta presión, y reducida curvatura a los de baja presión.

Como esta sección es de difícil construcción, se la ha reemplazado por aquella que, teniendo una base plana para posibilitar el movimiento vehicular por su interior, se le parezca más. La sección ideal es la sección **ovoidal** (ej: túneles de desvío, embalse Colbún), en la práctica, es muy utilizada la sección de **herradura normal o la de fondo plano**, o bien variantes de esta.

Para facilitar la construcción y el posterior mantenimiento del túnel, la base (solera o radier) de esta sección se empareja, rellenando las concavidades con los desechos de la excavación ("marina"), para luego pavimentarla con un espesor de 0,15 a 0,30 m de hormigón.

Tipos de Sección de Túnel



También se pueden utilizar conductos de sección rectangular en secciones que se construyen a tajo abierto, como es el caso de colectores de aguas lluvias.

Condiciones o criterios de diseño

Si un túnel opera con flujo libre (no completamente lleno), se comportará como canal (acueducto). Si su sección es de tipo herradura normal, la máxima eficiencia (mínima pérdida de carga) en el transporte del flujo se conseguirá con aquella altura h de aguas que haga máximo el valor del denominador de la fracción $J = (Q n / A R_h^{2/3})^2$.

Para este tipo de sección, el mencionado objetivo se logra con **$(h / D) = 0,94$** .

Sin embargo, en la práctica, es recomendable adoptar un valor menor para considerar el efecto de olas y de la ventilación de la parte superior del túnel, siendo conveniente diseñar para **$0,7 < (h / D) < 0,8$** .

Para asegurar la estabilidad del escurrimiento se recomienda verificar que el escurrimiento cumpla **$Bn/Bc (En/Ec) \geq 1,1$** .

Se debe verificar que el tamaño seleccionado cumpla con el diámetro mínimo constructivo (del orden de 3,2 a 3,5 m)

En túneles que no estén dotados de revestimiento es necesario limitar la velocidad del escurrimiento para evitar la erosión. La velocidad máxima admisible depende de las características geológicas y geotécnicas de la roca en que se excava el túnel.

Es recomendable respetar algunos valores límites de la velocidad del flujo por el interior de los túneles, los que son producto de la buena práctica de la ingeniería y de la experiencia acumulada a través del tiempo. Estas velocidades son :

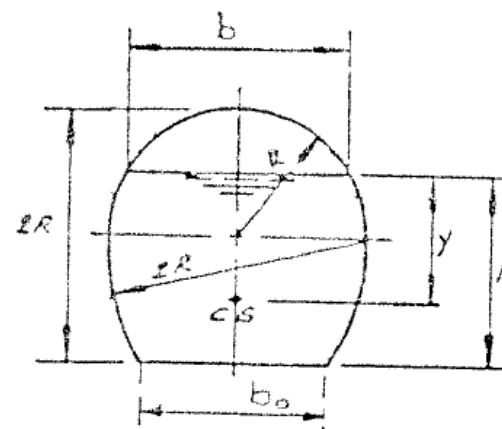
TIPO MATERIAL	VEL . MÁX. RECOMENDABLE (m/s)
Roca en buen estado	4,5
Roca descompuestas	2,5

- **Coeficientes de rugosidad** (es válido el uso de los señalados para el caso de túneles en presión).
- **Necesidad de sostenimiento** (aplica lo que se indica para túneles en presión).
- **Portales de entrada y salida** (aplica lo que se indica para túneles en presión).

h/R	A/R^2	R_h/R	b/R	y/R
0.05	0.0746	0.0473	1.5199	0.0248
0.10	0.1519	0.0898	1.5721	0.0494
0.15	0.2318	0.1286	1.6208	0.0737
0.20	0.3140	0.1642	1.6661	0.0979
0.25	0.3983	0.1971	1.7081	0.1218
0.30	0.4847	0.2278	1.7470	0.1456
0.35	0.5730	0.2564	1.7829	0.1693
0.40	0.6629	0.2833	1.8158	0.1929
0.45	0.7545	0.3087	1.8458	0.2165
0.50	0.8475	0.3326	1.8730	0.2400
0.55	0.9418	0.3553	1.8974	0.2635
0.60	1.0372	0.3767	1.9192	0.2869
0.65	1.1336	0.3971	1.9383	0.3104
0.70	1.2310	0.4164	1.9547	0.3339
0.75	1.3291	0.4347	1.9686	0.3574
0.80	1.4278	0.4521	1.9799	0.3809
0.85	1.5270	0.4687	1.9887	0.4045
0.90	1.6266	0.4843	1.9950	0.4282
0.95	1.7265	0.4992	1.9987	0.4520
1.00	1.8264	0.5133	2.0000	0.4759
1.05	1.9264	0.5266	1.9975	0.4999
1.10	2.0261	0.5392	1.9900	0.5241
1.15	2.1253	0.5507	1.9774	0.5485
1.20	2.2238	0.5614	1.9596	0.5731
1.25	2.3212	0.5712	1.9365	0.5980
1.30	2.4173	0.5800	1.9079	0.6232
1.35	2.5119	0.5878	1.8735	0.6488
1.40	2.6046	0.5944	1.8330	0.6748
1.45	2.6951	0.6000	1.7861	0.7013
1.50	2.7831	0.6043	1.7321	0.7284
1.55	2.8682	0.6072	1.6703	0.7560
1.60	2.9499	0.6088	1.6000	0.7844
1.65	3.0280	0.6088	1.5199	0.8135
1.70	3.1017	0.6071	1.4283	0.8436
1.75	3.1706	0.6034	1.3229	0.8747
1.80	3.2337	0.5974	1.2000	0.9072
1.85	3.2902	0.5885	1.0536	0.9412
1.90	3.3385	0.5758	0.8718	0.9772
1.95	3.3763	0.5567	0.6245	1.0160
2.00	3.3972	0.5070	0.0000	1.0596

Sección Herradura de Fondo Plano.

Elementos geométricos



A = AREA MOJADA

R_h = RADIO HIDRAULICO

b = ANCHO SUPERFICIAL

$$b_0/R = 1.4641$$

Parámetros básicos de diseño

- **Definir su trazado y posición (alineamiento vertical)**

Es función de las características topográficas, geológicas y geotécnicas de los macizos rocosos y del proceso constructivo a utilizar.

- **Definir la necesidad de usar revestimiento**

Los túneles en presión se revisten por dos motivos:

(1) para reducir las pérdidas de carga y

(2) para evitar el riesgo de hidrofracturamiento, erosión y filtraciones excesivas

n roca : 0,025 – 0,040

n hormigón proyectado: 0,018 – 0,025

n hormigón: 0,012 – 0,016

Normalmente, la decisión de revestir o no un túnel se basa en un análisis de índole económico.

Rugosidad de un túnel no revestido

En régimen turbulento rugoso, f , depende solamente de la rugosidad relativa (D_e/k_e) y se puede aplicar la relación de Prandtl-von Karman:

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 * \log\left(\frac{D_e}{K_e}\right) + 1,14$$

D_e : Diámetro equivalente

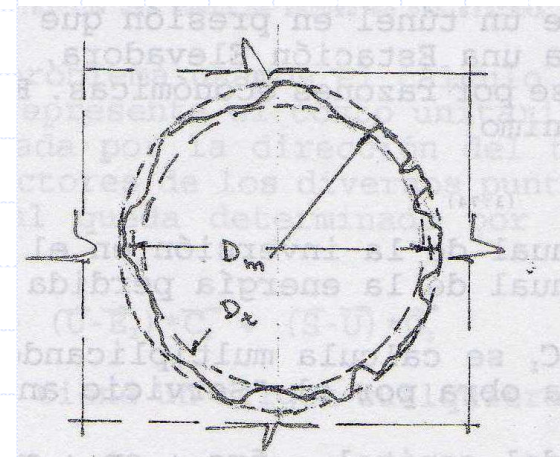
k_e : tamaño equivalente de las asperezas de la pared

$$K_e = D_m - D_t$$

D_m : diámetro que representa la sección media excavada

D_t : diámetro teórico interior libre

$$K_e / D_m = 1 - D_t / D_m = 1 - (A_t / A_m)^{1/2}$$



Rahm (10 túneles en USA y 8 en Suecia)

$$\sqrt{\frac{1}{f_m}} = 4 * \log\left(\frac{D_m}{K_e}\right) - 0,92$$

Proyecto	Tipo de roca	D _m	k _e	D _m /k _e	f _t	f _m
Cresta	G	8,81 [m]	0,55 [m]	16,4	0,0645	0,075
Wes Point	"	5,12	0,52	10,0	0,1053	0,080
Bear River	"	3,32	0,21	16,4	0,0645	0,066
Balch	"	4,48	0,36	13,0	0,0802	0,079
Haas	"	4,66	0,46	10,7	0,0980	0,068
Kings River	"	4,85	0,30	14,7	0,0704	0,071
Cherry	"	4,21	0,24	17,3	0,0614	0,090
Jai Bird	"	4,78	0,21	21,3	0,0519	0,077
Apalachia	Cta-P	7,13	0,43	16,7	0,0634	0,095
Alfta	G-Gn	6,46	0,30	17,3	0,0614	0,086
Harsprånget	G	16,09	0,55	28,6	0,0416	0,052
Järpstrommen	P-Esqu	12,04	0,49	23,8	0,0476	0,048
Krokstrommen	G	11,34	0,64	17,9	0,0548	0,048
Porjus I	G-Gn	8,56	0,58	14,9	0,0704	0,073
Porjus II	"	8,84	0,85	10,2	0,1031	0,055
Selsfore	G-P	10,12	0,70	14,9	0,0704	0,114
Sillse	Gn	2,90	0,36	7,8	0,1425	0,102
Sunnerstaholm	G-Gn	6,77	0,61	11,6	0,0885	0,104
Tipo de roca						
Granito.....G						
Cuarcita.....Cta						
Pizarra.....P						
Gneiss.....Gn						
Esquisto.....Esqu						

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD (n, f)

Rugosidad de un túnel revestido (lined)

El flujo en un túnel es normalmente turbulento y se puede utilizar la formula de Manning (n) o la de Darcy (f). La equivalencia entre f y n, se puede expresar

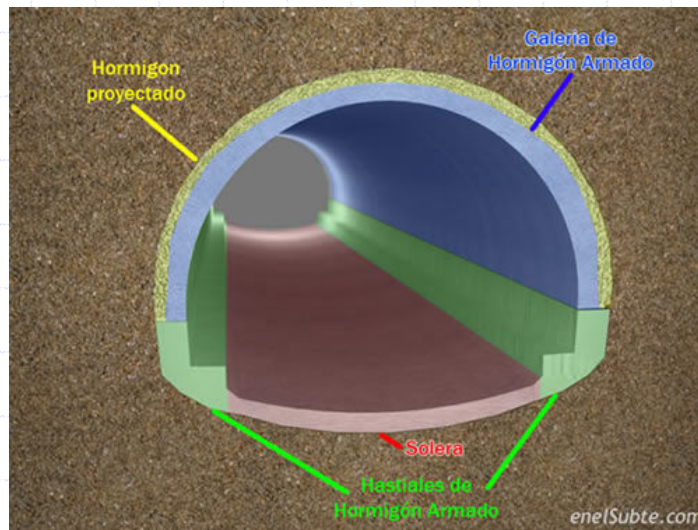
$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{R_h^{1/6}}{n \cdot \sqrt{g}}$$

$$f = \frac{8 \cdot n^2 \cdot g}{R_h^{1/3}}$$

$$f = 124,45 \cdot \frac{n^2}{D^{1/3}} \quad \text{Sección circular}$$

RUGOSIDAD PONDERADA

Cuando la sección transversal del túnel está parcialmente revestida o tiene revestimientos de distinto tipo en el radier y las paredes (*por ejemplo, radier de hormigón y paredes y bóveda con hormigón proyectado*), la pérdida de carga se calcula aplicando Manning, pero con un **coeficiente de rugosidad ponderado**, que se calcula con la siguiente fórmula:



$$n_{\text{equiv}} = \left(\sum \left(p_i n_i^{3/2} / p \right) \right)^{2/3}$$

En que los p_i son los tramos de perímetros con rugosidad n_i constituyentes del perímetro mojado total p .

Hidrofracturamiento

Consiste en la apertura de fisuras y el desplazamiento de la roca que rodea al túnel, se puede producir cuando la presión existente en su interior supera los esfuerzos de compresión a que se encuentra sometido el macizo rocoso. Este fenómeno debe evitarse, ya que su ocurrencia puede ocasionar el colapso del túnel.

Método simplificado (Benson,1989)

$$Hr = \frac{1,3 \cdot P / \gamma - H_s \cdot \gamma_s}{\gamma_r}$$

No hay riesgo de hidrofracturamiento, si sobre la clave del túnel existe un espesor de roca superior a Hr.

Donde:

Hr: espesor de la cobertura de roca

P: presión estática existente en el interior del túnel

γ : peso específico del agua

Hs: espesor de la cobertura de roca

γ_s : peso específico del suelo

γ_r : peso específico del macizo de roca

En túneles excavados bajo laderas (cuyo ángulo de inclinación con la horizontal sea α), es posible estimar H_r según lo siguiente:

$$H_r = \frac{1,3 \cdot P / \gamma}{\gamma_r \cdot \cos \alpha}$$

Donde:

H_r : espesor de la cobertura de roca

P : presión estática existente en el interior del túnel

γ : peso específico del agua

α : ángulo de inclinación c/r a la horizontal

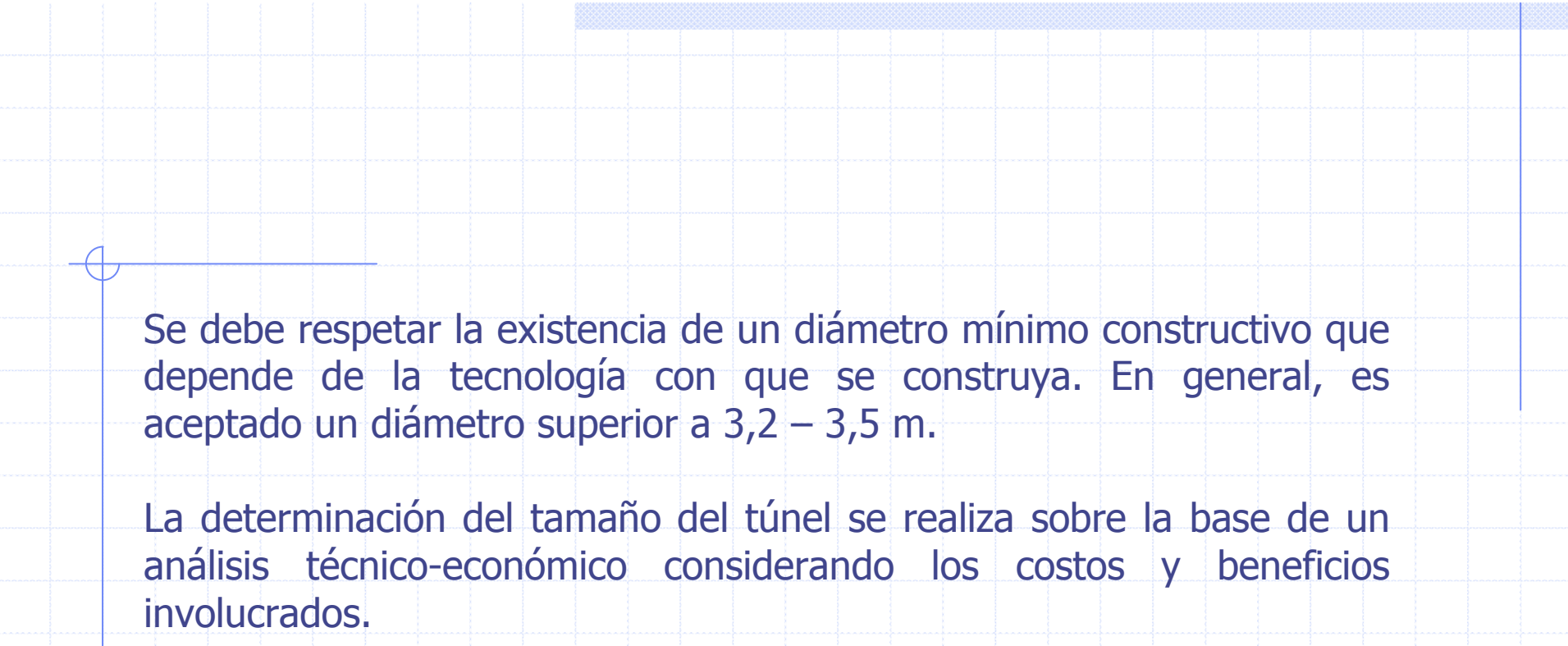
En caso que exista riesgo de hidrofracturamiento y no sea posible evitar este fenómeno modificando la posición del túnel, es necesario utilizar revestimientos metálicos (blindajes de acero)

Tamaño y forma de la sección

El tamaño y la forma de la sección transversal de un túnel en presión, se determina en base a consideraciones similares a las de un túnel acueducto.

Es recomendable respetar algunos valores límites de la velocidad del flujo por el interior de los túneles, los que son producto de la buena práctica de la ingeniería y de la experiencia acumulada a través del tiempo. Estas velocidades son :

TIPO DE TÚNEL	VEL . MÁX. RECOMENDABLE (m/s)
Roca expuesta, solera de concreto	3,0
Perímetro con h. proyectado, solera de hormigón	4,0
Revestimiento de hormigón con moldes de acero	6,0
Revestimiento de palastro	10,0



Se debe respetar la existencia de un diámetro mínimo constructivo que depende de la tecnología con que se construya. En general, es aceptado un diámetro superior a 3,2 – 3,5 m.

La determinación del tamaño del túnel se realiza sobre la base de un análisis técnico-económico considerando los costos y beneficios involucrados.

Diseño o determinación del sostenimiento

Por sostenimiento, se entienden las obras necesarias para asegurar la estabilidad estructural de una excavación subterránea, tales como: pernos, hormigón proyectado, mallas de acero, marcos de refuerzo, etc.).

A nivel de prefactibilidad, incluso factibilidad, las características del sostenimiento se pueden estimar en función del tamaño del túnel y de la clasificación geotécnica del macizo rocoso.

Criterios de clasificación:

RQD: Rock quality designation (Don Deere)

RMR: Rock mass rating (Beniawsky)

Índice Q: Rock mass quality (Barton) o **Q de Barton**

Índice Q de Barton

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

$\frac{RQD}{J_n}$ Representa en tamaño de las rocas presentes en el macizo

$\frac{J_r}{J_a}$ Representa la fricción existente entre los bloques de roca

$\frac{J_w}{SRF}$ Influencia del estado tensional del macizo

Definido Q y el tamaño relativo del túnel (D / ESR, ESR: parámetro que depende del tipo de excavación), se puede estimar la necesidad de sostenimiento mediante el uso de un gráfico como el siguiente;

Valores del índice ESR de la Clasificación Q

	Tipo de excavación	ESR
A	Labores mineras de carácter temporal, etc.	2-5
B	Galerías mineras permanentes, túneles de centrales hidroeléctricas (excluyendo las galerías de alta presión), túneles piloto, galerías de avance en grandes excavaciones, cámaras de compensación hidroeléctrica.	1,6-2,0
C	Cavernas de almacenamiento, plantas de tratamiento de aguas, túneles de carreteras secundarias y de ferrocarril, túneles de acceso.	1,2-1,3
D	Centrales eléctricas subterráneas, túneles de carreteras primarias y de ferrocarril, refugios subterráneos para defensa civil, emboquilles e intersecciones de túneles.	0,9-1,1
E	Centrales nucleares subterráneas, estaciones de ferrocarril, instalaciones públicas y deportivas, fábricas, túneles para tuberías principales de gas.	0,5-0,8

Fuentes:

Ingeniería geológica. González, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. Pearson- Prentice Hall. 2002.

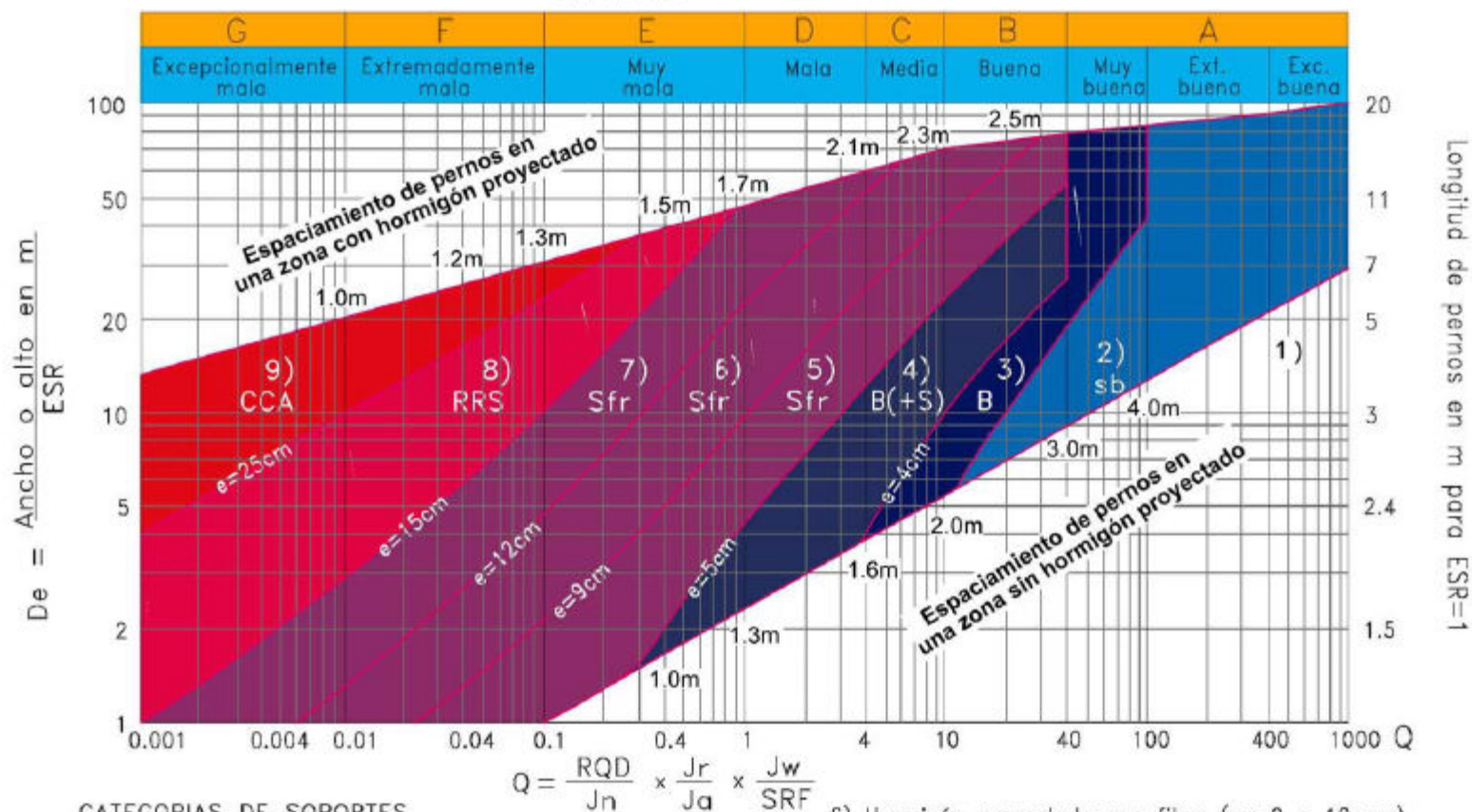
Capítulo 3.8. Túneles. Ministerio de obras públicas. 2003.

CALIDAD DE LA ROCA

MANUAL DE
CARRETERAS
VOL. Nº 3 DISEÑO

CLASIFICACION DEL MACIZO ROCOSO
Y SOPORTE RECOMENDADO

3.804.109 A
Junio 2002



CATEGORIAS DE SOPORTES

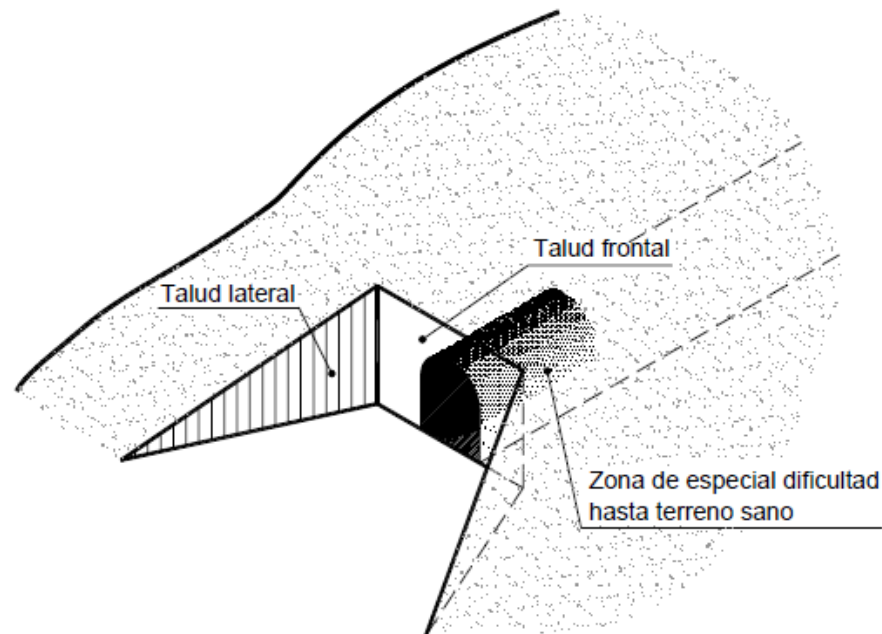
- 1) Sin refuerzo
- 2) Pernos aislados (sb)
- 3) Pernos sistemáticos B
- 4) Pernos sistemáticos y hormigón proyectado simple, e= 4 a 10 cm B(+S)
- 5) Hormigón proyectado con fibra (e= 5 a 9 cm) y apernado sistemático Sfr + B

- 6) Hormigón proyectado con fibra (e= 9 a 12 cm) y apernado sistemático Sfr + B
- 7) Hormigón proyectado con fibra (e= 12 a 15 cm) y apernado sistemático Sfr + B
- 8) Hormigón proyectado con fibra (e > 15 cm), marcos de acero u hormigón proyectado con pernos sistemáticos Sfr, RRS + B
- 9) Revestimiento de hormigón CCA

PORTALES DE ENTRADA Y SALIDA

En la zona de los portales de entrada o salida (primeros 100 m), o tramos donde la roca excavada se encuentra muy meteorizada, es necesario revestir totalmente la sección excavada con un espesor mínimo de unos 20 cm de hormigón, para lo cual es necesario colocar moldes de acero trasladables. Esta estructura se denomina túnel falso.

PARTES BASICAS DE UN PORTAL



Normalmente, la cubierta de roca es muy superior al requerido, salvo en la zona de entrada y salida del túnel, donde se requiere una cobertura mínima de 2 diámetros.

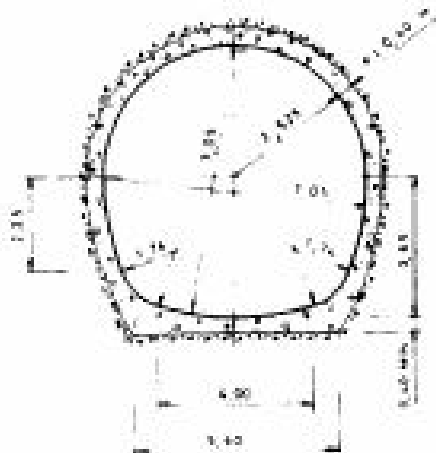
Diseño de los revestimientos

Básicamente, existen dos tipos de revestimiento:

Hormigón: reducir pérdidas de carga, proteger zonas erosionables, reducir la permeabilidad del túnel y colaborar con el sostenimiento

Deben ser diseñados para soportar los esfuerzos exteriores determinados por la calidad del macizo rocoso y la presión debido a la napa de agua. En conjunto con la roca circundante, deben soportar la presión interior. Según Benson (1989), el espesor de los revestimientos de hormigón normalmente está comprendido entre 0,2 y 0,7 m.

SECCION REVESTIDA CON HORMIGON

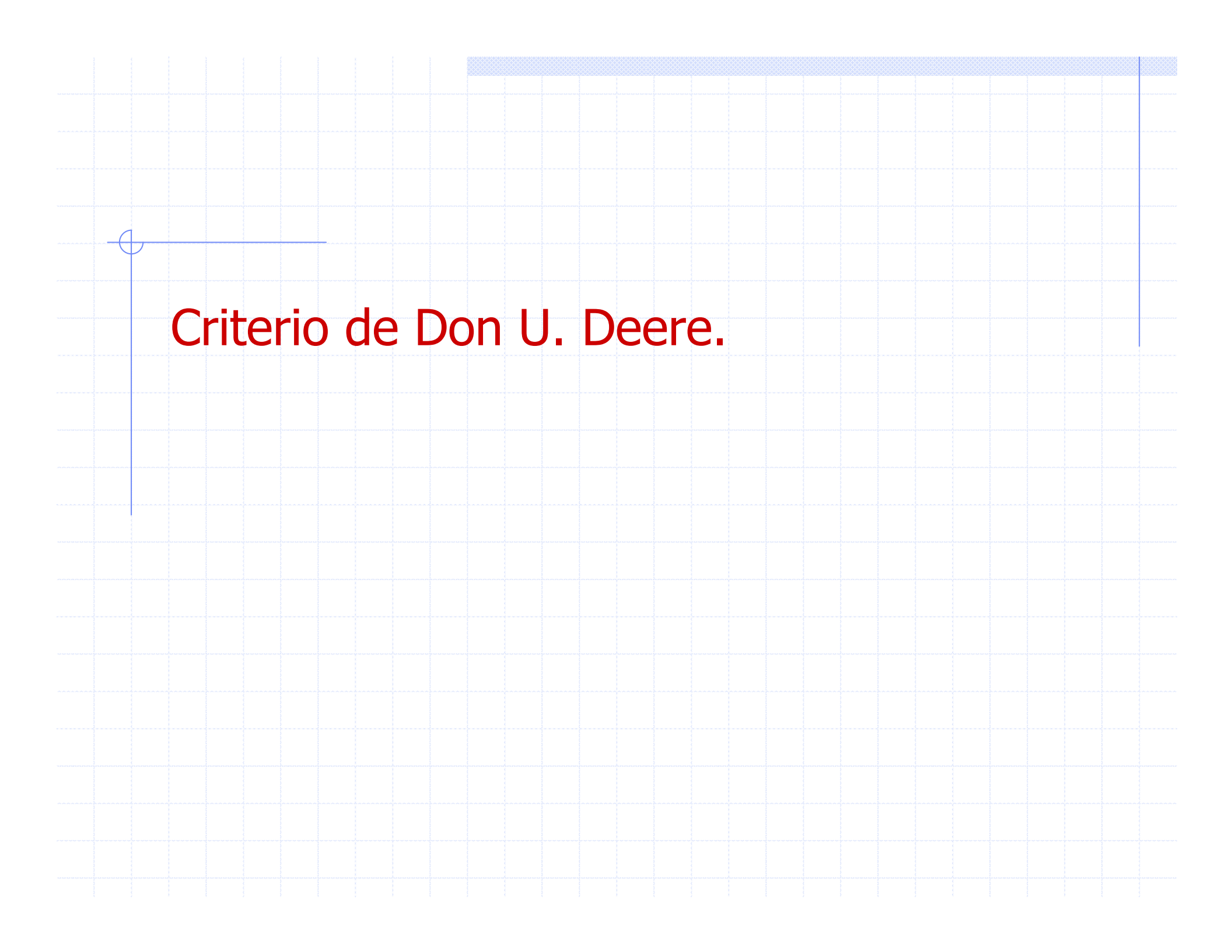


Acero: su principal función es evitar el riesgo de hidrofracturamiento y la existencia de gradientes hidrodinámicos inaceptables en el interior del macizo rocoso (roca de buena calidad: 10 – 15 [mca/m]; roca debil erosionable: < 3 [mca/m])

Los revestimientos de acero o blindajes se calculan para resistir la presión interior, suponiendo que un porcentaje es tomado por la roca y el hormigón de relleno. También debe tenerse en cuenta que durante un vaciado del túnel puede actuar la presión de la napa subterránea



Central Colbón.
Túnel blindado
en construcción,
montaje de la
bifurcación.



Criterio de Don U. Deere.

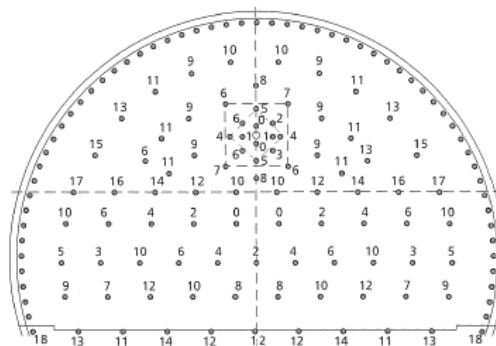
Método de Construcción de Túneles

1) Perforación y voladura (**Drill & Blast**)

El método consiste en efectuar perforaciones en el frente de excavación, cargarlos con explosivos y hacerlos detonar. La perforación es efectúa por medio de "jumbos" o carros perforadores. Una correcta voladura debe evitar un excesivo deterioro de la roca circundante que provoca sobreexcavaciones (diagrama de disparo, smooth blasting)

Una vez efectuada la tronadura, el frente debe **ventilarse** para eliminar los gases tóxicos producto del disparo. Ventilado el ambiente, se coloca el sostenimiento.

Normalmente la excavación de un túnel que se realiza con explosivos, avanza a razón de 2 a 3 m por disparo, con un avance mensual de unos 200 m.

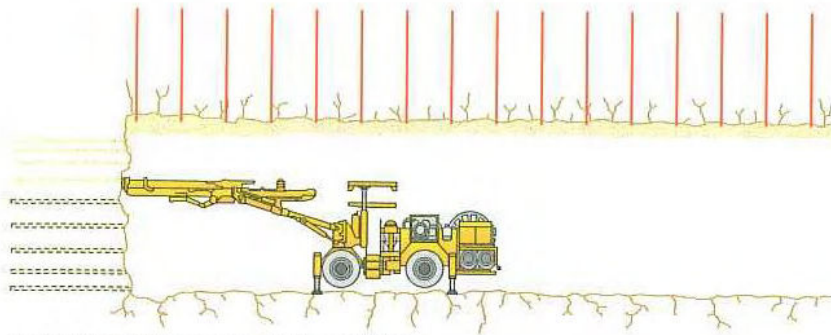


La extracción de la marina se hace mediante camiones o vagones y la colocación del material se realiza mediante cintas transportadoras.

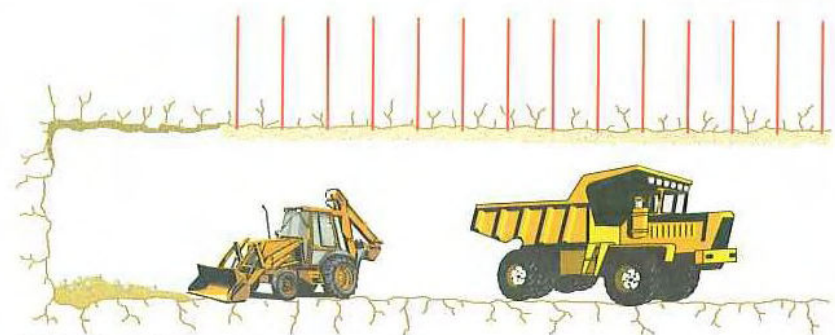
Un problema común en la excavación de un túnel son las **filtraciones** a través de las fisuras de la roca, las cuales deben ser conducidas al exterior con canaletas laterales o mediante bombeo.

Con el túnel excavado debe construirse, de ser necesario, el **revestimiento de hormigón**, para lo cual se utiliza moldaje deslizante.

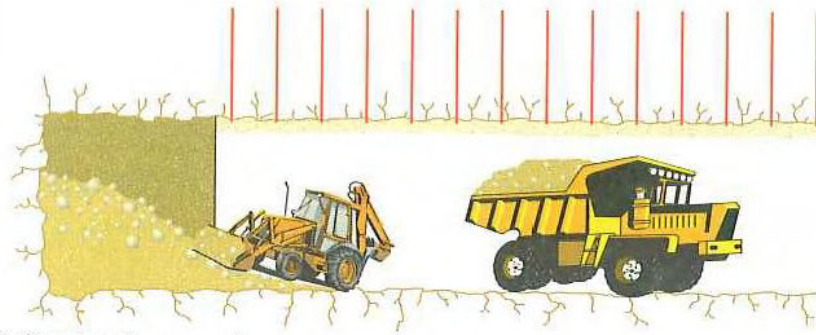
El moldaje se moviliza mediante carros que se mueven sobre vías y normalmente es metálico articulado. Antes de colocar el moldaje se hormigona el radier y las soleras y los moldes se apoyan sobre las soleras. El hormigón se coloca con bombas de embolo, que operan con aire comprimido.



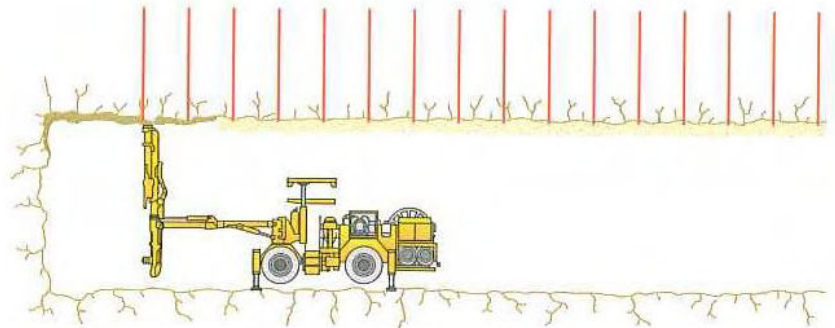
1. Perforación y carga de la voladura



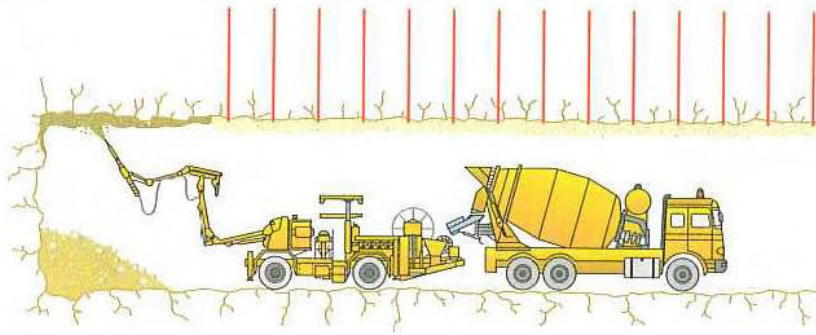
4. Finalización del desescombro



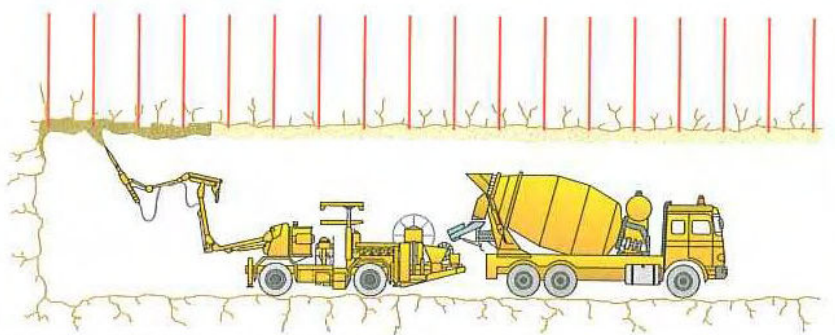
2. Saneo y desescombro



5. Sostenimiento mediante bulones



3. Sellado



6. Sostenimiento mediante hormigón proyectado

2) Excavación mecanizada

La construcción se realiza a través de medios mecánicos mediante rozadoras o máquinas túneladoras. Las rozadoras consisten en máquinas de ataque puntal dotadas de un brazo que puede recorrer el frente de excavación, en cuyo extremo se aloja un cabezal rotatorio provisto de herramientas de corte.

Según su potencia, permiten excavar rocas de resistencia media e incluso alta, con mejores resultados en rocas entre 20 y 60 Mpa de resistencia a la compresión simple. Se deben tener en cuenta los criterios de excavabilidad de la roca



CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

3) Tuneladora (TBM:Tunnel boring machine)

Las tuneladoras excavan una sección completa de forma circular, mediante una cabeza giratoria dotadas de discos o picas de corte. Se pueden utilizar en un amplio rango de calidad, con menores rendimientos para rocas de alta calidad.

Su principal ventaja es el rendimiento que pueden alcanzar, ya que en un proceso continuo excavan, limpian, sostienen y revisten el túnel. Tienen limitaciones importantes en macizos rocosos de calidad heterogénea, con fallas, filtraciones, terrenos plásticos o con altas tensiones. Se requiere de un conocimiento muy completo de las condiciones geológicas del terreno a perforar.

